



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería Electrónica

Fecha: 14 de febrero de 2025

Autores: Juan Camilo Ruiz Escobar

Nombre del Proyecto de Grado: “Movilex: Uso de Modelos de Propagación en Interior para la Extensión Estratégica de la Cobertura de Red Móvil en Zonas Interiores en la Era de 5G. Corrección de la cobertura de red móvil en el piso 10 del Departamento Administrativo de Planeación Distrital de Cali.”

Director:

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Firma de Director(a) del Proyecto de Grado

Santiago de Cali, 14 de febrero de 2025

Señores

Pontificia Universidad Javeriana Cali.

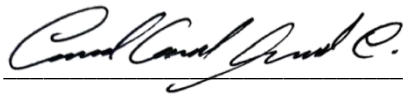
Dr. Luis Eduardo Tobón Llano.

Director Carrera de Ingeniería Electrónica
Cali.

Cordial saludo,

Por medio de la presente me permito informarle que he revisado el proyecto de grado del estudiante de Ingeniería Electrónica Juan Camilo Ruiz Escobar (código: 8944037), denominado “Movilex: Uso de Modelos de Propagación en Interior para la Extensión Estratégica de la Cobertura de Red Móvil en Zonas Interiores en la Era de 5G. Corrección de la cobertura de red móvil en el piso 10 del Departamento Administrativo de Planeación Distrital de Cali” del cual soy director, considero corregido el documento y apto para presentar al jurado.

Atentamente,



Dr. Carlos Andrés Giraldo Castañeda

Santiago de Cali, 14 de febrero de 2025

Señores

Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano.

Director Carrera de Ingeniería Electrónica

Cali

Cordial saludo,

Me permito presentar a su consideración el trabajo de grado titulado “Movilex: Uso de Modelos de Propagación en Interior para la Extensión Estratégica de la Cobertura de Red Móvil en Zonas Interiores en la Era de 5G. Corrección de la cobertura de red móvil en el piso 10 del Departamento Administrativo de Planeación Distrital de Cali” con el fin de cumplir con los requisitos exigidos por la Universidad para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Al firmar aquí, doy fe que entiendo y conozco las directrices para la presentación de trabajos de grado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias aprobadas el 26 de noviembre de 2009, donde se establecen los plazos y normas para el desarrollo del trabajo de grado.

Atentamente,



Juan Camilo Ruiz Escobar

Código: 8944037



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Facultad de Ingeniería
y Ciencias
Ingeniería Electrónica

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias
Programa de Ingeniería Electrónica

Trabajo de grado:

*Movilex: Uso de Modelos de Propagación en Interior para
la Extensión Estratégica de la Cobertura de Red Móvil en
Zonas Interiores en la Era de 5G.*

*Corrección de la cobertura de red móvil en el piso 10 del Departamento Administrativo de
Planeación Distrital de Cali.*

Presentado por

Juan Camilo Ruiz Escobar

Director

Dr. Carlos Andrés Giraldo Castañeda

14 de febrero de 2025
Santiago de Cali

Agradecimientos

Le doy gracias al Señor que, en este tiempo, ha hecho grandes cosas en mí. Agradezco a Saray, el amor de mi vida, porque siempre me apoyó y me devolvió las ganas de seguir adelante y ser mejor. A mis padres, Luis y Francia, porque gracias a ellos me ha sido todo posible. Gracias a Otto y Beatriz por regalarme un renovado sentido de vida. Al profesor Carlos Giraldo por su apoyo e infinita paciencia en este proceso. Le doy gracias a Juan Manuel Nogales porque sin su ayuda inicial esto no habría llegado a término. Especiales gracias a Lewis Riascos por su gran trabajo e infinito servicio. A todo quien me acompañó durante este proceso, gracias, porque este es más logro suyo que mío.

Lista de Abreviaciones

3GPP: Third Generation Partnership Project	FDD: Duplexación por División de Frecuencias
5G: Quinta Generación de Redes Móviles	FDM: Modo Dúplex Completo
5GC, 5GCN: Red Núcleo de la Quinta Generación de Redes Móviles	FPGA: Matriz de Puerta Programable en Campo
AI: Inteligencia Artificial	FR1: Primer Rango de Frecuencias de 5G (bajo los 6 GHz)
AMF: Función de Movilidad y Acceso (5G)	FR2: Segundo Rango de Frecuencias de 5G (sobre los 6 GHz)
AN: Redes de Acceso	gNB: Estación Base (5G)
ANE: Agencia Nacional del Espectro	HaaS: Hardware Como Servicio
AUSF: Función de Autenticación (5G)	HetNet: Red Heterogénea
A&F: Amplificación y Retransmisión	HSS: Servidor Local de Suscriptores (4G)
BPSK: Codificación por Cambio de Fase Binario	IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
BS: Estación Base	IoT: Internet de las Cosas
CAPEX: Inversiones de Capital	IPv4: Protocolo de Internet Versión 4
CN: Red Núcleo de la Red Móvil	ITU: Unión Internacional de Comunicaciones
CRC: Comisión de Regulación de Comunicaciones	LDP: Comprobación de Paridad de Baja Densidad
CSI-RS: Señal de Referencia de Información Sobre el Estado del Canal	LTE: Evolución a Largo Plazo para UMTS
DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística	MAC: Control de Acceso al Medio
DL: Enlace Descendente	MIMO: Múltiples Entradas y Salidas
DM-RS: Señal de Referencia de Demodulación	MinTIC: Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones
DxNB: eNB o gNB donadora	MIoT: Internet de las Cosas Masivo
D&F: Decodificación y Retransmisión	MME: Entidad de Gestión de Movilidad (4G)
eMBB: Banda Ancha Móvil Mejorada	mmWave: Ondas Milimétricas
eNB: Estación Base (4G)	NB: Estación Base (3G)
EPC: Red Núcleo Evolucionada de Paquetes de Datos (4G)	NFV: Virtualización de Funciones de Red
E-UTRA: Acceso Radioeléctrico Universal Evolucionado Terrestre (4G)	NR: Nueva Radio
E-UTRAN: Red Universal Evolucionada de Acceso Radioeléctrico Terrestre (4G)	NSA: (Red) No Independiente (5G)
FC: Compatibilidad Hacia Adelante	NSSF: Función de Selección de Segmento de Red

OFDM: Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales

OFDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales

OPEX: Inversiones Operacionales

ORM: Operadora de Red Móvil

PCF: Función de Control de Políticas (5G)

PDCCH: Canal Físico de Control de Enlace Descendente

PDCP: Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos

PDSCH: Canal Físico Compartido de Enlace Descendente

PGW: Puerta de Enlace de Paquetes de Datos (4G)

PHY: Control de Capa Física

PSK: Codificación por Cambio de Fase

PSS: Señal Primaria de Sincronización

PTRS: Señal de Referencia para Detección de Fase

PUSCH: Canal Físico Compartido de Enlace Ascendente

QAM: Modulación de Amplitud en Cuadratura

QoS: Calidad del Servicio

QPSK: Modulación en cuadratura por desplazamiento de fase

RAN: Red de Acceso por Radiofrecuencia

RAT: Tecnologías de Acceso por Radiofrecuencia

RLC: Control de Enlace de Radiofrecuencia

RN: Nodo Repetidor de Señal de Red Móvil

RRC: Control de Recursos de Radio

SA: (Red) Independiente (5G)

SC-FDMA: Acceso Múltiple por División de Frecuencias de Portadora Única

SDR: Radio Definida por Software

SI: Auto Interferencia

SMF: Función de Gestión de Sesiones (5G)

SMS: Servicio de Mensajería

SRM: Señal de Red Móvil

SRS: Señal Sonora de Referencia

SSS: Señal Secundaria de Sincronización

TDD: Duplexación por División de Tiempo

UDM: Función de Gestión de Unificación de Datos (5G)

UE: Dispositivo del Usuario (celular o tablet)

UL: Enlace Ascendente

UMTS: Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles

URLLC: Comunicaciones ultra confiables de ultra baja latencia

USRP: Periférico Universal de Radio por Software

VoLTE: Voz Sobre LTE

WWAN: Red Inalámbrica de Área Extensa

Índice

1	Introducción	12
2	Descripción del Problema	13
2.1	Planteamiento del problema.....	13
2.2	Objetivos.....	14
2.2.1	Objetivo General	14
2.2.2	Objetivos Específicos	14
2.3	Justificación	15
2.4	Delimitaciones y Alcances.....	16
2.4.1	Entregables	16
3	Desarrollo del Proyecto.....	17
3.1	Marco de referencia	17
3.1.1	Áreas temáticas	17
3.1.2	Marco Teórico.....	17
3.1.3	Trabajos Relacionados	36
3.2	Metodología.....	37
3.3	Resultados esperados	38
3.4	Cronograma	39
3.5	Recursos.....	40
3.5.1	Humanos.....	40
3.5.2	Técnicos	40
3.5.3	Presupuesto.....	40
4	Diseño e Implementación.....	41
4.1	Definición técnica del proyecto	41
4.2	Inmersión en el contexto.....	42
4.2.1	Arquetipo del proyecto.....	44
4.2.2	Relato General de Experiencia de Usuario.....	44
4.3	Requerimientos Generales de la Solución A&F	45
4.4	Diseño de la solución	45
4.4.1	Metodología GPT.....	45
4.4.2	Materiales para Medidas	50
4.4.3	Diagrama de bloques general del sistema.....	52
4.4.4	Diseño del <i>Fronthaul</i>	52
4.4.5	Diseño del <i>Backhaul</i>	55
4.4.6	Selección del amplificador de señal	63

4.4.7	Diseño general de la solución.....	67
5	Pruebas y Análisis de Resultados.....	75
5.1	Campaña de medidas final.....	75
5.2	Ajuste de los modelos.....	85
5.3	Impacto de la Solución.....	87
5.4	Conclusiones.....	88
6	Bibliografía.....	89

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de fase de los valores binarios de BPSK, extraído de [30].	18
Figura 2. Constelación QPSK. Extraído de [30].	19
Figura 3. Constelación de 16 QAM, extraído de [30].	19
Figura 4. Distribución de celdas en una red móvil, extraído de [35].	20
Figura 5. Estructura general de una red móvil 5G, extraído de [36].	21
Figura 6. Arquitectura de E-UTRAN, extraído de [43].	22
Figura 7. Arquitectura de EPC, extraído de [47].	23
Figura 8. Proceso de transición NSA a SA, tomado de [52].	25
Figura 9. Arquitectura 5G con RAN no-3GPP no confiable, extraído de [71].	33
Figura 10. Arquitectura de 5G con RAN no-3GPP confiable, extraído de [71].	34
Figura 11. Piso 10 de la Alcaldía de Cali.	42
Figura 12. Vista satelital de la Alcaldía, extraído de Ontic.	43
Figura 13. Plano del Piso 10 de la Alcaldía Distrital.	43
Figura 14. Resultados Generales de la Encuesta.	44
Figura 15. Metodología GPT.	49
Figura 16. Toma de datos con Tektronix RSA306B.	50
Figura 17. Vista de la toma de datos con SignalVu-PC.	50
Figura 18. VNA en proceso de calibración.	51
Figura 19. Medidas de la celda seleccionada por el UE en Network Cell Info.	51
Figura 20. Sistema desglosado en sus partes esenciales.	52
Figura 21. Programa para ajuste manual del plano.	53
Figura 22. Campo de distancias generado por el código.	54
Figura 23. Resultado del MKM.	54
Figura 24. Resultado del I-MKM.	55
Figura 25. Identificación de BS con Ontic alrededor del CAM.	55
Figura 26. Visual de los Cerros desde el piso 10.	56
Figura 27. Visual del Río desde el piso 10.	56
Figura 28. Antenas identificadas en la visual de los Cerros.	57
Figura 29. Antenas identificadas en la visual del Río.	57
Figura 30. Representación gráfica de la medida antenna.	58
Figura 31. Medida real en la Primera Campaña de Medidas.	58
Figura 32. Medida tomada con el RSA306 y graficada con Python.	59
Figura 33. Identificación de señal LTE en sitio con RSA306B.	59
Figura 34. Medidas tomadas en el piso 10 con el RSA306.	60
Figura 35. Recorrido de la Primera Campaña de Medidas.	61
Figura 36. Lectura de 5G NSA en el edificio.	62
Figura 37. Amplificador AWS (arriba UL; abajo, DL).	65
Figura 38. Amplificador IMT-E (arriba UL; abajo DL).	66
Figura 39. Prueba de aislamiento de puertos.	68
Figura 40. Paso directo e inverso de la señal.	68
Figura 41. Antena LDPA y omnidireccional, extraído de Amazon.	69
Figura 42. Caracterización de la antena LDPA.	69
Figura 43. Caracterización de la antena omnidireccional.	70
Figura 44. Diagrama en detalle del sistema.	70
Figura 45. Sistema sin antenas conectado al VNA.	71
Figura 46. Medida del bloque amplificador con el VNA.	71

Figura 47. Medidas en Fronthaul con RSA306B.	72
Figura 48. Potencias Recibidas de cada ORM en el backhaul en sitio final.....	73
Figura 49. Instalación Final de los Equipos.	74
Figura 50. Recorrido Realizado para las Medidas.	75
Figura 51. Pérdidas por tipo de material vs ángulo de inserción.....	76
Figura 52. Mapa de distancias generados por los mapas RSSI.	76
Figura 53. Mapa de Calor para Claro según MKM.....	77
Figura 54. Mapa de calor puro de Claro según I-MKM.....	77
Figura 55. Mapa de calor puro de Claro según ITU 1238.....	77
Figura 56. Extracción de datos para IMT-E (I-MKM).....	78
Figura 57. Toma de una muestra con RSA306B.....	78
Figura 58. Configuración del RSA306B.....	79
Figura 59. Izq. Carpeta con medidas, der. archivo de medidas.....	79
Figura 60. Generación de vector de medidas finales.....	80
Figura 61. Medida NCI en el punto 18.....	81
Figura 62. Medidas RSA vs modelos para Claro.....	82
Figura 63. Mapa de RSRP real para Claro en IMTE.....	83
Figura 64. Mapa de RSSI real para Claro en IMTE.....	83
Figura 65. Interpolación de la primera campaña de medidas.....	84
Figura 66. Comparación RSRP y Modelos.....	84
Figura 67. Ajuste de ganancia del I-MKM.....	85
Figura 68. Comparación de medidas vs modelos ajustados ($K_a = 11.66$ dBm).....	86
Figura 69. Izquierda, antes; centro, sitio, derecha después.....	87

Índice de Tablas

Tabla 1. Niveles de Calidad de Señal, extraído de [37] [38].	21
Tabla 2. <i>QoS para casos de uso 5G SA</i> , extraído de [15].	25
Tabla 3. Pérdidas de los diferentes tipos de pared, extraído de [61].	28
Tabla 4. Valores del Modelo Multi-Wall, extraído de [62].	29
Tabla 5. Tipos de pared para el MWM, extraído de [63].	29
Tabla 6. <i>Parámetros para el modelo ITU</i> , extraído de [64].	30
Tabla 7. Tabla de caracterización de los materiales, extraído de [67].	31
Tabla 8. <i>Resumen de las Small Cell</i> , extraído de [16].	33
Tabla 9. Bandas de frecuencia 4G y 5G relacionadas al operador [73], elaboración propia.	35
Tabla 10. Tabla presupuestal de inversión en tiempo.	40
Tabla 11. Recursos necesarios para la realización del proyecto.	40
Tabla 12. Asignación de costos presupuestales.	40
Tabla 13. <i>Criterios de comparación de los sistemas.</i>	41
Tabla 14. <i>Calificación de los criterios.</i>	41
Tabla 15. Caracterización de los tipos de material de construcción de cada pared.	53
Tabla 16. Medidas de RSRP con Network Cell Info a lo largo del edificio.	61
Tabla 17. Promedio general de las medidas en el piso.	62
Tabla 18. Frecuencias centrales y ancho de banda de las diferentes ORM.	62
Tabla 19. Proceso de Selección de Amplificador.	64
Tabla 20. Ganancias de los amplificadores.	67
Tabla 21. Lista de accesorios RF.	67
Tabla 22. Caracterización general del sistema.	72
Tabla 23. Ventanas frecuenciales usadas por operadores.	80
Tabla 24. Comparación de modelos y medidas RSSI (RSA306B).	82
Tabla 25. Comparación de modelos y medidas con UE.	85
Tabla 26. Comparación de modelos ajustados y medidas RSA306B.	86

Abstract

This study focuses on sizing and implementing of an Amplify-and-Forward (A&F) system to enhance mobile network signal quality and coverage in indoor environments, specifically targeting the IMT-E band. Leveraging the improved Motley-Keenan model (I-MKM) and propagation analysis, the system was dimensioned to address the challenges of poor signal reception on the 10th floor of the District Mayor's Office of Santiago de Cali. The study identified limitations in amplifying AWS signals due to low received signal quality, highlighting the need for infrastructure upgrades from operators like Movistar.

The I-MKM was proved to be essential in estimating signal behavior in diverse material environments, offering a versatile alternative to ITU-R model limited by its frequency range and qualitative nature. The final implementation demonstrated significant improvements in speed and signal stability, with the IMT-E band providing excellent coverage in key areas, benefiting a large number of users. Additionally, the donated system opens opportunities for scalable, cost-effective applications, potentially serving as a low-cost contractor-aimed internet solution for public institutions such as the mentioned.

This research underscores the importance of propagation modeling in designing adaptable, economical systems that enhance Quality of Service (QoS) in challenging indoor scenarios, setting a foundation for future academic and technological developments.

Keywords: A&F, Coverage Extension, Propagation Models, Indoor Signal, Motley-Keenan.

Resumen

Este estudio se centra en el dimensionamiento e implementación de un sistema de Amplificación y Retransmisión (A&F) para mejorar la calidad y cobertura de la señal de red móvil en entornos interiores, enfocándose específicamente en la banda IMT-E. Utilizando el modelo mejorado Motley-Keenan (I-MKM) y un análisis avanzado de propagación, el sistema fue dimensionado para abordar los desafíos de la recepción deficiente de señal en el piso 10 de la Alcaldía Distrital de Santiago de Cali, Departamento Administrativo de Planeación Distrital. El estudio identificó dificultad en la amplificación de señales AWS por baja calidad de la señal recibida, resaltando la necesidad de mejoras en la infraestructura por parte de operadores como Movistar.

El modelo I-MKM demostró ser esencial para estimar el comportamiento de la señal en entornos con diversos materiales de construcción, ofreciendo una alternativa sólida a los modelos ITU-R tradicionales, que están limitados por su rango de frecuencias y su ajuste de corte cualitativo. La implementación final mostró mejoras significativas en velocidad y estabilidad de señal, con la banda IMT-E proporcionando excelente cobertura en áreas clave, beneficiando a un gran número de usuarios. Además, el sistema donado abre oportunidades para aplicaciones escalables y económicas, que podrían servir como una solución de internet de bajo costo para contratistas en instituciones públicas como la presente.

Esta investigación subraya la importancia de los modelos de propagación en el diseño de sistemas adaptables y económicos que mejoren la Calidad de Servicio (QoS) en escenarios interiores desafiantes, estableciendo una base para futuros desarrollos académicos y tecnológicos.

Palabras clave: A&F, Extensión de Cobertura, Modelos de Propagación, Señal en Interiores, Motley-Keenan.

Introducción

La llegada de la quinta generación de redes móviles (5G) a los diferentes países del hemisferio norte global fue la puerta de entrada para el desarrollo de tecnologías con un alto nivel de sofisticación que cambiarían el funcionamiento de los mercados, industrias e incluso los estilos de vida de los ciudadanos de a pie a nuevas dinámicas nunca registradas en la historia humana. Esta nueva tecnología se posiciona como una de las piedras angulares del desarrollo de otras diversas tecnologías como el Internet de las cosas (IoT), conducción autónoma, ciudades inteligentes (*Smart Cities*), Agroindustria automatizada, Inteligencia Artificial (AI), industria 4.0, entre otras [1] [2] [3]. Los avances técnicos que 5G trae consigo traen aportes a las cuestiones más fundamentales del desarrollo de la sociedad como lo son la alimentación, gobernanza, salud, productividad, entre otros, desplegando un cambio de paradigma y una revolución en las estructuras materiales que constituyen a estas categorías. Por ejemplo, la nueva generación de redes móviles posibilita desarrollos agroindustriales totalmente automatizados [4], sistemas de seguridad ciudadana en tiempo real [5], e incluso la ejecución de cirugías a distancia en zonas vulnerables sin disponibilidad de especialistas [6].

Aunque en el norte global y la República Popular China, 5G ya se había desplegado en 2019 e incluso antes, en el sur global, más específicamente en el contexto de Colombia, la llegada de esta tecnología ha sido altamente retrasada por diversas contingencias como lo fueron la pandemia de la Covid-19, el Paro Nacional y las fluctuaciones de los Gobiernos de la Nación. Esto se puede observar dado que, en una primera instancia, el plan 5G fue lanzado en 2019 por el Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (MinTIC) [7], pero la subasta para el uso de las bandas del espectro de 5G no se realizó sino hasta el 20 de diciembre de 2023 [8] [9]. De acuerdo con el viceministro de MinTIC [10], dichos eventos han alargado la implementación de las nuevas tecnologías hasta el segundo semestre del 2024. De manera que, aun siendo este análisis superficial, pues muchos otros aspectos han afectado la legalización y lanzamiento de esta tecnología, en la práctica el país se ha retrasado ampliamente respecto del mundo.

Ahora, ante la llegada de la nueva tecnología al país, no solo se espera que crezca la industria de las telecomunicaciones, sino que otras industrias se vean también impactadas positivamente. Por ejemplo, la multinacional mexicana Claro, en colaboración con MinTIC y EcoPetrol, ejecutó pruebas exitosas con una red industrial 5G para prestar soporte en tiempo real a una refinadora en Barrancabermeja [11]. Otro ejemplo, es que en [12] se expone como 5G podría impactar positivamente a la industria de la agricultura colombiana, mejorando la productividad y eficiencia, reduciendo el impacto ambiental de los cultivos. Otros casos de aplicación que generan interés en el país son *Smart Cities*, educación, agricultura, seguridad, entretenimiento, entre otros [13]. De este modo, se puede observar que esta tecnología podría fungir como una nueva infraestructura vital para el desarrollo general del país.

No obstante, aun teniendo en cuenta los pronósticos positivos, la implementación de 5G en la Nación experimenta diversos retos técnicos. Uno de los más relevantes y retadores es la garantía de una buena cobertura, tanto en términos de su calidad, como de su penetración en diferentes zonas urbanas y rurales. La brecha tecnológica en este sector sigue siendo amplia y se proyecta que, para 2025, el 20% del territorio nacional aún no tenga acceso a servicios de internet y llamadas [13]. Por otra parte, en el país aún existen diversos casos en los que la cobertura es insuficiente en zonas limítrofes e incluso en zonas urbanas de alta densidad.

Así, para lograr una implementación exitosa y un aprovechamiento de las nuevas tecnologías, es importante solventar las problemáticas de cobertura y QoS de manera radical, con miras en cerrar un ciclo de atraso tecnológico que el País viene sufriendo. Esto requiere un esfuerzo por traer avances tecnológicos del mundo a contextos locales, actualizando los métodos de las telecomunicaciones, de modo que la predicción de resultados esté a la altura del resultado en sí mismo. Con ello, acercándose a las Comunicaciones Ultrarrápidas de Ultra Baja Latencia (URLLC) y que, así como el sector de las telecomunicaciones crece, crezca también la dignidad del usuario como pagante del servicio.

Descripción del Problema

2.1 Planteamiento del problema

Lograr una cobertura de señal de red móvil (SRM) ubicua y sin fisuras es uno de los principales objetivos para el futuro de las redes de comunicación móvil [14], constituyendo un reto técnico importante que requiere de altos estándares y especificaciones, pero sobre todo de resultados prácticos. Por ello, *Third Generation Partnership Project* (3GPP) estableció una serie de requerimientos para que las tecnologías 3GPP puedan ser categorizadas por la Unión Internacional de Comunicaciones (ITU) como tecnologías de la Quinta Generación de Comunicaciones Móviles (5G), definiendo de manera detallada, como se observa en [15]: las velocidades de transferencia de datos en casos de uso específicos (como el industrial o el doméstico), la disponibilidad de la señal (en zonas rurales e incluso altamar) y la extensión o mejoramiento de la cobertura en zonas con ausencia de servicio y con servicio insuficiente, respectivamente.

Dado que el mejoramiento de la cobertura de la señal de red móvil es un objetivo central para 5G [16], se deben evaluar los casos en los que dicho problema se deja ver con mayor fuerza. Uno de estos escenarios son los puntos ciegos (o huecos en la cobertura) que son un incidente habitual en un contexto urbano y se presentan sobre todo en espacios interiores. Estos son causados por las condiciones ambientales (en el amplio sentido de la palabra) y la distancia entre el dispositivo de usuario (UE) y la estación base (BS) proveedora de la señal [16]. En otras palabras, la íntegra interacción de la señal radioeléctrica con el canal de comunicaciones provoca la degradación de la calidad del servicio (QoS). Más aún, dado que 5G usa portadoras de mayor frecuencia que las anteriores generaciones, que van desde las bandas FR1 (o sub-6 GHz, entre 450 MHz a 6GHz), hasta las bandas FR2 (o de onda milimétrica, *mmWave*, de 24.25 GHz a 52.6 GHz) [16], la pérdida de la calidad de señal se ve maximizada desde la perspectiva del usuario [17].

Luego, teniendo en cuenta lo anterior, los usuarios que se ven más afectados por pérdidas de servicio podrían ser los usuarios en interiores. Como señala García en [18], cuando estos usuarios se conectan desde zonas interiores con BS situadas en el exterior, sufren de un efecto añadido de degradación de la señal, que está directamente relacionada a los materiales de construcción de la edificación. Así pues, continúa el autor, por ejemplo, para las bandas de frecuencias de 3.3 GHz a 4.2 GHz, la “atenuación varía desde menos de 5 dB en edificios de oficinas antiguos, hasta 20-30 dB en edificios de oficinas modernos. Estudios recientes en nuevos materiales de construcción... muestran constantes de atenuación de 0.8 a 4 dB/cm. (Y) en los edificios residenciales con ventanas de cristal estándar... (puede aumentar) hasta 10 dB” [18]. Más aún, concluye [18], a dichos valores de atenuación de la señal se le podrían añadir hasta 8 dB de pérdida de potencia dependiendo del ángulo de inserción de la onda.

Siguiendo la problemática en interiores, desde una perspectiva económica es poco probable que las operadoras de la red móvil (ORM) decidan cubrir las necesidades del nicho de mercado expuesto en esta sección, debido a que esta acción no necesariamente representa una inversión rentable. Las implementaciones para el mejoramiento de la cobertura de la señal son un aspecto determinante para las ORM, ya que impactan directamente sobre los gastos de capital (CAPEX) y los gastos operacionales (OPEX) de la empresa en estas implementaciones comerciales [19]. Cualquier mejoramiento en la cobertura de la señal implica un despliegue de infraestructuras y equipos que tienen un costo muy alto, como afirma [13], además de la inversión en logística y personal de mantenimiento, lo que podría afectar al equilibrio costo-inversión de dichas empresas, arriesgando su fiabilidad de cara a inversores y socios. De este modo, extrapolando el análisis anterior, es justo afirmar con seguridad que los usuarios que actualmente sufren problemas de señal en interiores no verán una mejoría de su situación a mediano plazo.

Con todo lo anterior en mente, en Colombia se pueden observar diversos casos que sufren la problemática expuesta, aun siendo que 5G SA y NSA se implementan juntos en FR1, de acuerdo con lo establecido en la

subasta del espectro radioeléctrico [8]. Por lo que, sin una implementación de un número elevado de BS para 5G SA, la calidad de la señal en interiores podría deteriorarse respecto de la generación existente. Y para 5G NSA, seguirán los mismos problemas de cobertura que los usuarios han venido experimentando. Esto se puede observar concretamente, en la ciudad de Cali, donde existen diversos casos de estudio donde la QoS en interiores es insuficiente, por las causas presentadas anteriormente, en ubicaciones como: empresas, conjuntos residenciales, hogares de barrio, supermercados, instituciones educativas, ayuntamientos, entre otros varios. Esta limitación imposibilita el correcto despliegue del servicio de datos e incluso el de llamadas de voz.

Algunos ejemplos de ubicaciones que sufren esta degradación de QoS son, hasta 2021, la Pontificia Universidad Javeriana, hasta el primer semestre de 2024, Unicentro y actualmente Premier del Limonar, conjuntos residenciales como Reservas de Meléndez 2, Camambú, empresas como la sede administrativa de Constructora Meléndez S.A. e incluso todos los pisos de la Alcaldía Distrital de Santiago de Cali. Estos lugares presentan oportunidades para nuevos proyectos, por ello, vale la pena cuestionarse ¿cómo se podría mejorar la QoS de la red móvil en estos entornos interiores?

Más aún, esta pregunta problema desemboca en otras cuestiones relevantes como: ¿existen a nivel mundial alternativas a la dependencia del servicio del operador móvil para suplir esta necesidad?, ¿es posible la integración de tecnologías de red móvil preexistentes con las nuevas tecnologías para mejorar la cobertura?, ¿existe algún método teórico para el dimensionamiento de soluciones en esta área?, ¿cómo se podría implementar una solución integral que extienda y mejore la cobertura de la señal en interiores con equipos existentes?, ¿es posible que dicha solución sea escalable?, ¿qué se necesita para extender la cobertura de la señal 5G SA y NSA?, ¿son útiles los modelos de radiopropagación existentes en la literatura para este fin? Y ¿se puede integrar dicha solución a infraestructuras de red existentes para reducir su costo de implementación?

2.2 Objetivos

Dada la línea que generan las preguntas del problema, se establece el objetivo general y los objetivos específicos.

2.2.1 Objetivo General

Implementar una solución tecnológica que mejore la QoS en zonas de edificios con insuficiencia o ausencia del servicio de red móvil, haciendo uso de tecnologías existentes dimensionadas con modelos de radiopropagación en interiores.

2.2.2 Objetivos Específicos

- I. Investigar sobre los diferentes sistemas de extensión de la red basadas en estándares 3GPP y no-3GPP en el mercado mundial y la literatura.
- II. Concebir una solución para un contexto real relevante.
- III. Dimensionar estratégicamente la solución con base en modelos de propagación, medidas en sitio, criterios enfocados en el usuario y eficiencia presupuestal.
- IV. Realizar un proceso de selección para la adquisición de los equipos y materiales necesarios.
- V. Implementar solución en el sitio de aplicación.
- VI. Medir la operación del sistema a través de un plan de pruebas.

2.3 Justificación

En un contexto en el cual los avances en telecomunicaciones se han visto retrasados por diversas contingencias, todo aporte positivo a esta área se transforma en un paso hacia el desarrollo del país. Particularmente, la pandemia de la Covid-19, retrasó en 3 años la implementación de 5G en Colombia [13], lo que aumentó la brecha tecnológica de los colombianos con respecto al mundo.

Sin embargo, siendo que los años después de la pandemia y el paro nacional fueron difíciles a nivel social, para el sector de las telecomunicaciones la historia fue distinta y se augura un punto de inflexión positivo para el desarrollo tecnológico y económico del país. El crecimiento del sector, de acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en [20], es positivo y se afirma que para el “2022 el valor agregado de la actividad de telecomunicaciones creció en un 6.0%, ascendiendo hasta los 18.8 billones de pesos” y, según la comisión de regulación de comunicaciones (CRC), para marzo de 2023 las conexiones de Internet móvil crecieron 6.5% con respecto al mismo mes de 2022, con 34.7 millones de accesos de red móvil 4G (86.5% del total) y una penetración de la tecnología de 76.9 de cada 100 habitantes [21]. Así, la llegada de 5G y, particularmente una solución que aporte a esta ola tecnológica podría acelerar el ya acelerado crecimiento. Es por esto que, en general, cualquier avance y aporte al sector de tecnologías de información y comunicaciones (TIC), es beneficiario de una tendencia que representa oportunidades emergentes de crecimiento y abre posibilidades de generación de nuevos modelos de negocio que beneficien al usuario.

Este trabajo se proyecta ante la llegada de 5G en Colombia, apuntando a disminuir un problema común en las anteriores generaciones de la red móvil que podría verse amplificado por el uso de bandas de frecuencia más altas. Por ello, partiendo de la problemática del deterioro que la señal de red móvil (SRM) sufre en su camino desde la BS hasta el UE, se concibe la pertinencia de generar una solución tecnológica que extienda la cobertura de la red móvil, con intenciones de mejorar la QoS percibida por el usuario. En esta misma línea, el aporte de esta investigación constituye diversas oportunidades, tanto para los usuarios de la red móvil ya sean profesionales o domésticos, como para las distintas organizaciones con instalaciones presenciales, e incluso la reputación de las operadoras de red móvil, lo que, en últimas, implica un aporte a la Nación. Asimismo, dicha solución se alinea con los esfuerzos de 3GPP por llegar a la Red Heterogénea 5G (HetNet) [22], viabilizando la implementación del paradigma de tecnologías heterogéneas de acceso por radiofrecuencia (RAT), en el país. Además, aporta a los objetivos de MinTIC, mejorando la conectividad de los habitantes, aportando al cierre de la brecha digital [23], pudiendo entrar en las posibles líneas de inversión Estatal que el Gobierno Nacional promueve para la mejora de la conectividad en el territorio [24].

Ahora, como desde la perspectiva de las ORM, las nuevas tecnologías implican una inversión de gran magnitud, cualquier situación problemática de cobertura, podría no ser cubierta debido a altos costos de inversión de capital (CAPEX) y gastos operativos (OPEX). En este sentido, es importante señalar que las soluciones de extensión de la red móvil establecidas en la literatura suelen tener menores costos de operación e implementación que la instalación de una BS [16], lo que las hace altamente competitivas, ya que logran el mismo objetivo con un menor valor de inversión. De esta manera, un modelo de negocio de hardware como servicio (HaaS) con una solución que logre mejorar la QoS para los usuarios en lugares donde el proveedor no puede llegar, no solo es un argumento de mercado en sí mismo, sino que también constituye una oportunidad para transformar el mismo mercado hacia oportunidades de crecimiento y rentabilidad, máxime en un contexto en el que se concibe la viabilidad de Smart Cities, Internet de las cosas (IoT), conducción autónoma, Inteligencia Artificial, Industria 4.0, entre otras [1].

Al identificar una grieta en el servicio de las ORM, una solución de extensión de la red móvil también puede ofrecer a varias organizaciones que posean edificaciones robustas una oportunidad para invertir en su capital reputacional. Es decir, es favorable para las empresas la posesión de una infraestructura de red móvil suplementaria a la ofrecida por las ORM frente al cliente, ya que la existencia de servicios de calidad se vuelve un aspecto atractivo y competitivo ante a la competencia. No solo esto, dicha infraestructura de extensión de

señal, en otro tipo de negocios, como los de tipo industrial, podría significar el bloque inicial para mejorar la eficiencia de sus procesos. Ejemplos de estos casos de uso pueden ser hoteles, universidades, conjuntos residenciales a la venta e incluso domicilios habitados. En el mercado internacional dicho modelo de negocio representa un nicho de mercado y existen diferentes soluciones que apuntan a la solución de la problemática presentada en [25] [26] y [27].

Finalmente, hablando de la viabilidad de este proyecto, se cuenta con la disponibilidad de equipos de préstamo en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali como: analizadores de espectro portátiles y estáticos, licencias de Matlab y Office. Adicionalmente, se cuenta con recursos propios como apoyo financiero, computadoras para el desarrollo, acceso a software de código abierto como Python, entre otros. Así mismo, se cuenta con el acceso a los recursos teóricos y metodológicos que ofrece la universidad y las asesorías del director de proyecto de grado. De esta manera, se asume factible la conclusión del proyecto en el tiempo de un año.

2.4 Delimitaciones y Alcances

El desarrollo de este proyecto está limitado por el cumplimiento de la implementación de las redes 5G NSA y 5G SA por parte de las operadoras de red móvil en la ciudad, el tiempo máximo de entrega del trabajo de grado, la organización del espectro impuesta por la agencia nacional del espectro (ANE) para 5G, de acuerdo con el cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencias [28], las normativas vigentes sobre permisos de uso del espectro y la limitante presupuestal. Luego, en cuanto al alcance del proyecto, este trabajo se compone por cinco puntos fundamentales que son la investigación, concepción, diseño, implementación y pruebas de una solución de extensión de la red móvil, basado en las necesidades de un posible cliente para los sitios mencionados anteriormente. El alcance de este proyecto está concretizado en los permisos otorgados en los sitios mencionados y la dimensión física concreta de las zonas en las que se implemente el equipo. Por otra parte, se exploran las posibilidades de crecimiento de esta solución y el mejoramiento de los modelos de propagación en interiores para este tipo de proyectos en el futuro.

2.4.1 Entregables

2.4.1.1 E1

Diagrama del diseño dispuesto para la solución del problema.

2.4.1.2 E2

Una instancia de la solución implementada en un sitio con beneficiarios reales.

2.4.1.3 E3

Resultado de las pruebas finales.

2.4.1.4 E5

Modelo de propagación ajustado al contexto.

2.4.1.5 E4

Documento con formato de artículo científico con la documentación del proyecto.

Desarrollo del Proyecto

3.1 Marco de referencia

En los siguientes apartados se sitúa al proyecto en algunas áreas temáticas de IEEE, se referencian los fundamentos teóricos alrededor de los dispositivos de extensión de la red móvil y se termina por relacionar trabajos que han aportado al avance en este sector del conocimiento.

3.1.1 Áreas temáticas

- *Communications technology - Mobile communication*
- *Communications technology - 5G mobile communication*
- *Communications technology - Mobile nodes*

3.1.2 Marco Teórico

3.1.2.1 Conceptos esenciales de los sistemas de comunicación inalámbricos

Algunos conceptos básicos necesarios para este proyecto se describen a continuación, concretamente en el aspecto de los sistemas de comunicación inalámbricos.

3.1.2.1.1 Direccionalidad de los sistemas de Comunicación

Los sistemas de telecomunicaciones se pueden clasificar en la direccionalidad de sus transmisiones. De este modo, vale aclarar que, en el contexto de las comunicaciones móviles, solo se profundiza el modo full dúplex, el cual se explicará a continuación.

3.1.2.1.1.1 Simplex

En la transmisión simplex, la comunicación ocurre en una sola dirección, desde un dispositivo de origen hacia un dispositivo de destino. Un ejemplo de esta comunicación es la radio.

3.1.2.1.1.2 Half-dúplex

En la transmisión *half-duplex*, la comunicación puede ocurrir en ambas direcciones, pero no simultáneamente. En un momento dado, un dispositivo actúa como el transmisor y el otro como el receptor. Un esquema que se podría considerar *half-duplex* es las comunicaciones por *walkie-talkie*.

3.1.2.1.1.3 Full-dúplex

En la transmisión full-duplex, la comunicación ocurre en ambas direcciones simultáneamente. Cada dispositivo puede transmitir y recibir datos al mismo tiempo. Este es el caso específico de las comunicaciones móviles, debido a que debe existir una constante transmisión de datos entre la BS y el UE para poder ofrecer correctamente los servicios al usuario.

Cabe resaltar que la solución que este proyecto pretende se debe clasificar bajo el esquema full-dúplex.

3.1.2.1.1.3.1 Dúplex por división de tiempo (TDD, por sus siglas en inglés)

Esta clasificación de los sistemas de transmisión no es técnicamente una técnica de full-dúplex, debido a que existe una conmutación entre las transmisiones, sin embargo, el proceso es tan rápido que no se alcanza a percibir la espera entre cada transmisión. De este modo, se puede afirmar que se considera a TDD full-dúplex, debido a su alta velocidad de conmutación, haciendo que pueda emular correctamente dicho tipo de transmisión.

De acuerdo con lo expuesto por 3GPP en [29] este método dúplex utiliza la misma frecuencia para el canal de subida y bajada, sin embargo, cada transmisión tiene su tiempo, implicando que el sistema debe estar sincronizado correctamente. También es importante tener en cuenta que existen tiempos de guarda para que el remanente de una señal no afecte a la siguiente.

3.1.2.1.1.3.2 Dúplex por división de frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés)

De acuerdo con lo expuesto por 3GPP [29], FDD “es un método dúplex en el que las transmisiones de enlace ascendente y descendente utilizan dos bandas de frecuencia separadas”. De esta manera el sistema usa una banda para el enlace de subida y el otro enlace de bajada. Siempre existe una banda de guarda entre los dos canales, para otorgar correcta separación y evitar interferencias.

3.1.2.2 Modulación digital

La modulación es una técnica fundamental utilizada en comunicaciones inalámbricas que cumple la función de adaptar una señal con información para poder ser irradiada al medio. Esta técnica es el bloque central de funcionamiento de cualquier sistema de telecomunicaciones. Concretamente su adjetivo digital, hace referencia a que la información está empaquetada y codificada siguiendo sistemas de lenguaje basados en el sistema numérico binario. Los esquemas avanzados que utiliza la modulación digital mejoran la eficiencia espectral, resistencia al ruido y capacidad de transmisión en comparación con las técnicas de modulación analógica.

De acuerdo con [30], siempre la señal transmitida es una señal continua, en la cual se empaquetan los dígitos binarios que son representados a través de la variación de los parámetros de fase y/o amplitud de la señal portadora. De este modo, se citan dos vertientes de la modulación digital que son comúnmente usados en comunicaciones móviles:

- Codificación por Cambio de Fase (PSK, por sus siglas en inglés): en esta modulación se ve modificada únicamente la fase de la señal para representar los bits.
- Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, por sus siglas en inglés): es una combinación entre la modulación de fase y de amplitud, sin embargo, esta tiene la misma eficiencia espectral y mejor eficiencia de potencia que PSK.

3.1.2.2.1 Esquemas de modulación

3.1.2.2.1.1 Codificación por Cambio de Fase Binario (BPSK, por sus siglas en inglés)

En BPSK, dos fases de la onda portadora se utilizan para representar los dos posibles valores binarios (0 y 1). Esto hace que BPSK sea simple y robusto, siendo adecuado para aplicaciones en las que se necesita una buena tolerancia al ruido. En la figura 1 se muestra una representación de este tipo de codificación.

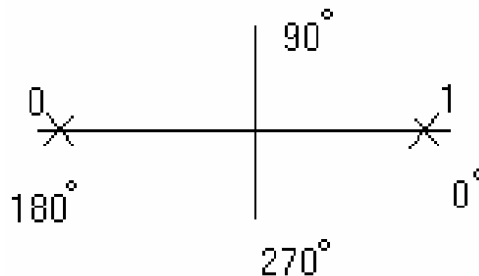


Figura 1. Diagrama de fase de los valores binarios de BPSK, extraído de [30].

3.1.2.2.1.2 Modulación en cuadratura por desplazamiento de fase (QPSK, por sus siglas en inglés)

QPSK es una variación de la modulación PSK en la que se transmiten dos bits de datos por cada símbolo. Esto se logra al usar cuatro fases de la onda portadora, permitiendo así representar cuatro combinaciones de bits (00, 01, 10, 11) [30]. QPSK es ampliamente utilizado en sistemas de comunicación modernos debido a su eficiencia espectral mejorada en comparación con BPSK. Se muestra en la figura 2 la forma de constelación BPSK.

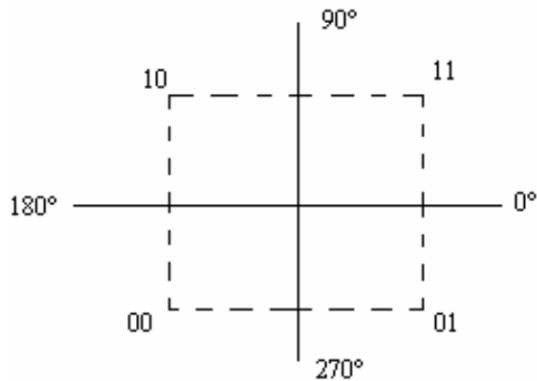


Figura 2. Constelación QPSK. Extraído de [30].

3.1.2.2.1.3 16-QAM

16-QAM es una forma de modulación de amplitud en cuadratura que permite la transmisión de cuatro bits por símbolo, utilizando una combinación de amplitud y fase. Con 16 símbolos únicos en una constelación, como se ve en la figura 3, 16-QAM es capaz de transmitir una mayor cantidad de información en comparación con BPSK y QPSK. Sin embargo, 16-QAM es más sensible al ruido y a las distorsiones del canal.

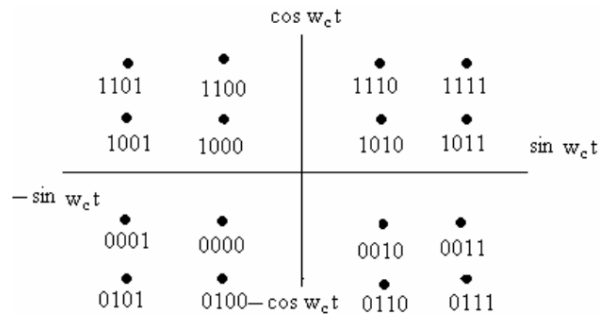


Figura 3. Constelación de 16 QAM, extraído de [30].

3.1.2.2.2 Técnicas de Transmisión Múltiple y de Acceso Múltiple al Medio

Las técnicas de transmisión múltiple o modulaciones multiportadora son técnicas de aprovechamiento del espectro que cumplen la función de efectuar más de una comunicación sobre un recurso limitado, ya sea de frecuencia o tiempo. Así, dependiendo del recurso que se distribuya, la técnica se podrá denominar multiplexación en frecuencia o multiplexación en el tiempo. Estas técnicas permiten que múltiples usuarios se conecten de manera simultánea a un recurso limitado concreto. Normalmente estas técnicas de acceso se basan en las técnicas de transmisión múltiple [31].

3.1.2.2.2.1 Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, por sus siglas en inglés)

OFDM es un esquema de modulación múltiple en el que se dividen los flujos de símbolos entre diferentes portadoras ortogonales. Así, este esquema permite fundamentalmente que varios mensajes puedan ser enviados en un mismo paquete de frecuencias sin que surjan interferencias entre símbolos [32]. Esta técnica de transmisión multiportadora permite la transmisión de datos a través de una combinación de señales de banda estrecha ortogonales, conocidas como subportadoras. Es más robusta ante el desvanecimiento selectivo en frecuencia, simplifica la ecualización en el receptor, facilita el uso compartido de recursos y se adapta bien a los sistemas MIMO y MIMO masivo [33]. Además, cada portadora puede estar modulada con PSK o QAM.

Por otra parte, como afirma [32], “OFDM también puede ser utilizada como una técnica de acceso al medio compartido, en cuyo caso se denomina OFDMA”. Esto quiere decir que la técnica de multitransmisión OFDM se adapta como una técnica de acceso al medio para gestionar, en el contexto de las comunicaciones móviles, el ingreso de múltiples UE al recurso de frecuencia.

3.1.2.2.1.1 Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA, por sus siglas en inglés)

OFDMA es una técnica de acceso al medio que se vale de la modulación OFDM para permitir un uso eficiente de las bandas de frecuencia. Esta divide el espectro en múltiples subportadoras ortogonales para repartirlas entre distintos dispositivos. Además, es flexible y se adapta a las disponibilidades de los recursos de tiempo y frecuencia, mejorando la eficiencia espectral [34].

3.1.2.2.1.2 Acceso Múltiple por División de Frecuencias de Portadora Única (SC-FDMA, por sus siglas en inglés)

SC-FDMA es una técnica de acceso múltiple ampliamente utilizada en sistemas de comunicaciones inalámbricas de tipo móvil como LTE. Esta técnica se caracteriza por dividir el ancho de banda disponible en múltiples subportadoras, cada una de las cuales se asigna a usuarios individuales para la transmisión de datos. A diferencia de otras técnicas de acceso múltiple, SC-FDMA opera únicamente en la portadora de frecuencia asignada al usuario, lo que la hace eficiente energéticamente. Esta se puede considerar como una versión precodificada de OFDMA, debido a que su esquema incluye una transformada de Fourier discreta que distribuye los símbolos del mensaje a lo largo de la subportadora asignada a dicho mensaje [31].

3.1.2.3 El sistema de comunicaciones móviles

Desde una perspectiva general, el sistema de comunicación móvil tiene la función de entregar servicios como llamadas telefónicas, mensajería (SMS) y acceso a Internet para los usuarios. Este se compone incluyendo los dispositivos móviles y se conecta de manera completamente inalámbrica. Además, tiene la particularidad de cubrir áreas grandes, por lo que se puede categorizar como una red inalámbrica de área amplia (WWAN).

La cobertura de amplias áreas por parte de este sistema se compone por celdas. Estas unidades fundamentales del sistema se encargan de conectar el UE a los servicios que la ORM ofrece, pero también gestionan la conmutación de la conexión en medio del movimiento del UE. El elemento central de dichas celdas son las BS, las cuales se componen a su vez por la Red de Acceso por Radiofrecuencia (RAN) y también por la Red Nuclear (CN). A continuación, se muestra la estructura de celdas del sistema de red móvil (figura 4).

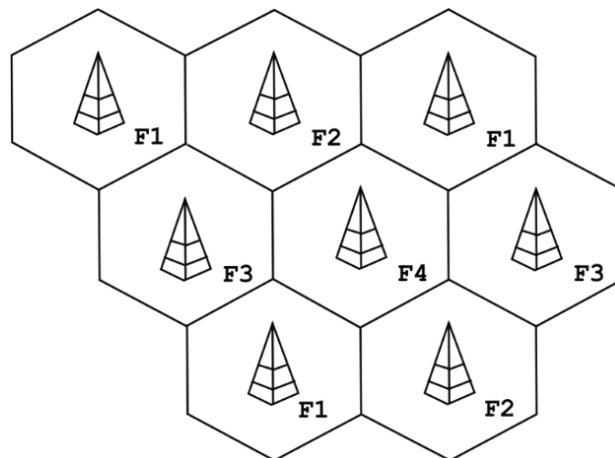


Figura 4. Distribución de celdas en una red móvil, extraído de [35].

El esquema general del sistema, como se menciona anteriormente, se compone por tres elementos fundamentales, los cuales son el UE la RAN y la CN. En la figura 5 se muestra el diagrama general del sistema de red móvil. Cabe mencionar que se usa gNB o eNB para hacer referencia a la BS para 5G y 4G, respectivamente.



Figura 5. Estructura general de una red móvil 5G, extraído de [36].

3.1.2.3.1 Indicadores de señal

Los indicadores de señal para 4G y 5G son diferentes a únicamente medir la potencia del canal de radiofrecuencia donde se encuentra la señal. A continuación, se definen los parámetros de calidad de señal 4G LTE, de acuerdo con lo establecido en [37] y [38]. Estos parámetros son los descritos en la tabla 1.

Estado	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Excelente	> -65	> -84	> -5	> 12.5
Bueno	-65 a -75	-85 a -102	-9 a -5	10 a 12.5
Medio	-75 a -85	-103 a -111	-12 a -9	7 a 10
Pobre	< -85	< -111	< -12	< 7

Tabla 1. Niveles de Calidad de Señal, extraído de [37] [38].

Ahora, se definen cada uno de los indicadores, según [37] y [38]:

1. **Indicador de Potencia de Señal Recibida (RSSI):** es la potencia en dBm de la señal, tiene en cuenta la potencia que emiten todas las BS, el ruido y la interferencia.
2. **Potencia Recibida de la Señal de Referencia (RSRP):** es la potencia recibida promedio de la Señal de Referencia del canal elegido para la comunicación.
3. **Calidad Recibida de la Señal de Referencia (RSRQ):** es una métrica que indica la calidad de la Señal de Referencia del canal elegido para la comunicación.
4. **Relación Señal Ruido de la Señal de Referencia (SINR/SNR/RSSNR):** es la relación señal ruido de la Señal de Referencia del canal elegido para la comunicación.

Todos estos parámetros son calculados automáticamente por los UE, por lo que es importante adquirir los datos directamente de este.

3.1.2.3.2 Breve Evolución e Impacto de las Redes Móviles

La evolución de las redes móviles ha sido impulsada por la creciente demanda, mejorando continuamente la QoS, la velocidad y la capacidad de datos. La 1G (1980s) introdujo servicios analógicos de voz, la 2G (1990s) digitalizó las comunicaciones y añadió SMS, mientras que 3G (2000s) marcó un cambio al ofrecer videollamadas y acceso inicial a Internet, democratizando el consumo de multimedia y redes sociales [39]. La 4G (2010s) aceleró la conectividad enfocándose en datos y banda ancha, dejando las llamadas como secundarias, integradas en VoLTE [7]. Finalmente, 5G (2020s) impulsa tecnologías avanzadas como IoT, inteligencia artificial y conducción autónoma, superando incluso redes cableadas y consolidando su impacto en la industria y los negocios digitales.

3.1.2.3.3 Red de acceso por radiofrecuencia (RAN)

La RAN es la parte del sistema de red móvil encargado de efectuar la conexión inalámbrica del UE con la CN y está mutua e íntimamente relacionada con el uso del espectro electromagnético. En consecuencia, la RAN tiene un aspecto regulatorio que recae en la gestión Estatal y el aspecto técnico que recae en 3GPP.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) lanzó en febrero de 2021 la primera edición del estándar de 5G, IMT-2020, con el lanzamiento ITU-R M.2150 [40], en el cual se establecen las recomendaciones para la implementación de las redes de acceso por radiofrecuencia para 5G en términos del uso del espectro. Estas recomendaciones, al no tener fuerza de ley internacional, no necesariamente deben ser acogidas por las naciones. Sin embargo, hay 193 naciones miembros de la Organización de Naciones Unidas (ONU) que se acogen a los lineamientos de ITU [41], como es el caso de Colombia [28].

Desde otra perspectiva, como señala [42], los aspectos no relacionados con el uso del medio electromagnético para la RAN se delegan a 3GPP y sus miembros. Dichos aspectos tienen que ver con los detalles técnicos de control de acceso al medio, direccionamiento, protocolos de comunicaciones, arquitectura de la red, entre otros. A continuación, se realiza una exploración de dichos aspectos relacionados a la RAN separados por las generaciones actuales, 4G y 5G.

3.1.2.3.3.1 Red Universal Evolucionada de Acceso Radioeléctrico Terrestre (E-UTRAN)

La E-UTRAN es la RAN diseñada por 3GPP para 4G y permite la conexión entre los UE y la CN de 4G (EPC). 3GPP establece el uso del esquema OFDMA para el enlace descendente y SC-FDM para el enlace ascendente para E-UTRAN. Ambos enlaces soportan TDD y FDD [43]. Esta red está compuesta por BS 4G (eNB), las interfaces de conexión alámbrica e inalámbrica. En la figura 6 se muestran las interfaces básicas de E-UTRAN para conectar eNB entre sí y con EPC [43].

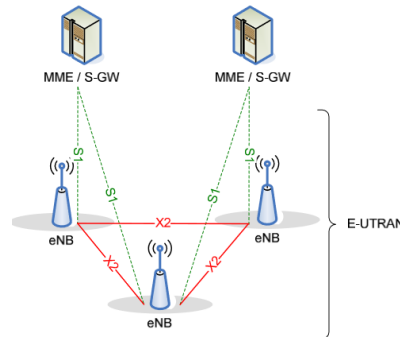


Figura 6. Arquitectura de E-UTRAN, extraído de [43].

3.1.2.3.3.2 New Radio (NR)

La RAN de 5G es denominada Nueva Radio, desde el inglés (NR). Esta ha sido pensada por 3GPP para ser flexible, escalable y lo suficientemente potente para suplir los requerimientos que ITU establece para las comunicaciones de quinta generación: banda ancha móvil mejorada (eMBB), comunicaciones ultra confiables de ultra baja latencia (URLLC) e Internet de las Cosas Masivo (MIoT) [44], entre otras. Esta red de acceso está pensada para soportar arreglos de antenas de gran escala con tecnología MIMO-masivo, para mejorar la cobertura y la capacidad de la red [44]. Adicionalmente, está preparada para trabajar en un amplio rango de frecuencias compuestos por los espectros FR1 (sub-6 GHz) y FR2 (mmWave).

De acuerdo con 3GPP en [45], las RAN NR están habilitadas para permitir la “Compatibilidad Directa” (*Forward Compatibility*, FC, en inglés). Este esquema permite que NR se suplemente con la tecnología E-UTRAN preexistente en medio de su lanzamiento, con el fin de lograr una transición suave. De esta manera el usuario percibe un servicio continuo. En otras palabras, FC permite un esquema de doble tecnología que permite

que el usuario disfrute de las nuevas capacidades que ofrece 5G, sin que necesariamente las ORM hayan tenido que desplegar infraestructura nueva.

3.1.2.3.3.2.1 Capa física de NR

La capa física de 5G New Radio utiliza OFDMA como su método de acceso al medio, en el UL y el DL, con diferentes opciones de separación entre subportadoras y prefijo cíclico para adaptarse a distintos escenarios con requisitos de latencia específicos. Es decir, esto es lo que permite el uso de un rango de frecuencias amplio para atender necesidades específicas. Soporta la planificación dinámica de los recursos en UL y DL, mediante el uso de una estructura de cuadrícula de recursos flexible que permite asignar diferentes tamaños y duraciones a los bloques temporales/frecuenciales a diferentes usuarios y servicios. Y, por último, es compatible con diferentes tipos de señales y canales para facilitar la sincronización, el acceso aleatorio, la información de estado del canal, la demodulación, la señalización y la difusión, la coexistencia y la interoperabilidad con otras tecnologías de interfaz radioeléctrica [46].

3.1.2.3.4 Red Núcleo de la red móvil (CN)

La red núcleo es aquella que se encarga de gestionar el control de la RAN y la comunicación directa del UE con los servicios finales de usuario. Entre estas se puede encontrar la selección de torre transmisora cuando el UE está en movimiento, autenticar al usuario, verificar los beneficios que tiene contratados, medir parámetros de QoS de la red y gestionar el acceso a Internet, entre otras. En un sentido general, las CN se pueden dividir en dos partes principales: el plano de control y el plano de datos. Además, son la parte escondida de la red de cara al usuario.

3.1.2.3.4.1 Evolved Packet Core (EPC)

EPC es la red núcleo de 4G y es la primera CN del sistema de comunicaciones móviles basada totalmente en el Protocolo de Internet Version 4 (IPv4). Esto permite una conexión eficiente y organizada de los dispositivos móviles con los diferentes servicios ofrecidos por la ORM como el acceso a Internet, mensajería y llamadas telefónicas. Algunas de las ventajas de utilizar IPv4 en EPC tienen que ver con aspectos de integración con otras tecnologías de acceso al medio como 3G UMTS, WiFi, WiMAX, entre otras [47]. Algunas de sus funciones principales son la Entidad de Gestión de Movilidad (MME), el Servidor Local de Suscriptores (HSS), la Puerta de Enlace de Servicio (SGW) y la Puerta de Enlace de Paquetes de Datos (PGW) [48]. Estos elementos le permiten a la red controlar la conexión del UE en movimiento, verificar el estado de suscripción del usuario, permitir el acceso a los servicios de la ORM y permitir el acceso a internet, respectivamente. En la figura 7 se puede observar una arquitectura completa de EPC, en la cual el dispositivo puede acceder a los servicios de red móvil a través de otras RAT, véase que numerosos bloques que tienen funciones del plano de control, se interconectan con otros que poseen funciones del plano de datos.

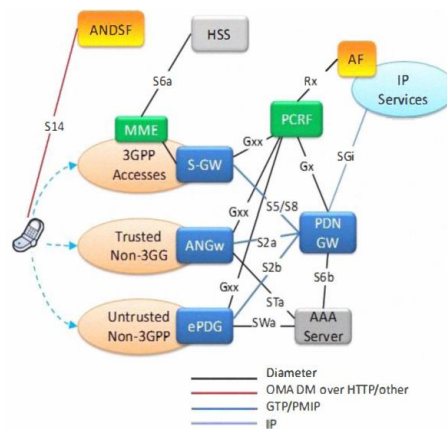


Figura 7. Arquitectura de EPC, extraído de [47].

Un problema de EPC es que el plano de control y el plano de datos están delimitados, pero físicamente interconectados [47], es decir, estos planos no están totalmente separados, como indica [49]. Esto supone una limitación para 4G, debido a que las comunicaciones locales entre UEs generan tráfico de extremo a extremo, y la interconexión física entre servicios de control y datos genera diversas limitantes. Esto implica que sacar el mayor provecho a cada plano se hace inviable, ya que, al tener cada uno parámetros de QoS distintos, se crea una dicotomía técnica pues el plano de control requiere bajas latencias, pero el plano de datos alto ancho de banda.

3.1.2.3.4.2 Núcleo de Nueva Generación (5GCN, 5GC, NGC)

5GC consta de un despliegue de diseño que busca superar las limitantes que existen en la arquitectura de EPC, a favor de una evolución enfocada en optimizar, descentralizar y diversificar. Esta red busca optimizar sustancialmente los procesos internos de gestión de control y flujo de datos para poder entregar al usuario el mejor servicio posible. Se descentraliza, valiéndose del uso de SDR y la Virtualización de Funciones de Red (NFV) para separar las funciones del plano control de las del plano de datos. Y, finalmente, diversifica sus accesos al compatibilizarse con otras Tecnologías de Acceso por Radiofrecuencia (RAT), logrando así un paradigma de núcleo convergente que pretende cumplir a cabalidad los requerimientos de ITU [50].

5GC realiza la separación entre el plano de control y el de datos, usando técnicas de NFV y SDR, logrando descentralizar las funciones de control en centros de datos alojados redundantemente en la nube. Así, la disponibilidad aumenta y la latencia disminuye, fortaleciendo la disponibilidad del servicio. Por otra parte, ya que se le entregaría el nivel de QoS adecuado a cada plano, se puede optimizar de la mejor manera el tráfico, superando los problemas de EPC. Ahora, desde el aspecto económico, estas técnicas son beneficiosas, debido a que minimizan notablemente los CAPEX, haciéndolas altamente atractivas para las ORM [49].

Uno de los aspectos más importantes de 5GC es la posibilidad de acceso a través de múltiples RAT. De acuerdo con lo establecido en la *Release 16* de 3GPP, 5GC soporta la conexión con UE a través de redes de acceso no-3GPP [51]. Por ello, se puede afirmar que 5GC es totalmente agnóstica a la RAT que el UE utilice para acceder a sus servicios. Entonces, sin importar si la conexión viene de un punto de acceso WiFi, una gNB o una eNB, el usuario podrá disfrutar de un servicio continuo [50].

3.1.2.4 Etapas de 5G (NSA a SA)

La transición a la nueva generación contempla dos pasos importantes que se definen como *5G Non-Standalone* (NSA) y *5G Standalone* (SA), en los cuales se involucran las RAN y CN de 5G y 4G. Su objetivo principal es permitir que las ORM puedan lograr una transición exitosa a las nuevas tecnologías sin afectar al usuario en el proceso. ITU establece que “para facilitar una transición suave entre 4G LTE y 5G NR, el estándar de 5G ofrece la posibilidad de adaptarse a implementaciones existentes LTE y compartir el hoy espectro de uso exclusivo para 4G” [42]. Desde el aspecto técnico, dicho esquema transitorio permite mantener ambas tecnologías funcionando de manera paralela. La estructura se establece en las dos fases mencionadas: NSA y SA. De acuerdo con [52], NSA se refiere al uso de ambas tecnologías, dependiendo de parámetros de QoS o disponibilidad de tecnología. Por otro lado, SA hace referencia a un entorno en el que ha desaparecido totalmente cualquier vestigio de la red 4G, por lo que el UE solo encontrará disponibilidad de la red 5G. En la imagen a continuación (figura 8) se muestra el proceso de transición de NSA a SA.

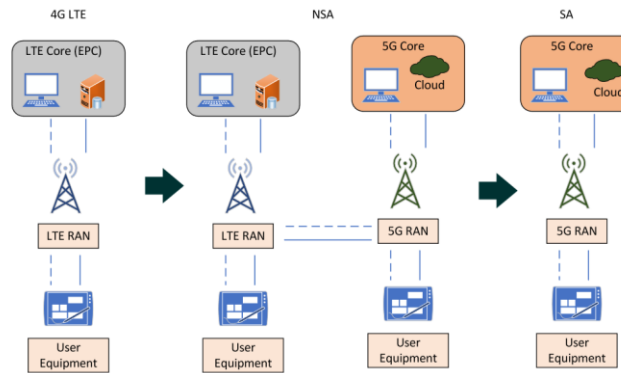


Figura 8. Proceso de transición NSA a SA, tomado de [52].

3.1.2.5 Parámetros de QoS de la Red Móvil

Los parámetros de QoS dependen íntimamente del tipo de red de comunicaciones en la que se está trabajando y su contexto de aplicación. Los indicadores que muestran el estado la red dependen de la función principal de la última. No solo esto, los sistemas de QoS implican un entendimiento profundo del proceso en el que se implementan, hasta el punto de considerar indicadores subjetivos relacionados a la experiencia de usuario. Así, los parámetros de QoS se pueden clasificar como cuantitativos y cualitativos.

En el contexto de las redes 5G orientadas al usuario, la QoS está supeditada al concepto de URLLC, que al ser una especificación muy amplia, de acuerdo con [15], es necesario que 3GPP establezca concretamente las especificaciones técnicas de QoS en diferentes casos de uso. A continuación, se muestra la caracterización de la QoS para servicios 5G SA (tabla 2).

Escenario	Velocidad DL	Velocidad UL	Densidad de usuarios	Velocidad de movimiento UE
AP de interior	1 Gbps	500 Mbps	250 m2	Peatón
Urbano Denso	300 Mbps	50 Mbps	10 m2	Vehículos en ciudad
Urbano Macro	50 Mbps	25 Mbps	10 m2	Vehículos en carretera

Tabla 2. QoS para casos de uso 5G SA, extraído de [15].

3.1.2.6 Problemáticas de Radio Propagación en la Práctica

La propagación de las ondas electromagnéticas es afectada por una serie de efectos físicos que se deben tener en cuenta, dependiendo de la implementación a realizar. Por lo general los parámetros de la señal radioeléctrica que se ven afectados son la fase, potencia y/o forma de onda de la señal. Algunos de estos efectos físicos se exponen a continuación.

3.1.2.6.1 Atenuación por naturaleza de propagación

Uno de los efectos fundamentales que sufre una OEM es su naturaleza de propagación en el espacio libre, la cual es dependiente de la distancia. Esta naturaleza consiste en la atenuación que sufre una señal ideal en su camino entre una antena transmisora omnidireccional ideal hacia un receptor puntual, atravesando un medio sin pérdidas como el vacío. Este efecto es fundamental para entender la dinámica de las señales radioeléctricas en la práctica.

De acuerdo con ITU en su recomendación P.525-2 [53], existen dos casos prácticos, en los que tener en cuenta la pérdida por naturaleza de propagación es suficiente para dimensionar los sistemas a implementar. Dichos casos son los enlaces punto a punto y enlaces punto a zona. Para lograr mayor exactitud en el dimensionamiento es necesario, aún, añadir efectos de pérdidas a la dinámica de la señal. Dichos efectos se explican a continuación.

3.1.2.6.2 Propagación Multitrayecto

La propagación multitrayecto es un efecto en el que la señal radioeléctrica llega al receptor objetivo a través de varios caminos. Esto significa que el receptor recibe varias versiones de la misma señal con diferentes valores de fase, lo que disminuye la calidad de la comunicación. Además, este efecto tiende a ser uno de los factores más importantes en pérdidas de la señal. De acuerdo con ITU [54], “la propagación multitrayecto es el factor dominante del desvanecimiento por debajo de 10 GHz.”

Las medidas preventivas contra los efectos de distorsión de la propagación multitrayecto son las denominadas “técnicas de diversidad y ecualizadores adaptativos de canal, que tratan de corregir las atenuaciones y distorsiones probadas por el medio de propagación” [54].

3.1.2.6.3 Atenuación por Interferencia Radioeléctrica

La atenuación por interferencia radioeléctrica es un efecto nocivo que consta de la modificación de la energía de una señal transmitida, a causa otras fuentes de señal como, por ejemplo, otras comunicaciones, tormentas solares, máquinas industriales de alta frecuencia o combinaciones de estas, entre otras. Algunos de los efectos de dicha atenuación son la interrupción de servicios, bloqueo de la comunicación, alteración de la información o degradación de la QoS [55]. Este efecto es perjudicial para las radiocomunicaciones y es uno de los principales focos de atención de ITU como ente regulador. En la práctica es imposible no tener interferencias, por lo que se clasifica en tres tipos: interferencia admisible, interferencia aceptable e interferencia perjudicial.

3.1.2.6.4 Atenuación por interacción con el entorno

La atenuación que sufre una señal al interactuar con el entorno es significativa y es el foco principal de los diferentes modelos de propagación existentes. En este sentido, en un contexto de comunicaciones punto-zona, como las comunicaciones móviles, existen diversas situaciones en las que se evidencia un efecto “hueco” en la cobertura de la señal, debido a la incidencia que los diferentes objetos del ambiente presentan sobre la onda [16]. Por ello, ITU define algunos casos prácticos en los que la señal de radiocomunicación puede sufrir atenuación por su interacción con el entorno. Dichos casos se describen a continuación.

3.1.2.6.4.1 Atenuación por vegetación

La atenuación por vegetación es una problemática para tener en cuenta en el contexto de Colombia, ya que se trata de un entorno altamente biodiverso y posee vegetación de todo tipo en la mayoría de sus territorios. Por ello, tener en cuenta esta fuente de atenuación puede posibilitar la mejor planeación de todo tipo de comunicaciones ya sea punto a punto, punto a zona o espacio a tierra. Sin embargo, establecer un modelo general se hace inviable debido a la variedad de follaje y flora que existe. Por ello, ITU en su recomendación P.833-3 [56] establece modelos de atenuación, basados en efectos de dispersión, que, a pesar de no permitir una respuesta determinista, ofrecen una aproximación más detallada al problema.

3.1.2.6.4.2 Atenuación por gases atmosféricos

La atenuación causada por gases atmosféricos es un efecto implícito en el canal de comunicaciones en la práctica, ya que el medio suele estar compuesto complejas combinaciones de materia en estado gaseoso que afectan a la señal radioeléctrica. Esta atenuación está descrita en la recomendación Rec. ITU-R P.676-6 [57]. Es importante tener este efecto en cuenta, debido a que los gases atmosféricos pueden afectar de manera significativa a la señal, sobre todo en altas frecuencias.

3.1.2.6.4.3 Atenuación por ubicación en interiores

Las atenuaciones de la señal en los interiores de las edificaciones suelen ser considerables y pueden depender de diferentes parámetros como los materiales de construcción de la edificación, la polarización de la señal, el ángulo de incidencia la onda sobre dicho material y la frecuencia de la portadora.

En primera instancia, las señales en FR1 que 5G NSA usa, sufren pérdidas por diversas razones que deterioran su calidad. Como se observa en [18], García cita diversos estudios que indican que las señales con portadoras en FR1 (3.5 GHz) sufren atenuaciones que pueden aumentar hasta los 20-30 dB al intentar atravesar

edificaciones construidas con materiales modernos. En este sentido, los usuarios que se encuentren en el interior de una edificación que tenga problemas de cobertura, percibirán una calidad de señal inferior con la llegada de las nuevas tecnologías. Dicho artículo concluye que este panorama se puede ver incrementado con la variación del ángulo de incidencia de la señal sobre el material. De este modo, si las pérdidas que sufre la señal en condiciones ideales son altas, en la práctica pueden aumentar.

En segundo lugar, como señala [58], las señales en FR2 (28 GHz, en este estudio) sufren pérdidas de 40.1 dB, 28.3 dB, 3.9 dB, 6.4 dB al tratar de atravesar materiales como el vidrio tinturado, ladrillo, vidrio transparente y paredes interiores, respectivamente. Al observar las medidas, el estudio concluye que las transmisiones desde el exterior hacia el interior para señales en FR2 son inviables por las grandes pérdidas que sufre la señal. Sin embargo, expone que el uso de estas frecuencias en aplicaciones en solo exterior o interior es beneficiosa, debido a que la señal puede viajar sin mayor dificultad en un único entorno.

3.1.2.6.4.3.1 Modelos de radio propagación para interiores

Teniendo en cuenta lo expuesto, para planificar de la mejor manera los diferentes sistemas de comunicación, es importante tener modelos de propagación que entreguen información importante sobre el comportamiento de una onda irradiada en un contexto concreto.

Los modelos de radio propagación para interiores son modelos matemáticos que pretenden calcular la pérdida de potencia que sufre una señal dado un entorno determinado [59]. Estos se categorizan, entre otros, en modelos deterministas, empíricos y semiempíricos. Los primeros son modelos totalmente basados en las leyes de Maxwell, no tienen distribuciones de probabilidad, dependen únicamente de los valores de entrada del modelo e implican simulaciones altamente complejas computacionalmente. Los modelos empíricos son la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas reales, lo que reduce su complejidad computacional, pero los hace dependientes de medidas reales, por lo que el carácter de tener en cuenta de manera implícita los parámetros del entorno, los hace inflexibles en una eventual generalización. Y, finalmente, los semi-empíricos, los más comunes en la literatura, son modelos que ajustan una fórmula teórica que tiene en cuenta propiedades electromagnéticas del entorno, junto con medidas reales, lo que las hace flexibles y generalizables, sin embargo, requieren de bases de datos de medidas muy grandes que, en la práctica son casi imposibles de realizar por individuos.

Ahora, existe una clasificación que separa los modelos, dependiendo de su entorno. Estos modelos se enfocan en estudiar y predecir el comportamiento de las ondas electromagnéticas en interiores como casas, oficinas, museos, universidades, entre otros. Estos modelos son útiles para dimensionar correctamente soluciones que ofrecen servicios de conectividad inalámbrica como WiFi, 4G o 5G.

3.1.2.6.4.3.1.1 Modelo de Pérdidas en el Espacio Libre (FSL)

El modelo fundacional de los modelos que se muestran a continuación es el modelo de pérdidas de propagación en el espacio libre. Este modelo proviene de una simplificación dada la similitud electromagnética que tiene el aire con el vacío y se aplica a otros múltiples modelos en todas las categorías. Además, depende principalmente de la frecuencia de la señal transmitida y la distancia transmisor-receptor. A continuación, se muestra la fórmula que describe la pérdida en el espacio libre en dB:

$$L_{FSL} = 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right) + 20 \log(f) + 20 \log(d)$$

Siendo:

- **c**: la velocidad de la luz en el vacío [**m/s**].
- **f**: la frecuencia de la señal transmitida [**Hz**].
- **d**: distancia entre transmisor y receptor [**m**].

3.1.2.6.4.3.1.2 Modelo Motley-Keenan (MKM)

Ahora, el modelo Motley-Keenan se plantea como un modelo semiempírico que trata la señal transmitida como un rayo emitido por un transmisor hasta varios puntos de recepción en el plano del interior de una edificación dada. Este trata de tener en cuenta la pérdida de potencia que sufre el rayo al atravesar paredes o pisos del edificio. La ventaja es que puede llegar a un alto nivel de precisión, sin un gran poder computacional. La desventaja es la falta de disponibilidad de bases de datos con medidas de los parámetros reales. A continuación, se describe el modelo como se encuentra en [60].

$$L_{MKM} = L_{FSL} + L_c + \sum_{i=1}^I N_{wi} L_{wi} + \sum_{j=1}^J N_{fj} L_{fj}$$

Siendo:

- L_c : pérdida constante del FSL en la distancia unitaria ($d_0 = 1\text{ m}$) [dB].
- N_{wi} : número de paredes del tipo i penetradas por el rayo directo.
- L_{wi} : pérdida aportada por la pared de tipo i [dB].
- N_{fj} : número de pisos de tipo j penetrados por el rayo directo.
- L_{fj} : pérdida aportada por el piso de tipo j [dB].
- I : número de tipos de pared.
- J : número de tipos de piso.

De acuerdo con [61], se pueden extraer diversos valores para las pérdidas de numerosos tipos de pared. A continuación, se muestra la pérdida de los diferentes tipos de pared (tabla 3).

Wall type	Nr. of Layers	Layer widths	Regression parameter [dB]
Brick	1	Brick - 6 cm	4.0
Brick	1	Brick - 10 cm	5.58
Brick	1	Brick - 12 cm	6.69
Brick+ Concrete	3	Brick - 6 cm Concrete - 20 cm Brick - 6 cm	11.8
Brick+ Concrete	3	Brick - 10 cm Concrete - 12 cm Brick - 10 cm	14.8
Brick+ Concrete	3	Brick - 6 cm Concrete - 10 cm Brick - 6 cm	9.3
Brick	1	Brick - 15 cm	8.47
Concrete	1	Concrete - 15 cm	6.56
Concrete	1	Concrete - 20 cm	8
Concrete	3	Concrete - 15 cm Air - 2 cm Concrete - 15 cm	12.47
Glass	3	Glass - 3 mm Air - 10 cm Glass - 3 mm	0
Plasterboard	1	Plasterboard - 5 cm	4.5
Wood	1	Wood - 6 cm	0.92
Wood	1	Wood - 10 cm	0.17

Tabla 3. Pérdidas de los diferentes tipos de pared, extraído de [61].

3.1.2.6.4.3.1.3 Modelo Multi-Wall (MWM)

El modelo Multi-Wall es un modelo empírico que simplifica el cálculo de la pérdida por pisos, respecto al Motley-Keenan. Además, de acuerdo con [62], con el fin de generalizarlo a la mayoría de los entornos posible, este modelo se simplifica para tener solo dos tipos de pared. La pared tipo 1 es una pared delgada (menos de 10 cm), ya sea de placas de yeso, tableros de conglomerado o paredes ligeras de hormigón; y la pared de tipo 2 es

una pared gruesa (más de 10 cm), ya sea de ladrillo u hormigón (tabla 4). De este modo, este modelo solo tiene un tipo de piso/techo y dos tipos de pared. La fórmula que describe este modelo es es la siguiente:

$$L_{MWM} = L_{FSL} + L_c + \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f^{\left[\frac{k_f+2}{k_f+1}b\right]} L_f$$

Siendo:

- **L_c**: pérdida constante del FSL en la distancia unitaria (d₀ = 1m) [**dB**].
- **k_{wi}**: número de paredes del tipo i penetradas por el rayo directo.
- **L_{wi}**: pérdida aportada por la pared de tipo i [**dB**].
- **k_f**: número de pisos penetrados por el rayo directo.
- **b**: parámetro empírico.
- **I**: número de tipos de pared.

Según lo expuesto en [62], los valores para estos parámetros son, dado I = 2:

Modelo Multi-Wall (MWM)	
Parámetros	Valores
Lw1 [dB]	3,4
Lw2 [dB]	6,9
Lf [dB]	18,3
b	0,46

Tabla 4. Valores del Modelo Multi-Wall, extraído de [62].

Otras fuentes como [63], establecen valores para diversos tipos de paredes. De esta manera se muestra en la tabla 5 la caracterización de diversos tipos de pared.

Nu.	Parameter	Attenuation Value (dB)
1.	Cubicle wall	2
2.	Wooden door	3
3.	Glass window	3
4.	Drywall or sheetrock	3
5.	Metal shelf	6
6.	Elevator or metal particles	10
7.	Brick, concrete, concrete block	12
8.	Ceramic Floor	13.2
9.	Foundation wall	15

Tabla 5. Tipos de pared para el MWM, extraído de [63].

3.1.2.6.4.3.1.4 ITU 1238

Este modelo semiempírico está profundamente basado en el modelo de propagación en el espacio libre, añadiendo la influencia de distintas características del entorno en interiores. Además, trata de ser general hasta el punto en que se pueda caracterizar un medio, dadas unas características cualitativas, por ejemplo: parámetros

para edificio de oficinas, entre otros. El modelo está descrito en la recomendación ITU-R 1238 [64] y se describe a continuación.

$$L_b(d, f) = 10\alpha \log(d) + \beta + 10\gamma \log(f)$$

Siendo:

- d : distancia directa entre transmisor y receptor [m].
- f : frecuencia de funcionamiento [GHz].
- α : coeficiente asociado al incremento de la pérdida de transmisión básica con la distancia.
- β : coeficiente asociado al valor de desplazamiento de la pérdida de transmisión básica
- γ : coeficiente asociado al incremento de la pérdida de transmisión básica con la frecuencia

En la tabla 6 con los valores asociados a la descripción del sitio:

Entorno	LoS/NLoS	Gama de frecuencias (GHz)	Gama de distancia (m)	α	β	γ	σ
Edificio de oficinas	LoS	0,3-83,5	2-27	1,46	34,62	2,03	3,76
	NLoS	0,3-82,0	4-30	2,46	29,53	2,38	5,04
Pasillo	LoS	0,3-83,5	2-160	1,63	28,12	2,25	4,07
	NLoS	0,625-83,5	4-94	2,77	29,27	2,48	7,63
Fábrica	LoS	0,625-70,28	2-102	2,34	24,26	2,06	2,67
	NLoS	0,625-70,28	5-110	3,66	22,42	1,34	9,00
Sala de conferencias/ponencias	LoS	0,625-82,0	2-21	1,61	28,82	2,37	3,28
	NLoS	7,075-82,0	4-25	2,07	28,13	2,67	3,67

Tabla 6. Parámetros para el modelo ITU, extraído de [64].

3.1.2.6.4.3.1.5 Motley Keenan Mejorado (I-MK)

Este modelo de propagación en interiores modificado, extraído de [65] y [66], tiene en cuenta un parámetro importante que no se tiene en consideración en los MKM o MWM, que es el ángulo de incidencia del rayo transmitido al atravesar las paredes. Esta consideración es importante, debido a que mejora sustancialmente el modelo y hace que se obtengan resultados más ajustados a la realidad, sin añadir sustancial complejidad computacional. Cabe aclarar que este modelo omite el atravesamiento de pisos del edificio y se ciñe únicamente a un solo piso del edificio dado. Por otra parte, se realiza una modificación matemática en el uso del modelo FSL en esta versión del MKM.

$$L_{I-MK} = L_c(d_0) + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - \sum_{i=1}^I \Gamma_i(\theta_i) + k_a$$

Siendo:

- Γ_i : coeficiente de transmisión para la pared que forma ángulo de inserción i-ésimo.
- θ_i : ángulo de incidencia i-ésimo del rayo directo.
- d : distancia entre transmisor y receptor.
- d_0 : distancia unitaria para la omisión del cálculo del campo cercano.
- α : parámetro empírico.
- L_c : FSL a la distancia unitaria.
- k_a : ganancia de ajuste, de propia añadidura para futuro ajuste.

Para este modelo se necesita acudir a la recomendación ITU-R 2040-1 [67], la cual establece unas pautas matemáticas que describen el comportamiento de las ondas planas al interactuar con una interfaz plana. A continuación, se muestra una tabla donde se caracterizan los materiales de construcción en sus propiedades electromagnéticas, de las cuales este modelo se vale para funcionar (tabla 7). Los parámetros y su relación con el coeficiente de transmisión se explican detalladamente en la recomendación citada.

Tipo de material	Parte real de la permitividad relativa		Conductividad S/m		Gama de frecuencias GHz
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
Vacío (\approx aire)	1	0	0	0	0,001-100
Hormigón	5,31	0	0,0326	0,8095	1-100
Ladrillo	3,75	0	0,038	0	1-10
Placa de yeso	2,94	0	0,0116	0,7076	1-100
Madera	1,99	0	0,0047	1,0718	0,001-100
Vidrio	6,27	0	0,0043	1,1925	0,1-100
Revestimiento de techos	1,50	0	0,0005	1,1634	1-100
Aglomerado	2,58	0	0,0217	0,7800	1-100
Revestimiento de suelos	3,66	0	0,0044	1,3515	50-100
Metal	1	0	10^7	0	1-100
Suelo muy seco	3	0	0,00015	2,52	1-10 sólo
Suelo medianamente seco	15	-0,1	0,035	1,63	1-10 sólo
Suelo húmedo	30	-0,4	0,15	1,30	1-10 sólo

Tabla 7. Tabla de caracterización de los materiales, extraído de [67].

3.1.2.7 Extensión de la red móvil

La extensión de la red móvil cubija una serie de técnicas que buscan hacer llegar la cobertura de red móvil a lugares donde el servicio es insuficiente o inexistente. Existen diversas maneras de clasificar estos equipos, como, por ejemplo, las basadas en el tipo de el enlace de retorno (*backhaul*) que usa el sistema o la cantidad de funciones del sistema ideal 3GPP que implementa. Estos equipos funcionan suplementando o reemplazando BS. Algunos nombres usados para estos son celdas pequeñas o nodos repetidores (*relay node*, RN).

Por otra parte, con la nueva filosofía HET-NET que trae 5G, otros dispositivos no-3GPP pueden cumplir con dicha categoría de extensión de la red, pero requieren una integración de alto nivel. Estos se clasifican simplemente como RAT no-3GPP y se exploran en esta sección.

3.1.2.7.1 Tecnologías 3GPP

3.1.2.7.1.1 Nodos Repetidores de Señal (RN)

Los RN son nodos inalámbricos que repiten la señal de una estación base y juegan el papel de intermediarios en el proceso de entrega del servicio al UE, siempre con un *backhaul* inalámbrico. Dependiendo de su clasificación, estos tendrán que recibir un mínimo de la señal de la BS para repetirla al UE [68]. Por lo general, estos sistemas son vistos por la BS como un UE, pero para el UE final este equipo luce como una BS, de modo que realizan la menor intervención en el proceso de comunicación. Existen diversas maneras de clasificar los RN dependiendo de las frecuencias del *backhaul* y el *fronthaul* [69], dependiendo de su esquema de comunicación e integración con la BS como dicta 3GPP en [70] y dependiendo de su pila de protocolos [70]. Sin embargo, se explica únicamente la tercera, debido a que es la más acertada al posible alcance de este proyecto.

3.1.2.7.1.1.1 Clasificación basada en la Pila de Protocolos

Una de las maneras más directas para clasificar los RN, de acuerdo con [70], es la clasificación de los dispositivos dependiendo de su pila de protocolos. En este sentido, los diferentes RN se pueden clasificar de acuerdo con la complejidad e intrusión en la repetición de la señal, como se describe a continuación.

3.1.2.7.1.1.1.1 Capa 1 (L1, Amplify-and-forward)

El RN L1 es denominado de Amplificación y Retransmisión (*Amplify-and-Forward*, A&F, según sus siglas en inglés). Este dispositivo no tiene ningún tipo de señales de control y puede ser totalmente analógico. Estos son comunes en el mercado por su efectividad y bajo costo. Además, no añaden mayor latencia a la comunicación por su característica analógica. Sin embargo, debido a que no limpian la señal, ni aplican ningún tipo de procesamiento digital sobre la misma, la QoS es menor en sitios apartados, con calidad de señal deteriorada.

Esta solución se compone de una conexión de retorno a la BS (*backhaul*) y una red inalámbrica de conexión con los UE (*fronthaul*) inalámbricos y un procesador que únicamente amplifica la señal en la banda especificada, de ahí su nombre. En términos económicos este sistema es el más barato y rápido, debido a que los amplificadores de señal de red móvil se encuentran disponibles a precios asequibles en el mercado, son de fácil fabricación y son los más rápidos de la clasificación. Estos equipos son usados en la mayoría de los contextos debido a su facilidad de adquisición, instalación y variedad en el mercado.

3.1.2.7.1.1.1.2 Capa 2 (L2, Decode-and-Forward)

El RN L2 se denomina de Decodificación y Retransmisión (*Decode-and-Forward*, D&F) y normalmente posee todas las funcionalidades MAC y algunas funciones de Control de Enlace de Radiofrecuencia. Esto implica que el dispositivo es digital y efectúa cierto procesamiento de la señal, añadiendo moderada latencia a la comunicación.

Esta solución al igual que la anterior se compone de un *backhaul* y *fronthaul* inalámbricos y un procesador que únicamente demodula, decodifica y modula la señal recibida, con el fin de eliminar cualquier tipo de ruido que esta posea. En términos económicos este sistema es más costoso, sofisticado y su velocidad depende puntualmente de su potencia de procesamiento. Este sistema se encuentra disponible en el mercado de manera limitada en gamas de precios altos y requieren un nivel de especialización alto para su fabricación, debido a su sofisticación. Dependiendo de su precio aportan mayor o menor latencia a la comunicación. Estos son usados en casos donde la señal es apenas recuperable, debido a que su capacidad reconstructiva permite recuperar una señal afectada por el ruido.

3.1.2.7.1.1.1.3 Capa 3 (L3, Small Cell)

Los RN L3 o “celdas pequeñas son sistemas de transmisión de baja potencia y corto alcance... desplegados para cubrir una zona geográfica reducida... pueden desplegarse en interiores o exteriores y proporcionan altas velocidades de transmisión y baja latencia” [16]. Estos equipos se comportan íntegramente como una estación base, por lo que entregan al UE funciones de plano de control y plano de datos de la RAN 3GPP, ya sea 4G o 5G. Además, se comunican de manera directa con la red núcleo a través de un *backhaul* generalmente alámbrico. En términos económicos este sistema es extremadamente costoso y sofisticado, necesitando infraestructuras de telecomunicaciones de todo tipo. La asequibilidad de este sistema está dimensionada para grandes capitales como, por ejemplo, empresas de telecomunicaciones u otras empresas que requieran estos servicios especializados de alto nivel. Estos son usados típicamente en contextos donde la señal es inexistente o donde se requiere una red privada.

Existe una subcategorización de estos sistemas establecida por el conglomerado *Small Cell Forum* el cual promociona, mercantiliza y regula las recomendaciones técnicas de estos sistemas [27]. La clasificación de estos equipos se basa en la cobertura que son capaces de entregar y se muestra en la tabla 8.

Parameter	Femto Cell	Pico Cell	Micro Cell
Maximum coverage radius	50 m	250 m	2.5 Km
Maximum transmitted power	100 mW	250 mW	5 W
Maximum number of users	16	64	200
Type of backhaul	Fibre, Wired	Fibre, wired	Fibre, wired, microwave
Cost	Low	Low	Medium
Advantages	Offload network congestion, extended coverage and high data rates	Extended throughput and coverage	Extended coverage
Applications	Residential	Small enterprise	Smart cities, smart metro
Location	Indoor and outdoor	Indoor	Outdoor

Tabla 8. Resumen de las Small Cell, extraído de [16].

3.1.2.7.2 Tecnologías no-3GPP

Las tecnologías no-3GPP de extensión de la red son todas las RAN que siguen las recomendaciones de organizaciones distintas 3GPP. Entre estas se encuentran tecnologías como WiFi o WiMAX que se alinean a IEEE. Estas redes de acceso se clasifican como RAN no-3GPP confiable y RAN no-3GPP no confiable [51]. Cada una de estas tecnologías tiene una arquitectura funcional distinta que se describe en la *Release 16* de 3GPP como se expone a continuación.

3.1.2.7.2.1 Acceso no confiable

Este acceso se define no confiable, debido a que las comunicaciones entre el UE y la red núcleo de 5G son directas, por lo que la recomendación establece que debe haber un proceso de aseguramiento de la comunicación antes de intercambiar cualquier información [51]. De este modo, se debe establecer un túnel IPsec tanto para el UL como para el DL. La arquitectura de este sistema se presenta en la figura 9.

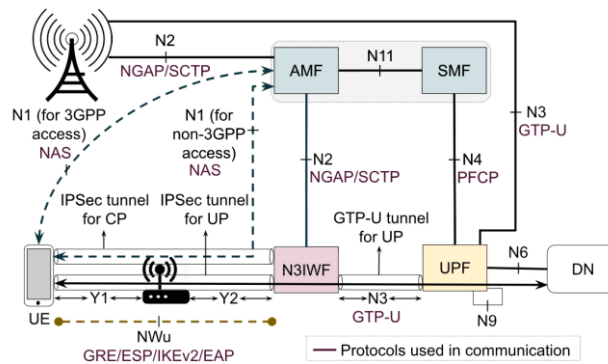


Figura 9. Arquitectura 5G con RAN no-3GPP no confiable, extraído de [71].

3.1.2.7.2.2 Acceso confiable

Las RAN no-3GPP confiables se denominan de esta manera porque existe un sistema intermediario que comunica al UE con la CN a través de la interfaz especial. La arquitectura de esta comunicación se expone en la figura 10.

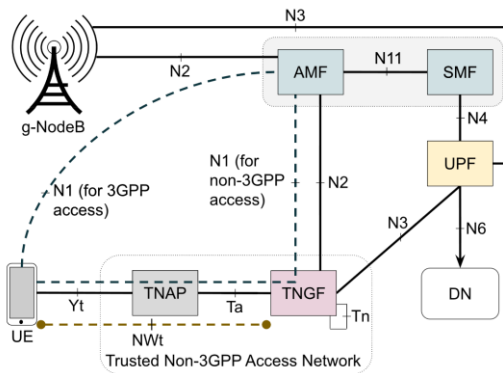


Figura 10. Arquitectura de 5G con RAN no-3GPP confiable, extraído de [71].

3.1.2.8 Contexto Colombia

Aun cuando Colombia es uno de los países más importantes de la región con la tercera población más grande de Iberoamérica y, en el contexto de las comunicaciones, una penetración de la telefonía móvil de 77.7 usuarios por cada 100 habitantes a finales de 2022 [13] [72], la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) afirma que, para el mismo periodo, el 14.7 % del total de usuarios que accedían a la red móvil lo hacían todavía a través de redes 2G y 3G [72]. Además, la proyección para 2025 muestra que el porcentaje de cobertura en zonas rurales será de 80%, dejando una gran parte de la población sin servicio [13]. No obstante, de acuerdo con la CRC “en Internet móvil, los ingresos alcanzaron los \$8,70 billones en 2022, presentando un incremento del 9,3% respecto a 2021... El tráfico promedio por acceso de Internet móvil fue de 7,8 Gigabytes en el último mes de 2022, lo que equivale a un 45,3% más en comparación con 2021” [72]. Esto deja de frente un panorama en el que puede existir un crecimiento grande y acelerado con diversas oportunidades de desarrollo, que el sector privado debe explotar a la llegada de las nuevas tecnologías.

Las tecnologías de red móvil en el país muestran una tendencia de crecimiento y podrían ser las impulsoras del desarrollo económico, el músculo industrial y la soberanía monetaria del peso colombiano (COP). El desarrollo de estos sistemas tiene sentido en un país con profunda desigualdad y con una industria ahogada por el poder de los imperios del norte global y el mercado de los estupefacientes. En este sentido, las nuevas tecnologías de red móvil se podrían presentar como una de las puertas para proyectar el crecimiento de las fuerzas productivas del país. Por esto, es importante aportar desde esta y todas las áreas de la tecnociencia para que el centro de gravedad del valor agregado colombiano se aleje de la exportación de materia prima y se sitúe en la producción y comercio de soluciones y productos de mayor complejidad.

3.1.2.9 Bandas de frecuencia usadas en Colombia para el servicio de Red Movil

Las bandas de frecuencia que se usan en Colombia para el servicio de red móvil (IMT), se recogen de ITU y se describen en [73]. Como se observa en la tabla 9, de elaboración propia, se describe la banda de frecuencias usada por cada operador en las tecnologías 5G y 4G para Colombia a la fecha de publicación de este documento. Cabe aclarar que esta tabla se elabora con la aplicación de Android, Network Cell Info (NCI).

Bandas de Frecuencia 4G de las operadoras móviles en Colombia						
Nomenclatura Común	ITU	Canal	Frecuencia (MHz)	Claro	Movistar	Tigo
APT	n28	UL	703-748			
	n28	DL	758-803			
Cellular	n5	UL	824-849			
	n5	DL	869-894			
AWS	n4	UL	1710-1770			
PCS	n2	UL	1850-1910			
	n2	DL	1930-1990			
AWS	n4	DL	2110-2170			
IMTE	n7	UL	2500-2570			
	n7	DL	2620-2690			
n78	n78	UL,DL	3300-3800			

Tabla 9. Bandas de frecuencia 4G y 5G relacionadas al operador [73], elaboración propia.

3.1.2.10 Entidades regulatorias pertinentes en el proyecto

3.1.2.10.1 Third Generation Partnership Project (3GPP)

3GPP es la organización internacional que se encarga de estudiar, desarrollar y emitir las normativas para las comunicaciones móviles. Está formada de diversos grupos del sector de las telecomunicaciones de todo el mundo. Su misión es la creación de un estándar para las comunicaciones de banda ancha móviles. La idea de esta organización es estructurar y mejorar las comunicaciones móviles con un enfoque de lanzamientos generacionales y retrocompatibilidad, de acuerdo con lo expuesto en su página web [74].

3.1.2.10.2 Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU)

La ITU es una agencia especializada de la Organización de las Naciones Unidas. Es el organismo líder a nivel mundial en el desarrollo de normas y políticas para las tecnologías de la información y las comunicaciones. Su misión incluye la promoción de la conectividad global, la armonización de normativas y estándares técnicos, la gestión del espectro radioeléctrico y la implementación de estrategias para reducir la brecha digital entre países [75].

3.1.2.10.3 Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

MinTic es la entidad encargada de formular y adoptar políticas, planes, programas y proyectos relacionados con las tecnologías de la información y las comunicaciones en Colombia. Fue establecido por la Ley 1341 de 2009 [76], la cual define su estructura, funciones y atribuciones.

3.1.2.10.4 Comisión de Regulación de Comunicaciones

La CRC es un organismo independiente encargado de regular y supervisar el sector de las comunicaciones en Colombia. Su establecimiento y funciones están definidos por la Ley 1341 de 2009 [76] y otras normativas relacionadas. Esta comisión juega un papel crucial en la creación de un entorno equitativo y competitivo para los operadores y usuarios de servicios de comunicación en el país.

3.1.2.10.5 Agencia Nacional del Espectro

Esta entidad es la encargada de gestionar y administrar el espectro radioeléctrico en el país. Su creación y funciones están respaldadas por la Ley 1341 de 2009 [76] y otras normativas aplicables. En resumen, la ANE tiene como objetivo principal planificar, asignar y controlar el uso del espectro radioeléctrico en Colombia. Esta entidad regula la atribución y asignación de frecuencias, supervisa su uso eficiente, y contribuye a la mitigación de interferencias electromagnéticas.

3.1.3 Trabajos Relacionados

3.1.3.1 Relay Nodes

3.1.3.1.1 Una plataforma SDR para la implementación de RN de tipo *Decode-and-Forward* (D&F)

En [70] se desarrolla un RN de tipo D&F con funcionalidades PHY, MAC y RLC con las USRP 2901 de NI. En el contexto de este trabajo se evalúa SDR como una posible solución para efectuar comunicaciones móviles en escenarios retadores como son las transmisiones: de exteriores a interiores, de alta movilidad y de escenarios con baja cobertura. Se prueba como mejoran sustancialmente parámetros de QoS del usuario como el ancho de banda total y la tasa de pérdida de bits. No obstante, se recomienda para trabajos posteriores un estudio más profundo en el efecto de parámetros como la latencia causados por la USRP en su función.

3.1.3.1.2 Implementación de un RN de tipo D&F para sistemas cooperativos tipo MIMO usando una plataforma SDR.

En el trabajo del presente artículo [77] se implementa un RN tipo D&F, utilizando USRP. Los autores entregan un despliegue de la arquitectura del sistema 4G, en el cual decodifican la señal para recodificarla antes de su retransmisión. Este sistema usa la plataforma USRP NI 2944 e implementa la eNB y el UE en equipos emuladores para la evaluación del rendimiento del sistema. Finalmente, afirman los autores que este es el primer paso para el desarrollo de otros esquemas de RN y las comunicaciones 5G.

3.1.3.1.3 Relay mmWave Privado por Celona

Private mmWave de Celona [26] es una solución de red inalámbrica privada que utiliza la tecnología 5G mmWave. La solución de Celona está diseñada para automatizar la implementación de redes inalámbricas celulares por parte de las organizaciones de TI empresariales y los proveedores de servicios gestionados, simplificando drásticamente su integración con una red de TI empresarial.

3.1.3.1.4 Cel-Fi por Nextivity

Cel-Fi Nextivity [25] es una empresa que desarrolla soluciones inteligentes de cobertura celular para 5G y comunicación de seguridad pública. Los sistemas son incondicionalmente seguros para la red y no generan ruido. Este equipo ofrece soluciones para entornos empresariales, seguridad pública, pequeñas empresas, entre otros. Dichos productos han sido aprobados para su uso en casi 100 países por casi 200 operadores móviles.

3.1.3.1.5 Nodo de retransmisión aérea Wi-Fi 6 en red 5G para operaciones de emergencia

En el artículo [78] se propone una arquitectura de comunicación para extender la cobertura de la red 5G en situaciones de emergencia, utilizando un dispositivo Wi-Fi 6 como nodo de retransmisión aéreo. El dispositivo se conecta al 5G como UE y ofrece una cobertura Wi-Fi 6 a los usuarios finales, aprovechando las ventajas de ambas tecnologías. El artículo muestra un sistema de apoyo misiones de rescatistas. Se concluye que el sistema propuesto cumple la función esperada, extendiendo 5G en escenarios de desastre.

3.1.3.2 Femtoceldas

3.1.3.2.1 Femtoceldas en CenturyLink - Telepuerto

El trabajo presentado en [79] entrega una solución de red celular de interior para optimizar el servicio de voz móvil de Movistar en las instalaciones de la empresa CenturyLink-Telepuerto, ubicada en Bogotá, Colombia. El proyecto se basa en la metodología TOGAF para estudiar el modelo de negocio actual de Movistar y su arquitectura empresarial, y propone el uso de femtoceldas como la mejor alternativa tecnológica para mejorar la cobertura y la calidad de la señal 3G. El trabajo también incluye la planeación, el diseño y la evaluación financiera de la solución propuesta, utilizando la metodología ADM. El trabajo aporta una solución innovadora, de bajo costo y fácil integración, que puede beneficiar tanto a los operadores móviles como a los usuarios finales.

3.1.3.3 Estaciones base

3.1.3.3.1 Instalación de estación base en interior y alrededores del hospital de Cruces de Barrakaldo

Este trabajo [80] describe el diseño y la instalación de una estación base de telefonía móvil para proporcionar cobertura interior y exterior en un hospital, utilizando las tecnologías 3G y 4G. El autor explica los conceptos previos sobre las comunicaciones móviles, las características de los equipos y elementos que componen la estación base, y la distribución de estos dentro del recinto. Además, presenta los planos, esquemas del emplazamiento y las líneas futuras de mejora con la introducción del 5G.

3.2 Metodología

La realización de este proyecto requiere desglosar cada objetivo para establecer una serie de tareas que al completarse aporten al objetivo general. Este desglose se hace de manera que se cumpla con los cuatro objetivos de la metodología CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar, Operar) para la ejecución de proyectos.

O1. El primer objetivo consta de realizar un barrido de la literatura para encontrar las diferentes soluciones que se han aplicado para esta problemática, además de estructurar y fundamentar un marco teórico sólido para el proyecto.

- **T1.1** Realizar una revisión de la bibliografía y del mercado a nivel internacional sobre los sistemas de extensión de la red.
- **T1.2** Realizar una revisión de los modelos de propagación adecuados al contexto de interiores.
- **T1.3** Recoger información de los entes competentes sobre las bandas de frecuencias usadas por operadores móviles en el país.

Hito: establecer marco contextual, legal y teórico del proyecto.

O2. El objetivo dos consiste en realizar un proceso en el que se establezca el alcance real del proyecto, basándose en la viabilidad técnico-económica y las tecnologías a disposición.

- **T2.1** Obtener permisos de instalación en DAPD.
- **T2.2** Adquirir planos del piso 10 del DAPD.
- **T2.3** Tomar medidas de la SRM en sitio con RSA 306B y NCI.
- **T2.4** Realizar encuesta para medir QoS perceptual de los usuarios.
- **T2.5** Aclarar vacíos con la Dirección de Industria de Comunicaciones de MinTIC.

Hito: materializar el alcance del proyecto, aterrizándolo a las condiciones materiales de su contexto.

O3. El tercer objetivo implica el desglose de la solución en etapas de diseño secuencialmente necesarias para cumplir criterios de la metodología CDIO, basándose en herramientas teóricas y computacionales, enfocándose principalmente en las necesidades del usuario.

- **T3.1** Estudiar la estructura programable de los modelos de propagación en interiores.
- **T3.2** Desarrollar modelos de propagación con asistencia de ChatGPT.
- **T3.3** Documentar metodología GPT, desarrollo usando Inteligencia Artificial.
- **T3.4** Identificar estaciones base alrededor del DAPD.
- **T3.5** Identificar bandas de frecuencias donde se modula el servicio de red móvil para cada operador.
- **T3.6** Calcular potencia transmitida mínima del sistema con modelos de propagación.

Hito: establecer los parámetros de la solución ideal basado en medidas y usuario necesarios para el criterio de selección del siguiente objetivo.

O4. El cuarto objetivo implica una exploración del mercado online para lograr realizar la comparación y adquisición de los equipos de mayor calidad y mejor precio ajustados al contexto de aplicación.

- **T4.1** Investigar las mejores marcas de equipos RF en las tiendas en línea de origen chino.
- **T4.2** Realizar proceso de selección de los dispositivos adecuados para la solución.
- **T4.3** Adquirir dispositivos de radiofrecuencia en tiendas electrónicas de diverso origen.

Hito: comprar todos los elementos necesarios para iniciar la implementación.

O5. El quinto objetivo implica la construcción y el proceso de instalación de los sistemas necesarios para dejar la solución en sitio.

- **T5.1** Caracterizar parámetros S de los dispositivos adquiridos con VNA SMM1000A.
- **T5.2** Realizar proceso iterativo para hallar la mejor configuración del sistema.
- **T5.3** Documentar interrupción de servicio y fallas de AWS.

O6. El sexto y último objetivo consta de la medición de la QoS para determinar el impacto de la solución de manera general.

- **T6.1** Pulir modelos de propagación en interiores con la metodología GPT.
- **T6.2** Desarrollar programas insumo para el procesamiento de los datos usando metodología GPT.
- **T6.3** Medir nuevo RSSI y RSRP.
- **T6.4** Generar mapas de calor interpolando datos tomados.
- **T6.5** Medir impacto de QoS mediante comparación de mapas de calor RSRP de la campaña de medidas inicial contra la final.
- **T6.6** Ajustar desfase de potencia de los modelos de propagación para comparación final con los datos.

3.3 Resultados esperados

En cuanto al resultado final, se espera lograr una solución que supla las faltas en la cobertura y mejore la calidad del servicio de red móvil en un contexto de interiores determinado. De este modo, el proyecto en su culminación debe generar los siguientes resultados:

1. Documentación:
 - a. Diseño integral de la solución.
 - b. Software de dimensionamiento de la solución.
 - c. Impacto al usuario.
 - d. Costos totales.
 - e. Gestión de permisos para uso del espectro.
2. Solución:
 - a. Solución implementada.
3. Modelo de propagación:
 - a. Modelos ajustados a la realidad.

3.4 Cronograma

A continuación, se presenta el cronograma de las actividades realizadas a lo largo del proyecto. Para el seguimiento de este cronograma se establecen reuniones semanales con el profesor Carlos Giraldo, con el fin de llevar seguimiento de las tareas y ajustar la dirección del proyecto.

		Semestre 2024-1				Semestre 2024-2																Intersem. 2025-1								
		Fb	Mz	Ab	My	Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre		Febrero		
		M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	
C	O1	T1.1	█																											
		T1.2					█																							
		T1.3	█																											
	O2	T2.1					█																							
		T2.2							█																					
T2.3										█																				
T2.4														█																
T2.5														█		█														
D	O3	T3.1					█																							
		T3.2					█																							
		T3.3																							█					
		T3.4					█																							
		T3.5					█																							
		T3.6									█		█																	
I	O4	T4.1													█															
		T4.2													█		█													
		T4.3													█		█		█											
I	O5	T5.1																	█		█									
		T5.2																	█		█		█							
		T5.3																	█		█		█							
O	O6	T6.1									█				█				█											
		T6.2																	█		█		█							
		T6.3																	█		█		█							
		T6.4																	█		█		█							
		T6.5																	█		█		█							
		T6.6																	█		█		█							
Redacción		█																												
Sustentación		█																												

3.5 Recursos

En esta sección se muestra una estimación de los costos presupuestales del proyecto incluyendo los costos de recursos humanos y técnicos que implica una posible solución.

3.5.1 Humanos

En la tabla 10 se relacionan los recursos humanos que este proyecto requeriría para llegar a buen término. Esto se realiza teniendo en cuenta, en promedio, dos horas de reunión con el director semanalmente y una dedicación semanal de tiempo completo del estudiante.

Persona Implicada	Cargo	Horas a la semana	Costo por hora	Número total de horas	Precio total (COP)
Carlos Andrés Giraldo Castañeda	Director de proyecto	2	\$ 100.000	96	\$ 9.600.000
Juan Camilo Ruiz Escobar	Estudiante	38	\$ 30.000	1824	\$ 54.720.000

Tabla 10. Tabla presupuestal de inversión en tiempo.

3.5.2 Técnicos

En la tabla 11 se muestran los recursos estimados para la realización de una posible solución.

Recursos Físicos				
Equipos	Origen	Precio/unidad (COP)	Precio Real (COP)	Tipo de Adquisición
Procesadores de señal	Tesista	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000	Directa
Cables Coaxiales RF 50 ohm	Tesista	\$ 500.000	\$ 500.000	Directa
Antena omnidireccional	Tesista	\$ 200.000	\$ 200.000	Directa
Antena direccional	Tesista	\$ 250.000	\$ 250.000	Directa
Accesorios Funcionales	Tesista	\$ 300.000	\$ 300.000	Directa
UE	Tesista	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	Preexistente
Computadora	Tesista	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	Preexistente
Analizador Vectorial (20 horas)	Universidad	\$ 80.000	\$ 1.600.000	Preexistente/Préstamo
Analizador Espectro (30 horas)	Universidad	\$ 40.000	\$ 1.200.000	Preexistente/Préstamo
Impresora 3D (3 horas)	Universidad	\$ 30.000	\$ 90.000	Preexistente/Préstamo
Accesorios RF (50 horas)	Universidad	\$ 15.000	\$ 750.000	Preexistente/Préstamo
Licencias				
Office 365	Universidad	\$ 250.000	\$ 250.000	Derecho por matrícula
Matlab	Universidad	\$ 220.000	\$ 220.000	Derecho por matrícula
Python	Software Libre	\$ -	\$ -	Directa
Blender	Software Libre	\$ -	\$ -	Directa
Plan de datos móviles	Tesista	\$ 300.000	\$ 300.000	Preexistente
Inversión real tesista			\$ 2.750.000	
Inversión real universidad			\$ 4.110.000	

Tabla 11. Recursos necesarios para la realización del proyecto.

3.5.3 Presupuesto

Finalmente, se muestra un estimado de los costos generales del proyecto, teniendo en cuenta los costos de recursos e inversión en tiempo.

Ítem	Costos asumidos por el tesista	Costos asumidos por la universidad
Tiempo Director C.G.		\$ 9.600.000
Tiempo del Estudiante	\$ 23.712.000	
Derechos de Continuidad	\$ 5.280.000	
Recursos esenciales	\$ 2.450.000	\$ 3.640.000
Recursos funcionales	\$ 5.600.000	
Licencias		\$ 470.000
TOTAL	\$ 37.042.000	\$ 13.710.000

Tabla 12. Asignación de costos presupuestales.

Diseño e Implementación

4.1 Definición técnica del proyecto

Con el fin de materializar el alcance del proyecto, se realiza un proceso de selección de las alternativas de solución, filtrando entre los sistemas investigados en el marco teórico. Los mencionados sistemas tienen una estructura general común con los subsistemas llamados: *backhaul*, *procesador* y *fronthaul*. Cada subsistema se encarga de recibir la señal, procesarla y retransmitirla, respectivamente y de manera bidireccional, mejorando la calidad de la comunicación. Se tienen en cuenta diez criterios relevantes para la selección, como se observa en la tabla 13.

Criterio	A&F	D&F	Celdas pequeñas
Simplicidad de Implementación	Baja complejidad	Alta complejidad	Alta complejidad
Requisitos de Energía	Bajo consumo	Mediano consumo	Alto consumo
Calidad de la Señal	Potencial deterioro de la SNR	Mejor rendimiento, elimina ruido	Excelente rendimiento
Latencia	No aporta latencia	Aporta latencia si se implementa en equipos de baja capacidad de cómputo	Latencia baja o moderada
Costos de Implementación	Inversión mediana	Inversión inicial alta	Costos de escala empresarial
Cobertura y Capacidad	Ampliación de cobertura sin mejora de capacidad	Ampliación de cobertura con mejora de capacidad	Excelente mejora en capacidad y cobertura
Tolerancia al Ruido	No filtra el ruido	Alta tolerancia al ruido	Excelente tolerancia al ruido
Flexibilidad de Uso	Flexible y reinstalable con facilidad	Adecuado donde hay pérdida de servicio, reprogramable	Poco flexible, implica servidores e infraestructura de telecomunicaciones
Impacto en la Interferencia	Puede generar interferencia	Menor impacto en la interferencia	Nulo impacto de la interferencia
Escalabilidad	Fácil de escalar en cobertura, no en capacidad	Buena escalabilidad en calidad y cobertura	Escalable, pero costoso

Tabla 13. Criterios de comparación de los sistemas.

Seguidamente, se califica cada opción y se calcula un puntaje ponderado (tabla 14). Cabe aclarar que criterios inversos, por ejemplo, los requisitos de energía se califican de acuerdo con la siguiente lógica: menor se califica más alto. Del mismo modo los criterios directos se califican: mayor se califica más alto.

	Calificación Cualitativa	Ponderación	Criterio	Calificación Inicial			Puntaje Ponderado		
				A&F	D&F	S-C	A&F	D&F	S-C
0	No favorable	3	Simplicidad de Implementación	3	1	0	9	3	0
1	Poco favorable	2	Requisitos de Energía	4	3	1	8	6	2
2	Favorable	2	Rendimiento de la Señal	2	3	4	4	6	8
3	Altamente favorable	2	Latencia	4	2	4	8	4	8
4	Ideal	3	Costos de Implementación	4	2	0	12	6	0
		2	Cobertura y Capacidad	2	3	4	4	6	8
		2	Tolerancia al Ruido	0	3	4	0	6	8
		2	Flexibilidad de Uso	4	3	0	8	6	0
		1	Impacto en la Interferencia	1	2	4	1	2	4
		3	Escalabilidad	4	4	2	12	12	6
				Puntaje Total			66	57	44

Tabla 14. Calificación de los criterios.

De esta manera se selecciona la alternativa A&F como la idónea para el alcance del proyecto con los recursos disponibles. Con ello, se procede a mapear la lista de subsistemas a construir y las tareas por realizar. Además, se establece un alcance viable y se aterriza el proyecto a las necesidades de los usuarios del contexto elegido. En consecuencia, este proyecto se focaliza como un trabajo de ingeniería de integración de presupuesto moderado enfocada al usuario, en miras de realizar un aporte académico en el área de modelos de radiopropagación en interiores, enfocados al servicio.

4.2 Inmersión en el contexto

Tras realizar una búsqueda de los diferentes lugares de aplicación, de manera orgánica se encuentra la oportunidad de aplicar el proyecto en la Alcaldía Distrital de Santiago de Cali, a través de una conversación con la líder de la Unidad de Apoyo a la Gestión (UAG) del Departamento Administrativo de Planeación Distrital (DAPD) de la Alcaldía de Santiago de Cali, quien es responsable del manejo, mantenimiento, gestión y uso de todas las infraestructuras en el piso 10 y 11. En medio del dialogo se autoriza la ejecución del proyecto, dada la necesidad de su equipo.

Esta solución se aplica en el piso 10 del edificio de la Alcaldía de Cali donde se encuentra el DAPD, el cual está compuesto por la Subdirección de Planificación del Territorio, la Subdirección de Espacio Público y Ordenamiento Urbanístico y la Subdirección Desarrollo Integral. En este sitio se encuentran contratadas aproximadamente 400 personas que trabajan de manera mixta, con lo que, con normalidad, se pueden hallar entre 150 y 200 personas presencialmente todos los días. El edificio, por otra parte, está construido por concreto macizo y numerosas ventanas de vidrio polarizado con marcos de aluminio, contiene en su interior cubículos para el trabajo de oficina, almacenes de archivo metálicos, ascensores, columnas visibles, entre otros elementos. En la figura 11 se muestra una foto de la zona central del piso mencionado.



Figura 11. Piso 10 de la Alcaldía de Cali.

En términos de orientación en la ciudad, el edificio tiene la siguiente distribución: al norte existe una zona hotelera de clase alta, con locales comerciales y algunas viviendas; al sur, una zona de alta densidad turística, comercial y empresarial, como se observa en la figura 12.



Figura 12. Vista satelital de la Alcaldía, extraído de Ontic.

De manera visual estas alas sur y norte se denominan ala del Río y ala de los cerros, como se observa en el plano del piso representado en la figura 13. A saber, la equis roja es el sitio donde se halla este plano y se fotografía para uso del proyecto.

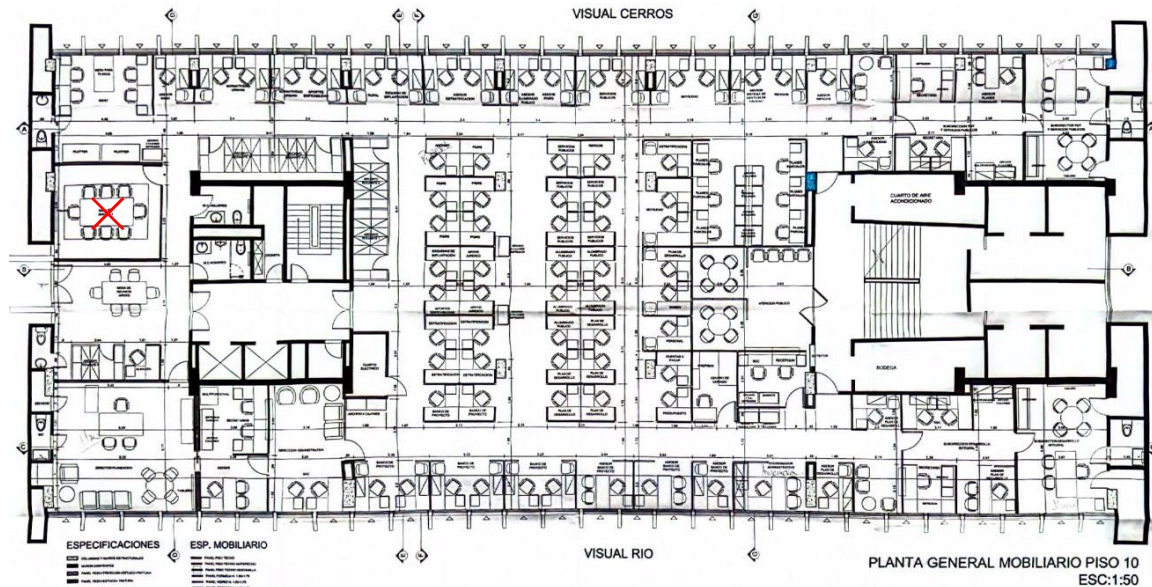


Figura 13. Plano del Piso 10 de la Alcaldía Distrital.

Al analizar la construcción del sitio, se pueden identificar las condiciones materiales descritas en la sección de descripción del problema, por lo que se realizan conversaciones con los usuarios del sitio que efectivamente confirman la afectación de la QoS de la SRM de diferentes ORM. Inicialmente, durante la etapa de inmersión en el contexto, algunos funcionarios y líderes de los diferentes equipos se acercan con curiosidad a mostrar su opinión y experiencia con el servicio. De modo que, gracias a esas varias conversaciones, se construye un relato general de la experiencia de usuario, el cual da cuenta de las necesidades generales y se logra caracterizar descriptivamente el piso. Adicionalmente, este acercamiento orgánico permite realizar una recogida de información a través de una corta encuesta anónima, cuyo resumen se muestra en la figura 14 (respuestas completas en el anexo 1.2). Esta recogida de información termina de complementar las conversaciones individuales y aporta a la construcción del contexto general, que se desglosará en tres secciones: el arquetipo del proyecto, el relato general de experiencia de usuario y la necesidad general del usuario. Las mencionadas construcciones narrativas se muestran a continuación.

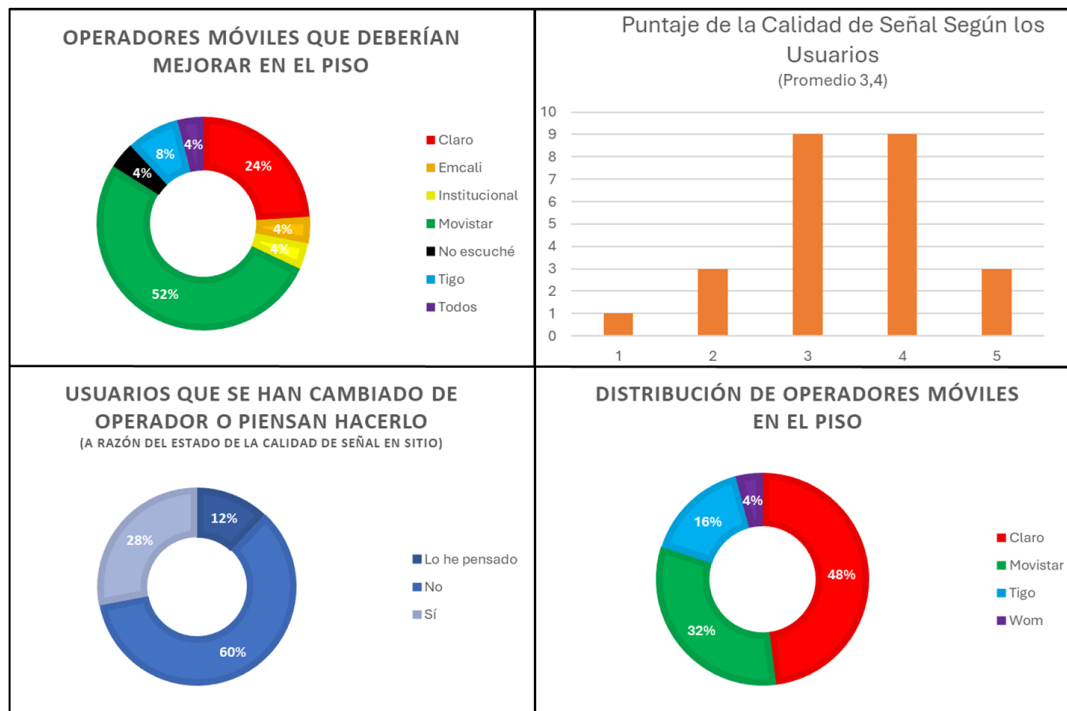


Figura 14. Resultados Generales de la Encuesta.

4.2.1 Arquetipo del proyecto

El arquetipo en el cual se enfoca este proyecto es el funcionario o contratista de la Alcaldía Distrital de Santiago de Cali que trabaja para el DAPD y debe usar sus propios recursos de conectividad para cumplir sus obligaciones. Este es en su mayoría cliente de las principales ORM del país y usualmente encuentra problemas en su sitio de trabajo con sus servicios, entre ellos las llamadas y los datos móviles. En su itinerario laboral suele tener procesos que requieren un moderado ancho de banda, necesitando descargar y subir archivos o modificar documentos colaborativos de alta complejidad en la nube, además de importantes llamadas importantes relacionadas a la gestión de tareas y compromisos, por lo que, dado su contexto, suele experimentar interrupción e ineficiencia en su proceso, debido a la baja QoS de la SRM. A menudo se cuestiona si dicha problemática es causada por su UE o por el servicio que ofrece la ORM, mas, indiferentemente al reemplazarlos no encuentra solución al problema. Adicionalmente, suele quejarse del estado de la calidad de la señal con sus compañeros y en algunos casos prefiere trabajar desde casa o en sitios de coworking aledaños, a pesar de los lineamientos de la subdirección, los cuales exigen su presencia en sitio todos los días. Finalmente, por lo general, este no tiene acceso al internet fijo de Emcali, cuya calidad, en caso de sí tenerlo, es frecuentemente insuficiente.

4.2.2 Relato General de Experiencia de Usuario

Según los usuarios, la calidad de la señal es altamente dependiente de la posición en el piso y existe predominancia de algunos operadores sobre otros. En primera instancia se expresa que la calidad de la señal de Movistar es pobre e inestable en el ala del Río. Los usuarios expresan que en esa zona hay superioridad de la señal de Claro y Tigo. Algunos expresan haberse tenido que cambiar de Movistar a Tigo o Claro por dicha razón. Otros expresan su deseo por cambiar de ORM por la misma causa. Del mismo modo, cuando existe saturación en la red y/o el internet cableado de Emcali falla, algunos compañeros clientes de Claro son quienes comparten conexión a internet a su grupo para poder seguir con las diferentes labores. Por otra parte, otros usuarios indican que Movistar, Tigo y WOM funcionan correctamente en el ala de los Cerros. En cuanto a la

zona central del edificio, otros expresan que se puede experimentar un funcionamiento a veces suficiente, pero inestable por parte de Movistar. Es decir, en esa zona central hay buena señal, pero el UE del usuario no responde cuando se trata de utilizar el servicio de datos exigentemente, generando la creencia de que el problema es el UE, en cuyo cambio no encuentran solución. En resumen, de acuerdo con los usuarios: 1. el ala del Río resulta problemática para Movistar, 2. Tigo funciona generalmente bien en todo el piso y Claro tiene superioridad en la calidad y estabilidad.

4.3 Requerimientos Generales de la Solución A&F

Realizando un análisis general del arquetipo y su necesidad, dadas las condiciones materiales del contexto, la solución debe tener las siguientes características cualitativas entre las que se encuentra extender dentro del piso, como mínimo, la SRM del operador Claro por ser el ORM con más clientes y el que ya implementaba 5G NSA en el momento de la ejecución del proyecto y dejar abierta la posibilidad de mejorar otras ORM. Luego, dicha solución debe proyectarse a futuro, de modo que los cambios en el sistema durante la transición a 5G NSA a SA sean mínimos y de costo asumible. Así, el usuario debe percibir una Potencia Recibida de la Señal de Referencia (RSRP) buena y excelente en la zona central del piso, representado en el plano mostrado. El sistema debe ser discreto, de bajo consumo y el procedimiento para su dimensionamiento debe ser simple e implementable por parte del actor pertinente, las ORM, como alternativa a la instalación de estaciones base, transformándose en una opción viable a la solución de este problema generalizado. Por otra parte, el sistema deberá respaldarse energéticamente de una fuente regulada en sitio para asegurar su continuidad y buen funcionamiento.

En cuanto a la implementación, la aplicación del sistema debe ser transparente para el usuario y este debe experimentar una mejora que implique mejoría en las velocidades de transferencia del servicio de internet, de modo que se genere un impacto positivo orgánico, es decir, una mejora no anunciada.

En términos académicos, el dimensionamiento debe ser llevado a cabo haciendo uso de modelos de radiopropagación en interiores. Es decir, el dimensionamiento del sistema debe hacerse de la mano de los más actualizados avances en teoría radioeléctrica en la literatura, buscando aportar hallazgos empíricos o teóricos para el desarrollo de estos modelos. Con ello, los modelos serán un aporte para futuras investigaciones prácticas o teóricas en este campo y contexto de aplicación.

4.4 Diseño de la solución

4.4.1 Metodología GPT

En esta sección, se muestra la metodología usada para desarrollar los códigos que respaldan este proyecto, reduciendo un tiempo de desarrollo que posiblemente habría sido extenso a apenas 1 mes continuo centrado en el desarrollo en la totalidad del tiempo y otros momentos de sofisticación del código, durante las eventuales etapas de desarrollo del proyecto. A esta se le nombra “metodología GPT” por comodidad de lectura, sin embargo, esta no está limitada a la inteligencia artificial usada en este trabajo, *ChatGPT* de OpenAI, ni a los transformadores generativos pre-entrenados (GPT), sino que se puede extrapolar a diferentes modelos de lenguaje, usándolos como potentes herramientas de desarrollo. Es decir, este trabajo se pudo haber realizado, incluso con mayor fluidez, usando *GitHub Copilot*, *DeepSeek*, entre otros, herramientas que llegaron a reemplazar los procesos desarrollo mediante consulta de foros como *XDA Developers*, *Reddit*, *Stack Overflow*.

Ahora, entrando a la metodología, se describe a continuación una generalización de lo hecho en este proyecto, en los siguientes pasos: abstracción, contextualización, escritura, sofisticación. Esta metodología debe ser en su primer paso la que cada desarrollador prefiera, lo diferente es la escritura del código que se transforma finalmente en un proceso dialéctico de generación-prueba-corrección-síntesis. Así, pues, este intento por establecer la mencionada metodología es más una extrapolación descriptiva de la manera personal de desarrollar de este ponente, el cual, evidentemente, no es experto en desarrollo, que un método rígido y solido al cual no

se le puedan cambiar, mejorar, optimizar los procedimientos, en medio, de un afán por cumplir la recomendación de los jueces de hacer escalable este modo de desarrollar, sometiéndolo al escrutinio del lector para su constante mejora. Cabe aclarar que un método de desarrollo asistido con IA requiere muchas más páginas, ilustraciones, curiosidad, asesoría personal y horas de parte del desarrollador de sentarse en frente de la máquina a desarrollar con ella, puntos todos que se salen completamente del alcance y objeto de este proyecto. Sin más que añadir, los pasos seguidos para desarrollar con IA durante este proyecto son:

4.4.1.1 Abstracción del tema

El estudio del tema en cuestión es el proceso de lectura de la teoría, en este caso, entender la estructura matemática de los modelos de propagación en interiores, las ecuaciones y las posibles formas de ejecutar el programa en un código. Entender modelos de propagación, diferentes transformadas, teoremas geométricos, entre otros.

4.4.1.1.1 Investigación teórica

Leer recomendaciones ITU, artículos y ver vídeos de explicación sobre modelos de propagación en interiores.

4.4.1.1.2 Investigación de programas

Consultar si existen otros programas que cumplan la misma función que se quiere implementar en las diferentes comunidades y foros para entender y replicar su lógica.

4.4.1.1.3 Segmentación funcional del programa

Establecer la estructura funcional del programa a implementar, en este caso tres bloques principales entre los que se encuentran: adecuación de plano, detección de paredes, generación de mapa.

4.4.1.1.4 Parametrizar bloques funcionales

Comprender entradas y salidas de cada bloque para lograr la salida objetivo. Entender de manera general: entradas, salidas, procesos internos y variables implicadas.

4.4.1.2 Contextualización de la IA

4.4.1.2.1 Indicar plataforma de desarrollo y lenguaje

Instrucción de ejemplo, párrafo 1: usaremos Jupyter Notebook con la versión más actualizada de Python.

4.4.1.2.2 Informar área del conocimiento

Instrucción de ejemplo, párrafo 2: desarrollaremos un código que pinte mapas de calor con el modelo Motley-Keenan, esto en el marco de mi trabajo de grado, el cual se tratará sobre una solución A&F de extensión de la red móvil usando amplificadores y antenas RF.

4.4.1.2.3 Introducir para qué

Indicar a la IA el objetivo para que de forma al código basado en esos lineamientos. Instrucción de ejemplo, párrafo 3: quiero implementar este código para generar mapas de calor de potencia recibida con la información del contexto en interiores que me entrega un plano en formato *bluechart* el cual extraje del sitio, se tendrán en cuenta los parámetros de RF del sistema modelado en potencia y la posición de la antena de RF de interiores. La idea es generar este mapa de calor para que sirva de sustento para dimensionar los equipos de RF que se instalarán en sitio.

4.4.1.2.4 Reglas de programación

Informar a la IA las reglas sobre cómo se quiere programar cada código. Instrucción de ejemplo: Quiero que el bloque que genera el mapa de calor no use clases y se pueda segmentar de acuerdo con la estructura de Jupyter.

4.4.1.3 Escritura del Código

4.4.1.3.1 Funcionalidad del código

Explicar detalladamente entradas y salidas de cada código. Instrucción de ejemplo: este código recibirá un plano en formato PNG, quiero generar un archivo CSV que contenga una matriz de las paredes del edificio representadas en líneas rectas. A continuación, se explica en detalle lo descrito.

4.4.1.3.1.1 Explicar claramente la funcionalidad del código

Instrucción de ejemplo: la imagen del plano es una matriz de píxeles que inherentemente tiene unas coordenadas, usaremos dicho sistema coordenado para detectar con la transformada de *Hough* todas las paredes del plano en forma de líneas rectas, dichas líneas rectas contienen la información del punto inicial, punto final y quiero añadamos una componente al vector del tipo de pared, a la cual no le vamos a añadir funcionalidad ahora, es para más adelante, por lo que generaremos una matriz *m por m* de la forma $[x1,y1, x2,y2, tipopared1; \dots; xn, yn, xn+1,yn+1, tipoparedn; \dots; xm, ym, xm+1,ym+1, tipoparedm]$, luego esa matriz se almacenará en un CSV.

4.4.1.3.1.2 Nunca pedir detalle si no se tiene un código inicial

No pedir cosas de detalle en las primeras iteraciones. Es decir, si no se tiene un código generado o preprogramado, no se le puede pedir detalle a la IA, cada generación debe enfocar su energía en una sola cosa. En este caso, en primeras iteraciones se debe gastar la energía de la IA en establecer la estructura gruesa del código. Instrucción de ejemplo: por ahora no te ciñas en que se detecten perfectamente las paredes, centrémonos en generar un código que cumpla con la función de detección de paredes y luego organizamos los parámetros de la transformada y modificamos la imagen si es necesario para mejorar la detección.

4.4.1.3.1.3 Corregir errores.

Es importante entender claramente los roles que cada uno juega, la IA es un asistente, por lo cual puede cometer errores o inventar cosas que son erradas. Aquí el rol de guía es importante para el éxito del proyecto. Se debe guiar a la IA, entendiéndola, siendo paciente y generando una comunicación efectiva, siempre tomando una actitud crítica. Algunos procesos llevados a cabo se describen a continuación:

1. Refuerzos Negativos
 - a. Cuestionar decisiones y sugerir alternativas. Instrucción de ejemplo: ¿por qué generaste una detección de esquinas? Eliminemos eso y solo detectemos líneas.
 - b. Pedir explicaciones para entender decisiones. Instrucción de ejemplo: ¿cuál es la razón por la cual quieres detectar esquinas y no solo las líneas?
 - c. Volver al principio. Instrucción de ejemplo: Por qué usas esta librería recuerda que Python integra una librería CSV. Nota: si la IA permite devolverse en la conversación, es decir, editar una instrucción anterior, se recomienda este “volver en el tiempo” para generar una nueva rama de generación/razonamiento y que no se lleve el error como un lastre en la memoria de la IA.
2. Refuerzos positivos para su aprendizaje. Instrucción de ejemplo: gracias tu solución es muy útil, este paradigma me parece apropiado, esta idea mejoró el proceso, me gustan los códigos simples, me gusta que describas en comentarios lo que hace el código a continuación, guarda esto en tu memoria etc.
3. Mostrar los errores que genera el gestor de errores si no se pueden corregir.

4.4.1.4 Proceso de sofisticación y detalle en el código

En este paso sí se le puede pedir todo el detalle necesario a la IA, pero paso a paso. Es decir, se debe añadir punto por punto cada función detallada del código o corrección de forma. Nunca se debe pedir demasiado a la vez, debido a que es probable que la máquina reestructure el código de manera indeseada, se equivoque e incluso que destruya todo el proceso alcanzado.

1. Petición de sofisticación para detalle del código. Instrucción de ejemplo: ahora añadiremos pérdidas de propagación dado el coeficiente de reflexión e implementaremos la fórmula de la recomendación e ITU,

para ello primero generaremos unos vectores de consulta que devuelvan el coeficiente de reflexión dado el ángulo de inserción del rayo, entonces ya no solo trabajaremos calculando cuántas paredes atraviesa el rayo acumulando las pérdidas, sino que, aparte de ver cuántas paredes atravesamos, acumularemos la pérdida que añade cada pared al rayo en función del ángulo de inserción, el vector de consulta es para que no calculemos cada vez que tenemos un ángulo las funciones porque están en términos de valores imaginarios... tú haz de cuenta que esos vectores consulta ya existen (yo programaré la generación de estos), tú implementa la lógica que te pido dentro de la función del cálculo de la pérdida total del rayo atravesando la pared, donde corresponda (`process_transmitter_position(x, y)`).

2. Si aparece un error:
 1. Si se puede corregir manualmente: corregir y comunica a la IA el nuevo código
 2. ¿No puedes corregir? Pide corrección a GPT y prueba
 3. ¿Ninguno puede corregir? Busca en internet y comunica corrección si hecha
 4. ¿Llegas a punto muerto? Reestructura orden de sofisticación y edita petición del momento justo antes de entrar al punto muerto
 5. Itera

Se sigue con un acompañamiento descriptivo, en forma de diagrama, en el cual se resume lo descrito anteriormente.

En el siguiente diagrama se puede encontrar de forma general y mejor ordenada todo el proceso de desarrollo de la metodología GPT de manera gráfica.

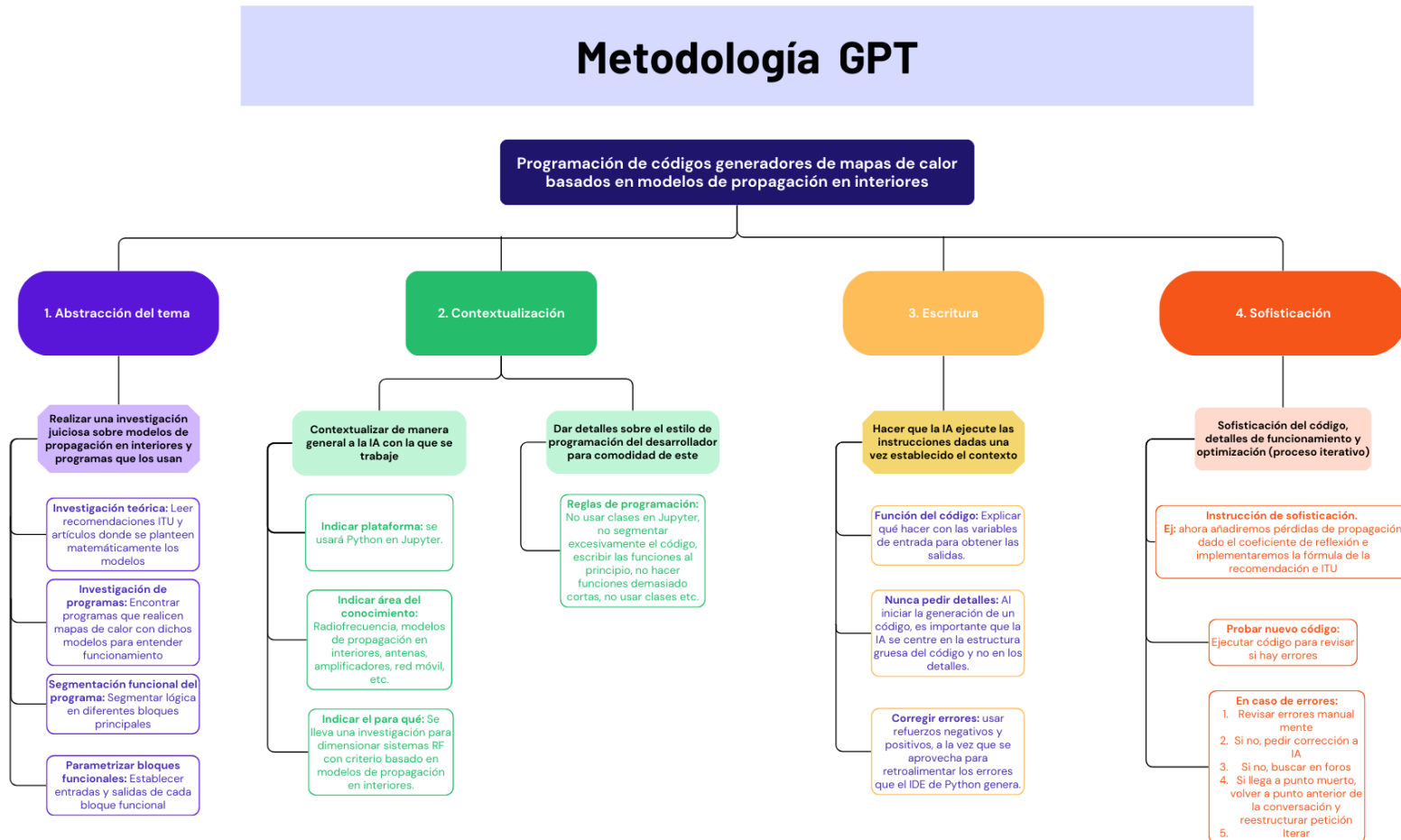


Figura 15. Metodología GPT.

4.4.2 Materiales para Medidas

4.4.2.1 Analizador de Espectro Portátil

El equipo usado durante la etapa de medidas es el equipo en préstamo Tektronix RSA 306B con su antena monopolo 119-6609-00 y las antenas usadas en el proyecto, descritas más adelante, usando el software Tektronix SignalVu-PC. Las medidas son tomadas con el tipo de detección *AVG* (*VRMS*) y para minimizar la variabilidad de la señal recibida, se procesa con un promedio *RMS* de entre 5 a 10 muestras, dependiendo del caso. Además, todas las medidas se hacen con una proporción de 801 muestras por unidad espectral. En las siguientes figuras se muestran, tanto el equipo de medidas mencionado (figura 16) como el software que interpreta sus medidas y algunas configuraciones (figura 17).



Figura 16. Toma de datos con Tektronix RSA306B.

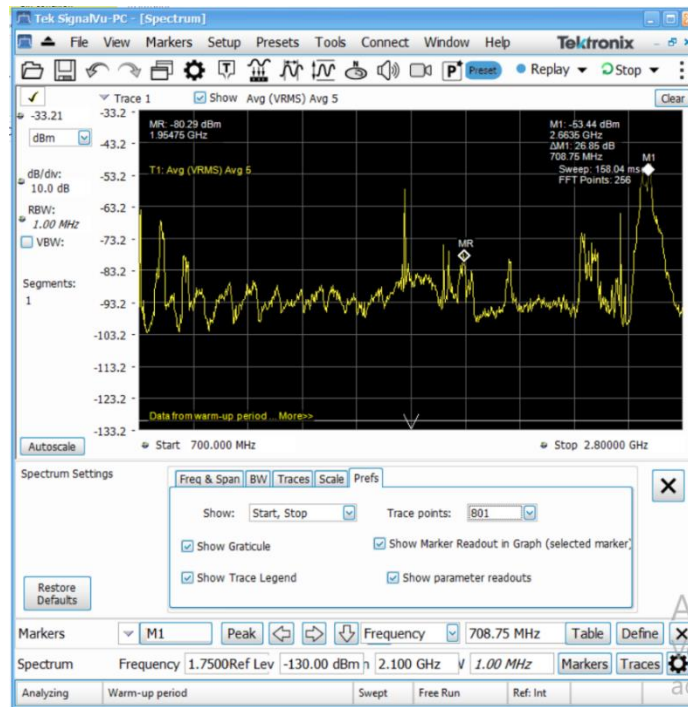


Figura 17. Vista de la toma de datos con SignalVu-PC.

4.4.2.2 Analizador Vectorial de Redes (VNA)

El analizador vectorial de redes usado para todas las medidas es el equipo Rhode & Schwarz SMM100A (VNA). Este se utiliza para caracterizar todos los sistemas de radiofrecuencia, según sus parámetros S. Esto es útil para el modelamiento en potencia del sistema y la generación de los mapas de calor, más adelante mostrados. Se muestra en la figura 18 la configuración del VNA.

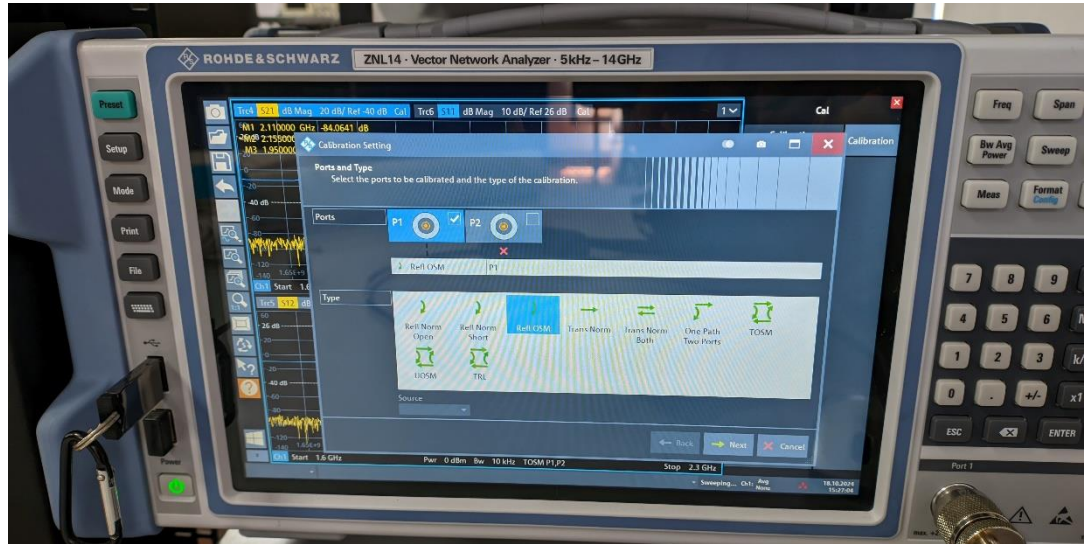


Figura 18. VNA en proceso de calibración.

4.4.2.3 Teléfono Celular (UE)

El equipo de usuario que se usa durante el desarrollo de este proyecto es un Motorola Edge 30 NEO con doble simcard. Se utilizan principalmente simcards de Claro, Movistar y Tigo, además de utilizarse la aplicación Network Cell Info para medir la RSRP percibida por el UE e información de la celda, frecuencia central, entre otra información relevante. No se encuentra ficha técnica relevante sobre el patrón de radiación o ganancia de la antena del UE, por lo que se asume como 0 y perfectamente omnidireccional. En cuanto a la aplicación Network Cell Info (NCI) se utiliza una barata versión de compra de la aplicación, la cual da toda la información que puede leer del UE en su proceso de conexión con la red móvil. A continuación, en la figura 19, se muestra una imagen completa de la pestaña más útil que ofrece de la aplicación para este proyecto.

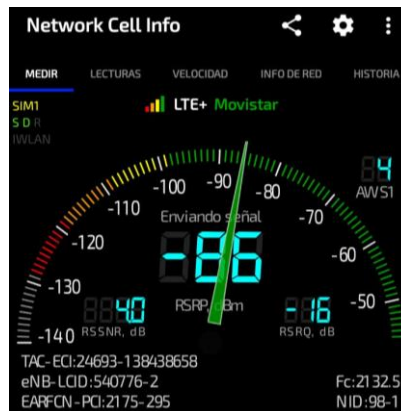


Figura 19. Medidas de la celda seleccionada por el UE en Network Cell Info.

4.4.3 Diagrama de bloques general del sistema

En la figura 20 se muestra la estructura general del sistema A&F, la cual incluye sus partes funcionales esenciales, sin tener en cuenta el módulo de alimentación energética, el cual se asume como implícito en el procesador.

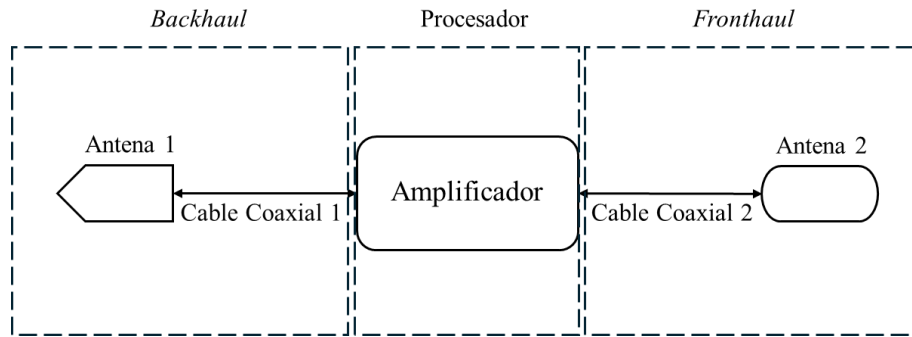


Figura 20. Sistema desglosado en sus partes esenciales.

Este sistema se caracteriza en el parámetro de potencia vs frecuencia. Por lo que es suficiente conocer la ganancia de sus subsistemas. Se sigue la fórmula de Friis a continuación, donde:

- P_t : la potencia transmitida por la antena del *Fronthaul* (antena 2).
- P_r : la potencia recibida por el *Backhaul* (antena 1).
- G_1 : la ganancia de la antena 1
- G_{amp} : la ganancia del amplificador.
- G_2 : la ganancia de la antena 2.
- L_{C1} : la pérdida del cable coaxial 1.
- L_{C2} : la pérdida del cable coaxial 2.
- L_{extra} : la pérdida de los accesorios de radiofrecuencia, cables y conectores.

$$G_{sistema} = P_t - P_r = G_1 + G_{amp} + G_2 - L_{C1} - L_{C2} - L_{extra}$$

De esta fórmula, y un análisis electromagnético del piso, se calcula la potencia transmitida mínima para lograr el alcance del proyecto.

4.4.4 Diseño del *Fronthaul*

El punto principal de esta etapa de diseño es calcular la potencia transmitida mínima que debe tener la señal al ser irradiada por la antena 2 para cumplir con el requerimiento de cobertura. Con esto en mente se realiza un programa que, dado el plano del piso caracterizado en sus materiales de construcción, arroja un mapa de calor de potencias recibidas a lo largo de la extensión del piso, basándose en el modelo Motley-Keenan (MKM) y una mejora del modelo Motley-Keenan (I-MKM), la cual tiene en cuenta el ángulo de inserción de la señal, citado en el marco teórico. La elección de este modelo se da principalmente porque tiende a sobreestimar las pérdidas, pues no tiene en cuenta efectos de reflexión, difracción, refracción, entre otros, que podrían ser beneficiosos para la propagación. Por ello, el resultado de este análisis hereda una premisa lógica del peor de los casos, con la cual se asegura que los resultados reales sean mejores que la estimación. De modo que se espera que el RSSI en la realidad sea mayor que la estimación del modelo, por lo que el usuario final debería experimentar una mejor cobertura que la estimada.

Para efectos del entendimiento del proceso se aclara que este análisis de radiofrecuencia del piso se segmenta en dos etapas: la caracterización radioeléctrica de los materiales de las paredes del piso y el cálculo del mapa de potencias recibidas. A nivel técnico, cabe aclarar que se utilizan dos códigos de realización propia,

desarrollados en Jupyter Notebook 7.0.8, con kernel de Python 3.12.4, los cuales cumplen cada uno las mencionadas etapas del proceso. Dichos códigos se encuentran en anexos.

4.4.4.1 Etapa 1. Caracterización radioeléctrica del piso

Al explorar la construcción del piso en el plano y conversando con los usuarios, se identifica que este está constituido principalmente por 4 materiales descritos en la tabla 15.

Tipo	Material
1	Ladrillo
2	Columna
3	Vidrio
4	Armario Metálico

Tabla 15. Caracterización de los tipos de material de construcción de cada pared.

Ahora, para el primer código usado, se calca el plano mostrado en la figura 13, haciendo uso del software LibreCAD, a un formato *bluechart*. De este modo, se limpia la imagen para visualizar únicamente paredes, con ancho de 1 píxel. Este será el *input* del primer código, cuya función es detectar automáticamente la mayoría de las paredes de dicho plano calcado. Después de detectar automáticamente las paredes, se corrigen los errores de la detección automática, permitiendo obtener precisión en la caracterización del plano. Luego, al realizar todas las correcciones, cada pared del piso se representa con un vector. Al final, el plano es, básicamente, una matriz de paredes en la que cada una se identifica con el tipo de material con la que está construida. Esta matriz se guarda en un CSV y es la entrada del código de la etapa 2. A continuación, se de la interfaz gráfica del código de la etapa 1 (figura 21).

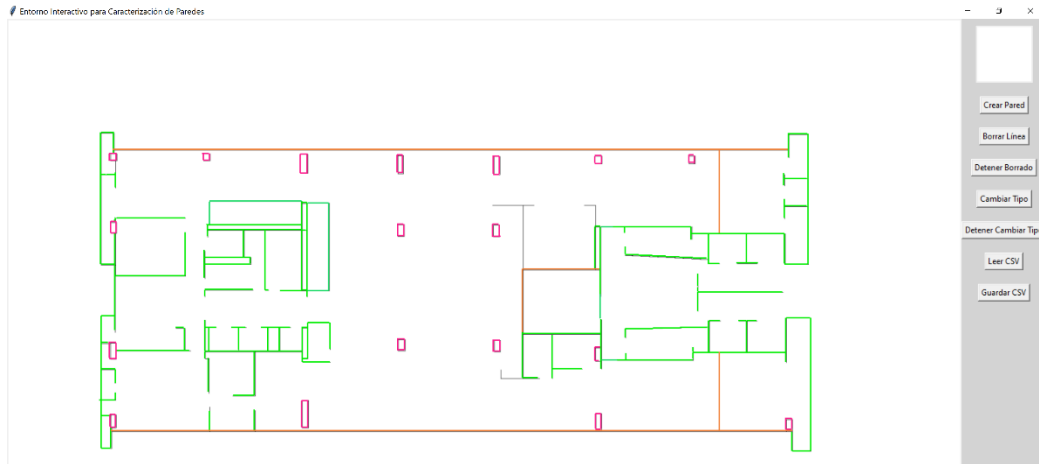


Figura 21. Programa para ajuste manual del plano.

4.4.4.2 Etapa 2. Cálculo del mapa de potencias recibidas

Los códigos que cumplen la segunda etapa se encargan de calcular las potencias recibidas en cada punto del plano caracterizado con los modelos MKM e I-MKM. Cabe aclarar que estos programas implementan todos los modelos del marco teórico, sin embargo, durante la implementación se descarta mencionar los demás por su baja precisión. A este código se pueden ingresar diferentes parámetros e incluso modificar la fórmula de Friis, pero el parámetro más relevante a ingresar es la potencia de la señal transmitida. Así, en esta etapa se busca encontrar la potencia transmitida mínima con la que se cumpla el requerimiento de irradiación.

Secuencialmente, el código pide seleccionar dos puntos del plano e indicar la distancia real que esta separación en píxeles representa en metros, reescalando el plano a tamaño real. Dicho proceso se representa a continuación, indicando la pared de escalado con color verde claro. Es decir, esta pared se usa como referencia para escalar

todo el plano. Primero se verifica el tamaño en el plano fotografiado y seguido se mide en la realidad. Después de esto, el código pide al usuario la posición del transmisor para establecer un mapa de distancias (figura 22) alrededor de este con el que se calcula la potencia de la señal recibida en cada punto del plano, teniendo en cuenta la ecuación de Friis. La ganancia del UE y la antena transmisora se establecen en 0 dB, incluida la potencia recibida, para iterar hasta encontrar el valor óptimo de potencia de la señal transmitida.

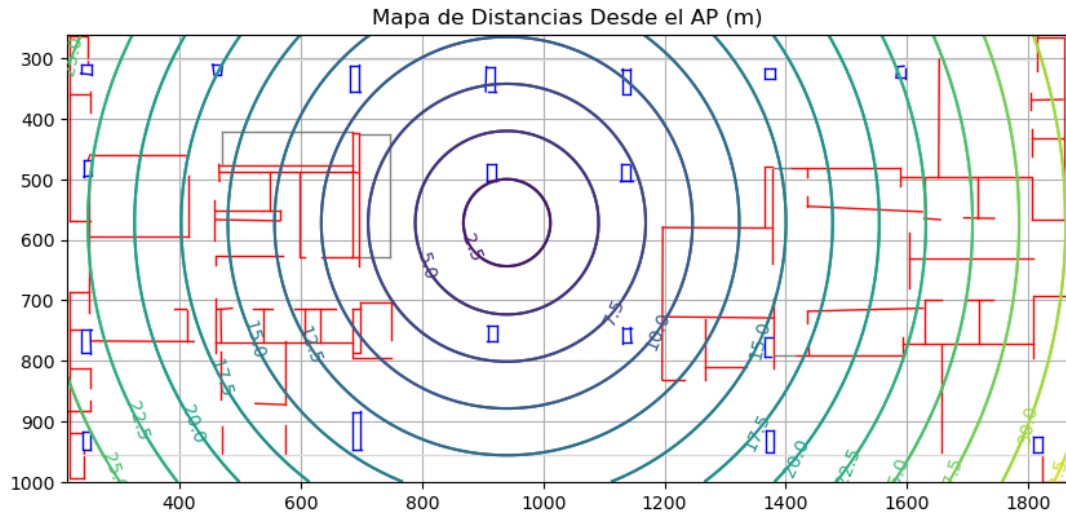


Figura 22. Campo de distancias generado por el código.

En la figura 23 y 24 se muestran los resultados de los modelos dada la potencia transmitida estimada que cumple con el requisito anteriormente planteado, el cual es -30 dBm. Esta prueba se realiza en IMT-E (2.6 GHz).

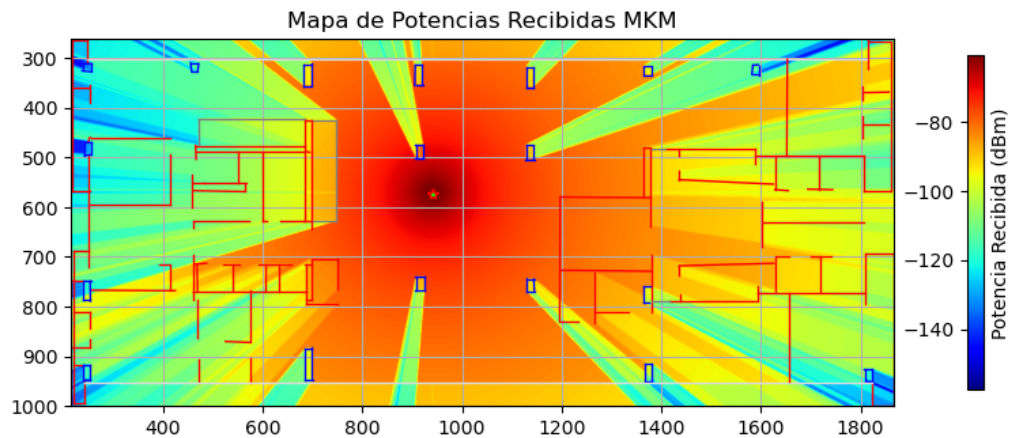


Figura 23. Resultado del MKM.

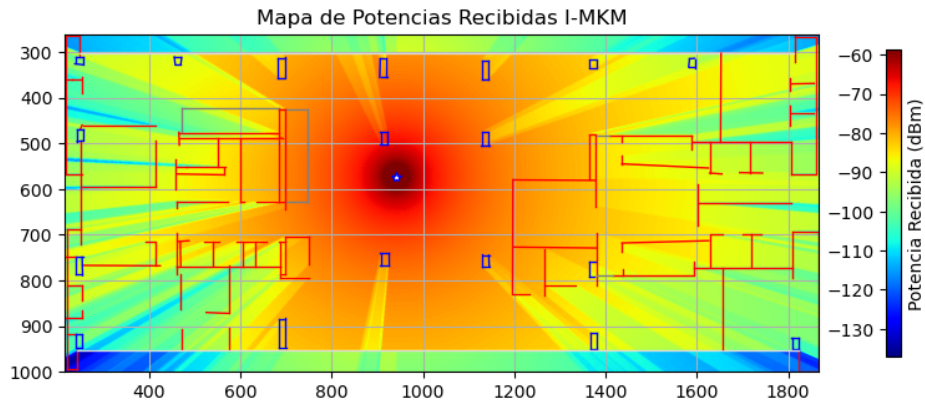


Figura 24. Resultado del I-MKM.

De esta manera, se encuentra que el modelo MKM, el cual estima mayores pérdidas que el I-MKM, indica que es suficiente una potencia transmitida mayor o igual a -35 dBm para irradiar con potencia excelente a la zona central del piso, es decir, cerca del 30% del área del piso.

4.4.5 Diseño del *Backhaul*

En esta sección se muestra el proceso con el que se identifican las posiciones de las estaciones base, las bandas de frecuencias y las potencias de las señales amplificables en el piso. Adicionalmente, se contrasta la información recogida en la inmersión en el contexto con medidas reales a fin de aterrizar los requerimientos técnicos de la solución. Esta tarea se realiza en tres secciones: campaña de identificación visual de las estaciones base aledañas, campaña de medidas con equipo especializado/UE y análisis de los datos recogidos.

4.4.5.1 Campaña de identificación visual

En primera instancia para lograr encontrar la mayor información sobre las estaciones base se envían diversas cartas de solicitud de información a la Dirección de Industria de Comunicaciones de MinTIC, en las cuales se solicita la posición de las eNB y gNB aledañas al Centro Administrativo Municipal (CAM) de Santiago de Cali y las bandas de frecuencias que estas usan para ofrecer el servicio de red móvil. Después de numerosos intentos se recibe una respuesta positiva, en la que se presenta la herramienta ONTIC, figura 25. Esta contiene una base de datos con toda la información importante sobre telecomunicaciones a nivel País, incluyendo los servicios móviles terrestres internacionales (IMT), con las posiciones de las estaciones base, sus bandas de frecuencia, identificadores, potencias transmitidas y ORM responsable. Esta respuesta es vital para confirmar la campaña de identificación visual. A continuación, se observa una identificación general de las BS alrededor del CAM.



Figura 25. Identificación de BS con Ontic alrededor del CAM.

De manera independiente se hace una identificación visual de las estaciones base con las que verdaderamente el edificio tiene línea de vista, las cuales son las potenciales proveedoras de la señal para el sistema.

Hacia el ala de los Cerros se pueden observar BS cerca a la plazoleta Jairo Varela como las del edificio Palacio Rosa o el edificio Granada, como se observa en la figura 26.



Figura 26. Visual de los Cerros desde el piso 10.

Por otra parte, hacia el ala del Río se encuentran BS detrás del edificio del Banco Popular (en la notaría 14), encima del edificio Ulpiano Lloreda y encima del edificio La Terraza en el Boulevard del Río (figura 27).



Figura 27. Visual del Río desde el piso 10.

Entre otras cosas, se puede inferir de este análisis visual una mayor densidad de usuarios hacia el ala del Río y a su vez mayor cantidad de BS. De manera similar, hacia el ala de los cerros, se podría inferir menor densidad de usuarios, dado que es una zona residencial y hotelera por lo que requiere menor cantidad de antenas.

Ahora, se procede a cruzar la campaña de identificación con los datos de ONTIC, de modo que se ubican en el mapa. Las siguientes figuras (28 y 29) muestran dicho cruce de información.



Figura 28. Antenas identificadas en la visual de los Cerros.

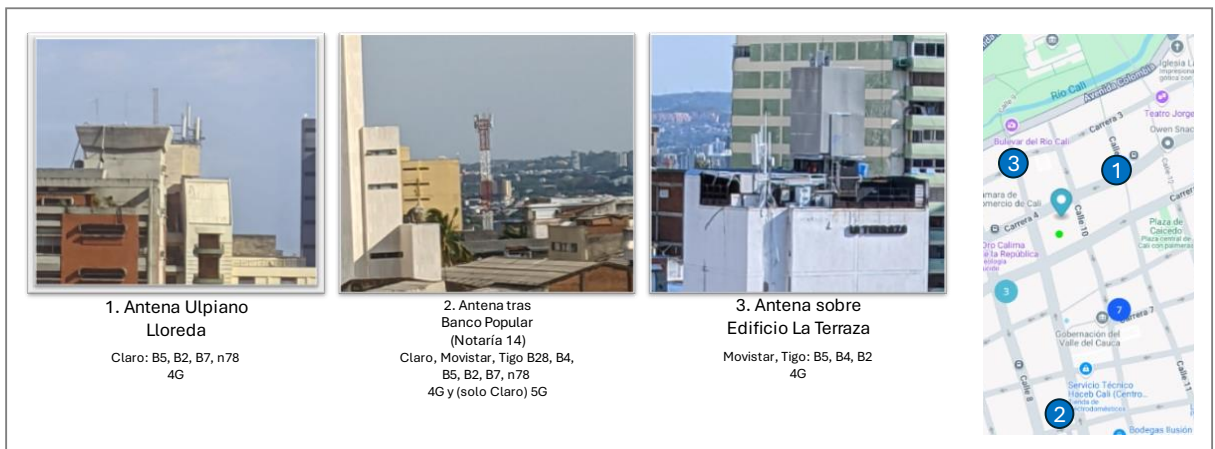


Figura 29. Antenas identificadas en la visual del Río.

Como última aclaración, se logra observar que el único proveedor que adelantaba el levantamiento de infraestructura 5G SA era Claro y se observa que ya su infraestructura LTE se adaptaba a los nuevos protocolos de 5G NSA, como se muestra más adelante.

4.4.5.2 Campaña de medidas con Tektronix RSA306B

Una vez identificadas visualmente las diferentes BS, se realizan diversas medidas con el analizador de espectro portátil RSA 306B y una antena LDPA, de modo que se obtengan las potencias recibidas de todas las bandas para cada BS. En anexos se pueden observar los elementos con los que se miden dichas frecuencias y sus

especificaciones técnicas. Luego, para analizar las señales se gestiona una versión de prueba del módulo LTE del equipo Tektronix, lo que permite demodular la señal recibida para recoger más información.

Se muestra en la figura 30 la representación gráfica del posicionamiento de la antena respecto de la ventana y una fotografía de ejemplo de cómo se toman las medidas. La antena se asegura en un trípode y se sube a los escritorios para poder acercarse más a la ventana y tener un mayor ángulo de visión como se ve en la figura 31.

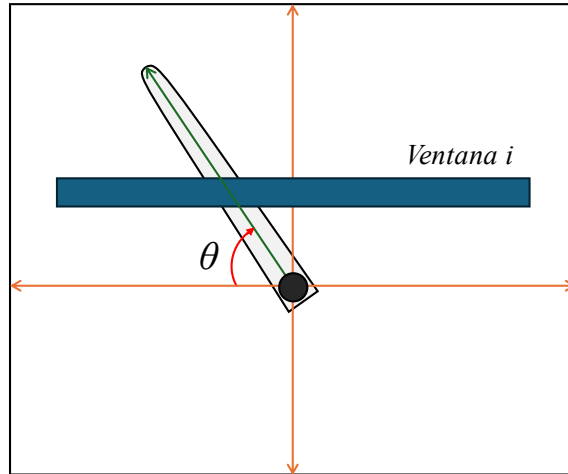


Figura 30. Representación gráfica de la medida antena.



Figura 31. Medida real en la Primera Campaña de Medidas.

Se muestra la detección de señales en las bandas B28, B5, B4, B2, B7 y en n78, en la figura 32, con un promedio de 10 muestras en SignalVU-PC.

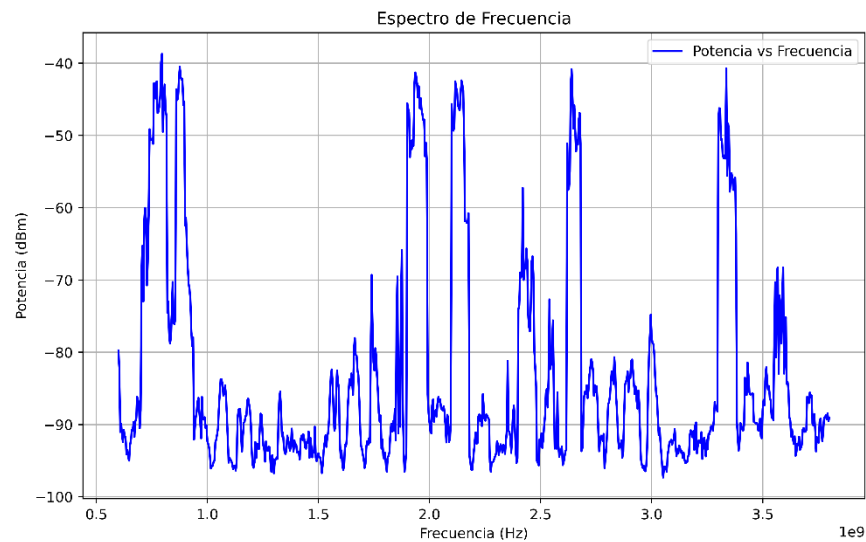


Figura 32. Medida tomada con el RSA306 y graficada con Python.

Para comprobar que las señales recibidas son efectivamente SRM, se hace uso del módulo LTE del equipo Tektronix. Para las señales en las bandas de LTE se puede confirmar su naturaleza como SRM, sin embargo, la señal en n78 no se logra modular, por lo que se descarta que sea una señal 5G SA. Este proceso de confirmación se hace para cada banda medida. En la figura 33 se muestra un ejemplo, en el cual se demodula una señal DL del operador Movistar en la banda AWS1, la cual tiene un ancho de banda de 15 MHz, comprobando que es una señal LTE.

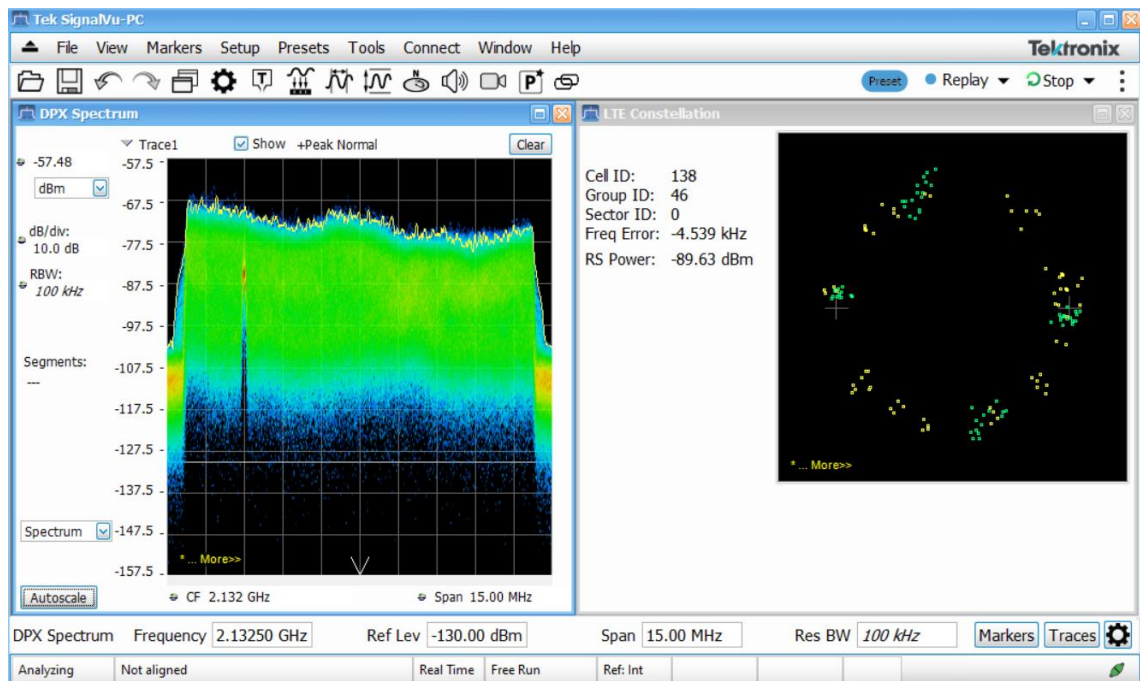


Figura 33. Identificación de señal LTE in sitio con RSA306B.

Todos los datos obtenidos son guardados en un CSV para cada una de las BS identificadas y luego son procesados con Python para generar una gráfica de barras general de las potencias medidas. Las barras que se observan en la figura 34 muestran la potencia promedio del DL de cada una de las señales emitidas por cada grupo de antenas identificado, esta potencia promedio es calculada en todo el ancho de banda dispuesto por ITU para cada banda. Cabe aclarar que la ganancia de la antena LDPA no se incluye en la medida, es decir, se resta para cada banda de frecuencia los 11 dBi de ganancia que la antena aporta a la señal.

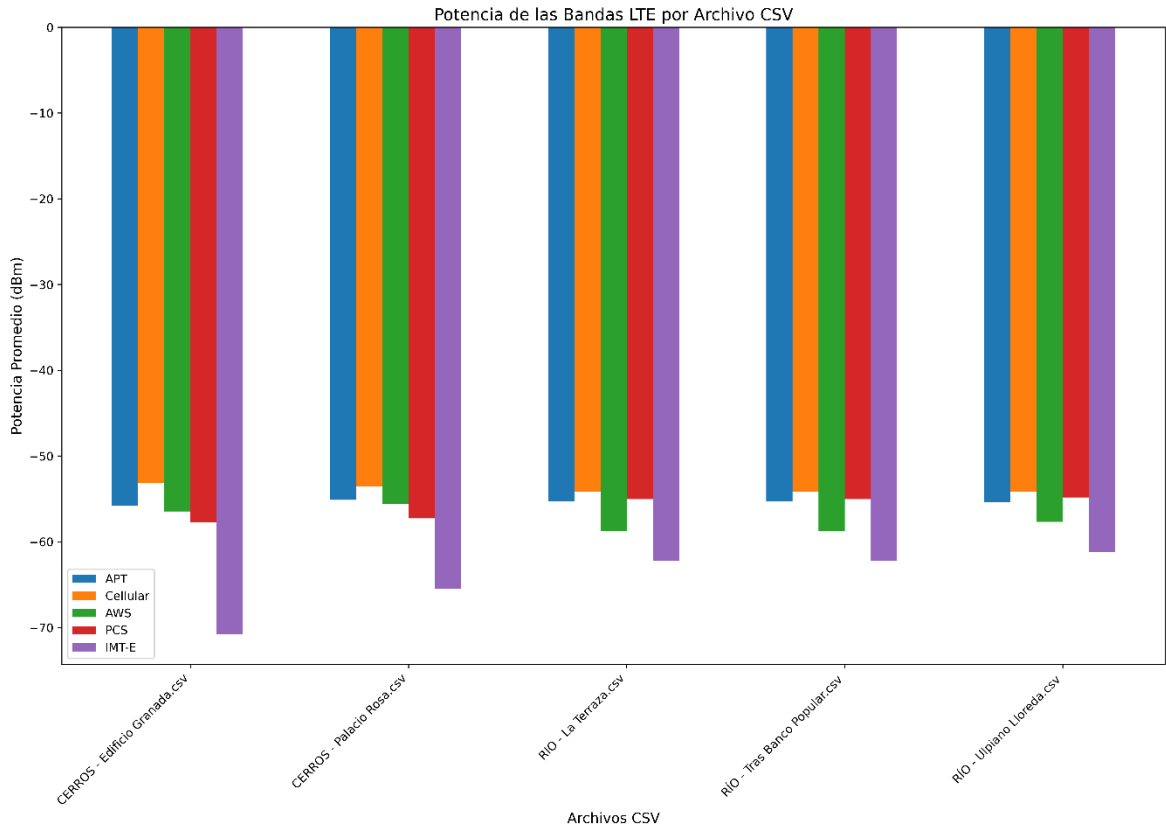


Figura 34. Medidas tomadas en el piso 10 con el RSA306.

4.4.5.3 Campaña de medidas con el UE

La campaña de medidas con el UE se realiza principalmente para contrastar el Relato General de Experiencia de Usuario con la realidad. Para esto, se usa la aplicación NCI con el UE de prueba y se toma el valor de RSRP en dos recorridos: el primero midiendo Movistar y Tigo haciendo uso de la bandeja doble SIM del UE; y el segundo midiendo Movistar y Claro. Con esto se busca tener una idea general de la calidad de señal a lo largo del piso con cierto grado de objetividad. Es importante mencionar que el dato de la potencia medida es la captura de pantalla de la aplicación NCI en el punto de medida. Las capturas de pantalla de las medidas y los puntos de medida se encuentran en anexos. En la figura 35 se muestra el recorrido tomado.

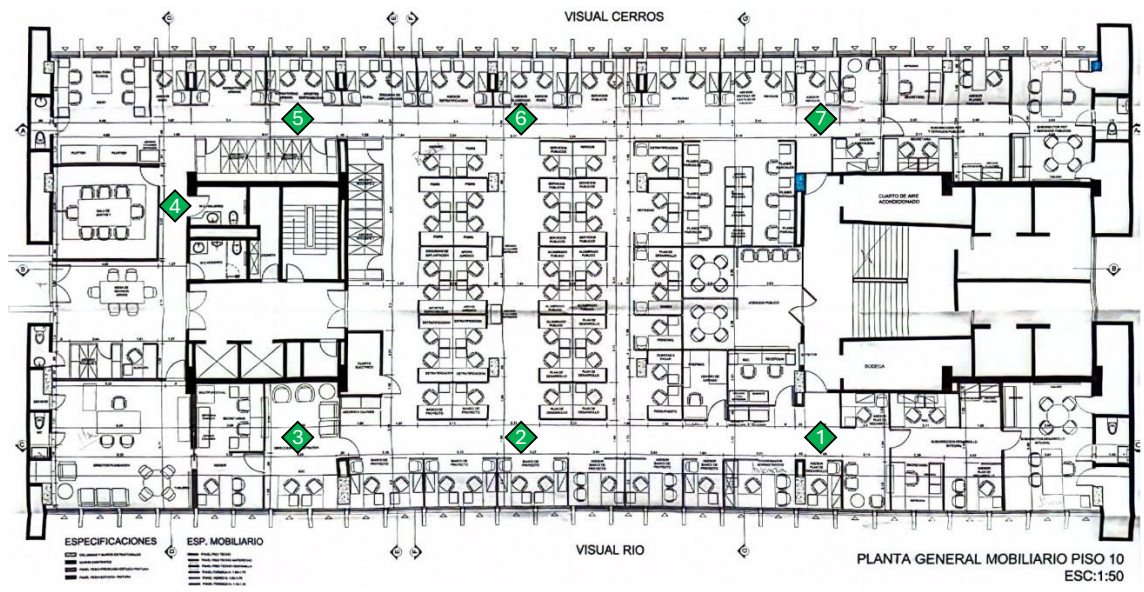


Figura 35. Recorrido de la Primera Campaña de Medidas.

Se deja claro que los datos en blanco en la tabla 16 indican que el UE no se conectó a una celda con dicha banda de frecuencia. Así, se verifica que, en el ala del Río, Movistar es el proveedor con peor calidad de señal, seguida por Claro y Tigo; en el ala de los cerros, la señal de Movistar mejora y se encuentra predominancia de la señal en la banda PCS, mientras Claro se mueve de señal media a buena, siempre en IMT-E y Tigo empeora un poco, pasando de PCS a AWS1. El mejor proveedor en general es Tigo, ya que tiene una calidad de señal más consistente en la extensión del piso. El segundo mejor proveedor es Claro, ya que el UE no tiene que conmutar constantemente entre bandas de frecuencia, como sí lo hace con Movistar. También, se puede observar que, las señales en PCS son más consistentes, mientras que AWS e IMT-E son altamente variables en potencia.

	Ubicación	Movistar AWS	Movistar PCS	Claro IMTE	Tigo AWS	Tigo PCS
Ala Río	Punto 1	-116	-112	-107		-90
	Punto 2	-116		-112		-103
	Punto 3	-103		-107		-94
Sala Juntas	Punto 4	-103		-113		-99
Ala Cerros	Punto 5	-103		-102		-100
	Punto 6		-94	-104	-108	
	Punto 7		-103	-106	-98	

Tabla 16. Medidas de RSRP con Network Cell Info a lo largo del edificio.

En la tabla 17 se promedian las medidas, para ver el grueso de la situación en términos del operador versus la zona del piso. De esta forma se comprueba que, para las señales más importantes para los usuarios, Claro y Movistar, el ala de los Cerros tienen mejores posibilidades de extensión, en términos de potencias y estabilidad. Además, se constatan diversas observaciones hechas por los usuarios en el Relato General.

Zona	Movistar	Claro	Tigo
Ala Río	-112	-109	-96
Sala Juntas	-103	-113	-99
Ala Cerros	-100	-104	-102

Tabla 17. Promedio general de las medidas en el piso.

4.4.5.4 Análisis de los Datos Recogidos

El primero de los hallazgos importantes de la campaña de medidas es que con el pasar de la primera mitad del mes de septiembre de 2024, se empieza a observar que la ORM, Claro, actualiza toda su infraestructura a 5G NSA, sin embargo, como se estima en la justificación de este proyecto, la QoS de dicha señal sigue teniendo mala calidad dentro del edificio, como se observa en la figura 36 (véase la potencia en IMT-E). Es así como se encuentra un potencial para extender al menos una señal 5G. Por ello y, siguiendo el relato general de los usuarios, se establece que las señales en IMT-E son obligatorias para mejorar en el piso.



Figura 36. Lectura de 5G NSA en el edificio.

Otro hallazgo importante es que se logra alcanzar un nivel de detalle mayor, en cuanto a las frecuencias utilizadas por los diferentes operadores principales alrededor del edificio, tanto en AWS, como en IMT-E. Se plantea en la tabla 18 dichos parámetros técnicos hallados durante la campaña de medidas.

Operadora de Red Móvil	Banda (Nomenclatura ITU)	Frecuencia Central (MHz)	Ancho de banda (MHz)
Claro	IMT-E	2669,6	20
Movistar	AWS	2132,5	15
Tigo	AWS	2147,5	15

Tabla 18. Frecuencias centrales y ancho de banda de las diferentes ORM.

En cuanto al análisis del contexto, ahora con las medidas, se puede teorizar que la baja QoS del servicio en el piso se da por un bajo índice de penetración de la señal, en primera instancia, causada por los materiales de construcción del edificio. La presencia de concreto sólido provoca que la señal se absorba y, donde no se da este efecto de absorción por el concreto, hay reflexión, debida al material del polarizado de las ventanas. En segunda instancia, es altamente probable que la geometría de los ventanales también influya, disminuyendo la potencia de la señal. Además, en el interior, la presencia de numerosos materiales que absorben la señal como

columnas, asientos, armarios metálicos, puertas metálicas y algunos accesorios y escritorios de madera empeoran la situación para el usuario.

Dicho lo anterior, la inestabilidad de servicio y, en general, la opinión desfavorable de los usuarios sobre las SRM en el piso, más concretamente en el ala del Río, se da debido a: 1) una alta densidad de BS, consecuencia de la naturaleza de la zona del Centro de Cali; 2) la lejanía de las estaciones base, debido a que cerca del Río Cali no hay antenas; y 3) los materiales de construcción del edificio, pues se trata de concreto de alta dureza. Se infiere que, en medio la numerosa presencia de BS y la baja potencia recibida dentro del piso desde estas, el UE no encuentra la manera de conectarse a la mejor. Es decir, entre opciones de baja calidad, el UE entra en un ciclo de numerosas conmutaciones, a razón de no encontrar señales de buena calidad, lo cual se traduce en una percepción de inestabilidad en el servicio. Existe una antena en dirección norte, donde se encuentra el edificio de la DIAN, sin embargo, la señal proveniente de dicha BS no irradia correctamente todo el piso, ya que esta es la zona más densa en cuanto a materiales reflectivos y paredes.

De este modo se puede afirmar que el relato del cliente coincide con la campaña de medidas, por lo que se podría afirmar que es técnicamente coherente y reafirma la necesidad de mejorar Movistar y Claro. Igualmente, el relato y los datos indican que no es necesario mejorar Tigo. Por otra parte, se observa que es posible que el ala del Río no sea conveniente para el radioenlace del *backhaul*, debido a la alta densidad de usuarios a los que sirven los proveedores, teniendo riesgo de saturación. Sin embargo, el ala de los cerros no tiene presencia de las señales de Movistar en AWS, pero sí de claro en IMT-E, por lo que podría ser descartada.

Dicho lo anterior, se reafirma que las bandas de frecuencia que mayores problemas presentan dentro del piso son Movistar en AWS1 y Claro en IMT-E. Además, se reafirma como obligatorio para este proyecto extender IMT-E, debido a que ya se usa para 5G NSA, entregando una excelente QoS. Por otra parte, se observa que la mejor banda a extender podría ser PCS, pues los tres operadores principales la ocupan y es la que menores pérdidas presenta, comparada con IMT-E y AWS en el DL. Por lo tanto, se decide adquirir equipos que amplifiquen dos entre las tres bandas identificadas: IMT-E, PCS y/o AWS1. La selección entre las combinaciones posibles depende de la disponibilidad de los amplificadores en el mercado. Finalmente, el *backhaul* debe ser instalado en el piso 11 para evitar efectos de realimentación en el amplificador.

4.4.6 Selección del amplificador de señal

Al revisar exhaustivamente, se encuentra que, Amazon y MercadoLibre, los dos proveedores principales en internet ofrecen amplificadores de RF como los necesitados, a precios muy poco competitivos, además de ser todos de procedencia china. De este modo, se busca directamente en tiendas de revendedores chinos en Aliexpress, siguiendo principalmente el criterio de la calificación de la tienda por parte de los usuarios, de modo que la calidad del producto esté respaldada por opiniones de clientes reales. La calificación de la tienda debe ser mayor al 80%. Por otra parte, se encuentra que una de las marcas mejor referenciadas y con mayores certificados de calidad internacional es Lintratek, de este modo se cierra la búsqueda a los amplificadores de este proveedor.

Es importante aclarar que una de las opciones de compra implica la adquisición de dos amplificadores monobanda conectados a la misma línea de transmisión a través de divisores y combinadores, dada la dificultad de encontrar equipos que amplifiquen las bandas de interés, pero que, a su vez, no incluyan bandas no seleccionadas en la sección anterior. Dicha opción se refuerza, debido a la experiencia y recomendación de [81], en la cual se llega, entre otras, a la conclusión de que un amplificador monobanda es más favorable en términos técnicos que uno multibanda por dos razones: la distribución de la ganancia comercialmente anunciada y el equilibrio de ganancias en cada banda. Se observa en dicho trabajo que no es recomendable fiarse de las fichas comerciales de dichos amplificadores, indiferentemente de la tienda en la que se adquiera, pues la ganancia anunciada no corresponde con la ganancia real. Lo que normalmente ocurre es que la ganancia anunciada del amplificador en la ficha técnica es la suma de la ganancia de cada una de las bandas amplificadas. No solo lo anterior, también se observa que las ganancias no se distribuyen uniformemente, según la calidad

del fabricante, por lo que se podría llegar a dar que, al final de la implementación, hayan ORM que no mejoren su QoS. Finalmente, se sugiere en el citado trabajo que estos amplificadores multibanda suelen tener mayores rizados y peor calidad de amplificación, por su complejidad de construcción.

Ahora, se informa que se descarta el mejoramiento de la banda PCS, la banda más favorable, debido a que se agotaron en la época de compra todos los amplificadores PCS en la página, por lo que las opciones se reducen a IMT-E y AWS. Con esto en mente, se plantean los criterios de selección, el peso de cada uno y se realiza el proceso de selección en el que se concluye que la opción más acertada para este contexto es el paquete de dos amplificadores monobanda Lintratek KW16L, como se observa en la tabla 19. El primero amplifica la banda AWS y el segundo, IMT-E. Así, se asegura que se extiendan las señales de los proveedores que figuran en el relato de experiencia de usuario. Cabe aclarar que se mejoran otras ORM, debido al ancho de banda que amplifica el producto seleccionado.

Los contras de esta opción son claros, pues acarrea mayores costos en accesorios de RF. Sin embargo, algunos de los pros de esta opción son la posible ampliación del sistema una vez implantado 5G SA, simplemente adquiriendo un amplificador en otra frecuencia y reemplazando el que menor convenga o ambos; y la continuidad de servicio, dado que, si alguno de los dos amplificadores llegase a fallar, el otro respaldaría a los usuarios, mientras se adquiere uno nuevo. Es importante tener en cuenta que se seleccionan amplificadores en el orden de los 5 a 10 W, es decir, amplificadores pequeños, debido a la baja potencia irradiada requerida, de acuerdo con los modelos de propagación. Es decir, el modelo I-MKM, sugiere una amplificación de orden bajo, comparado con otros equipos del mercado, los cuales tienen mayores precios y ganancia.

		Lintratek KW20L	Lintratek KW16L	Lintratek 2019	
Ponderaje	Criterio	Opción 1	Opción 2	Opción 3	
5	Ganancia Amplificador	70	65	65	
5	Potencia de Salida	20	16	20	
5	Bandas de Frecuencia	B28, B7, B5, B4, B2	B7,B4	B7, B5	
5	Dimensionamiento	Sobredimensión	Correcto	Subdimensión	
4	Certificaciones	ROHS/CE/ISO	ROHS/CE/ISO	ROHS/CE/ISO	
5	Disponibilidad en falla	Interrupción servicio	Un operador activo	Interrupción	
	ios RF	2 Cables coaxiales, 4 conectores	6 Cables coaxiales, 12 conectores y 2 splitters	2 Cables coaxiales, 4 conectores	
4	ación	Baja	Mediana	Baja	
1	Consumo de Energía	15W	10 W	15W	
3	Estimación Accesorios RF	\$ 696.000,00	\$ 1.003.000,00	\$ 696.000,00	
5	Costo Equipo	\$ 693.000,00	\$ 385.000,00	\$ 411.000,00	
5	Costo de Envío	\$ 382.000,00	\$ 279.000,00	\$ 279.000,00	
5	Valoración Tienda (encima de 90%?)	92,4%	92,4%	83,1%	
4	Total	\$ 1.771.000,00	\$ 1.667.000,00	\$ 1.386.000,00	
5	Llegada al País	12-oct	12-oct	12-oct	
Calificación			Puntaje		
Opción 1	Opción 2 (Sin PCS)	Opción 3 (Sin PCS)	Opción 1	Opción 2 (Sin PCS)	Opción 3 (Sin PCS)
5	5	5	25	25	25
5	4	5	25	20	25
5	3	3	25	17	17
2	3	3	8	17	17
5	5	5	20	20	20
0	3	0	0	15	0
5	0	5	15	0	15
5	4	5	20	16	20
4	5	4	4	5	4
5	3	5	15	9	15
0	5	5	0	25	23
0	5	5	0	25	25
5	5	0	25	25	0
0	3	5	0	12	20
5	5	5	25	25	25
			207	255	250

Tabla 19. Proceso de Selección de Amplificador.

Una vez adquirido el amplificador elegido se mide en el analizador vectorial de redes con el director del proyecto, encontrando los siguientes resultados (figura 37 y 38). Se aclara que se pone un atenuador de 10 dB en la salida del amplificador, lo que modifica la amplitud del DL y un atenuador en la entrada que atenúa en aproximadamente 4 dB el UL. Otro detalle que es necesario aclarar es que la importación del equipo y su paso por aduanas acarreó un impuesto de 130 000 \$ pesos colombianos (COP).

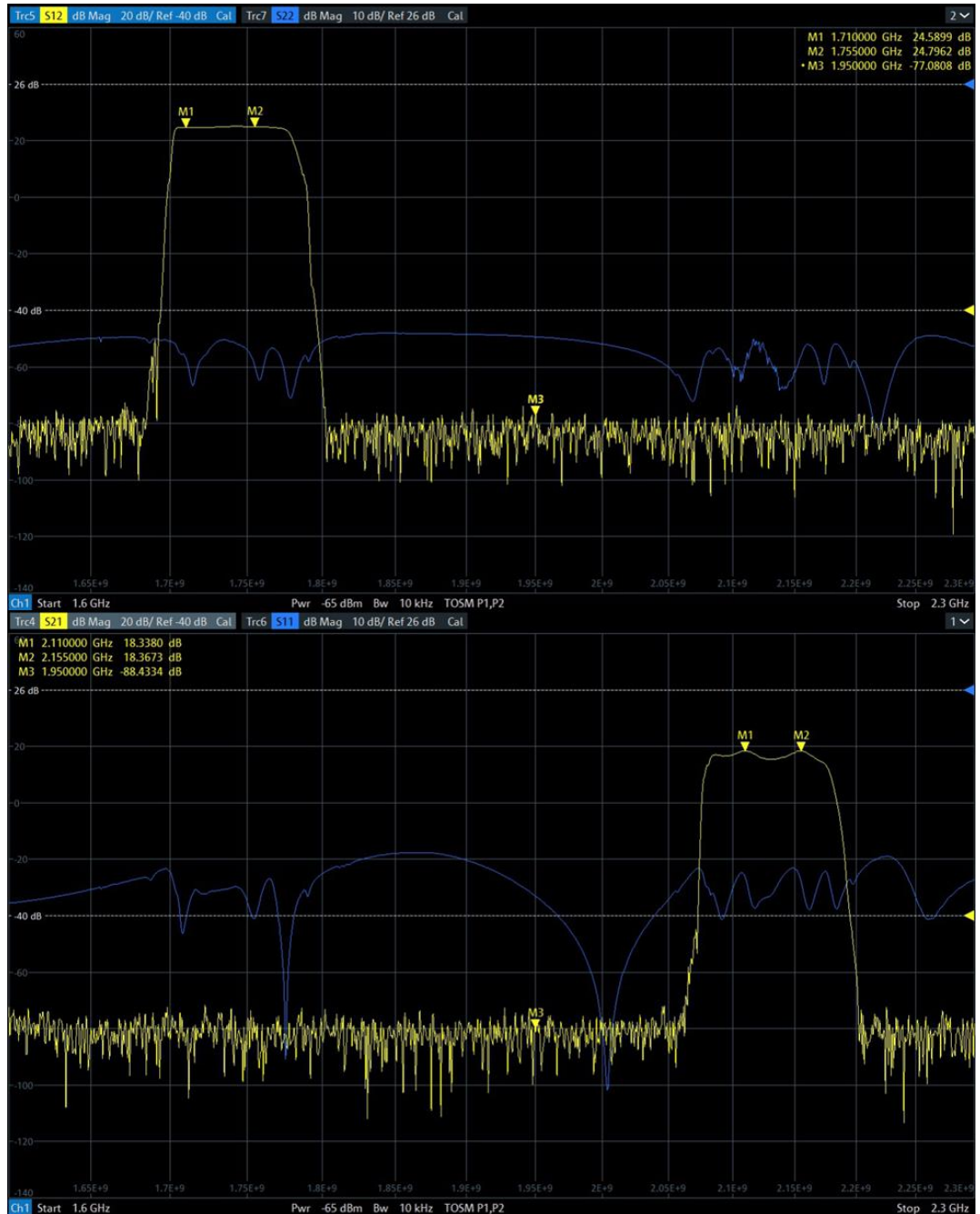


Figura 37. Amplificador AWS (arriba UL; abajo, DL).

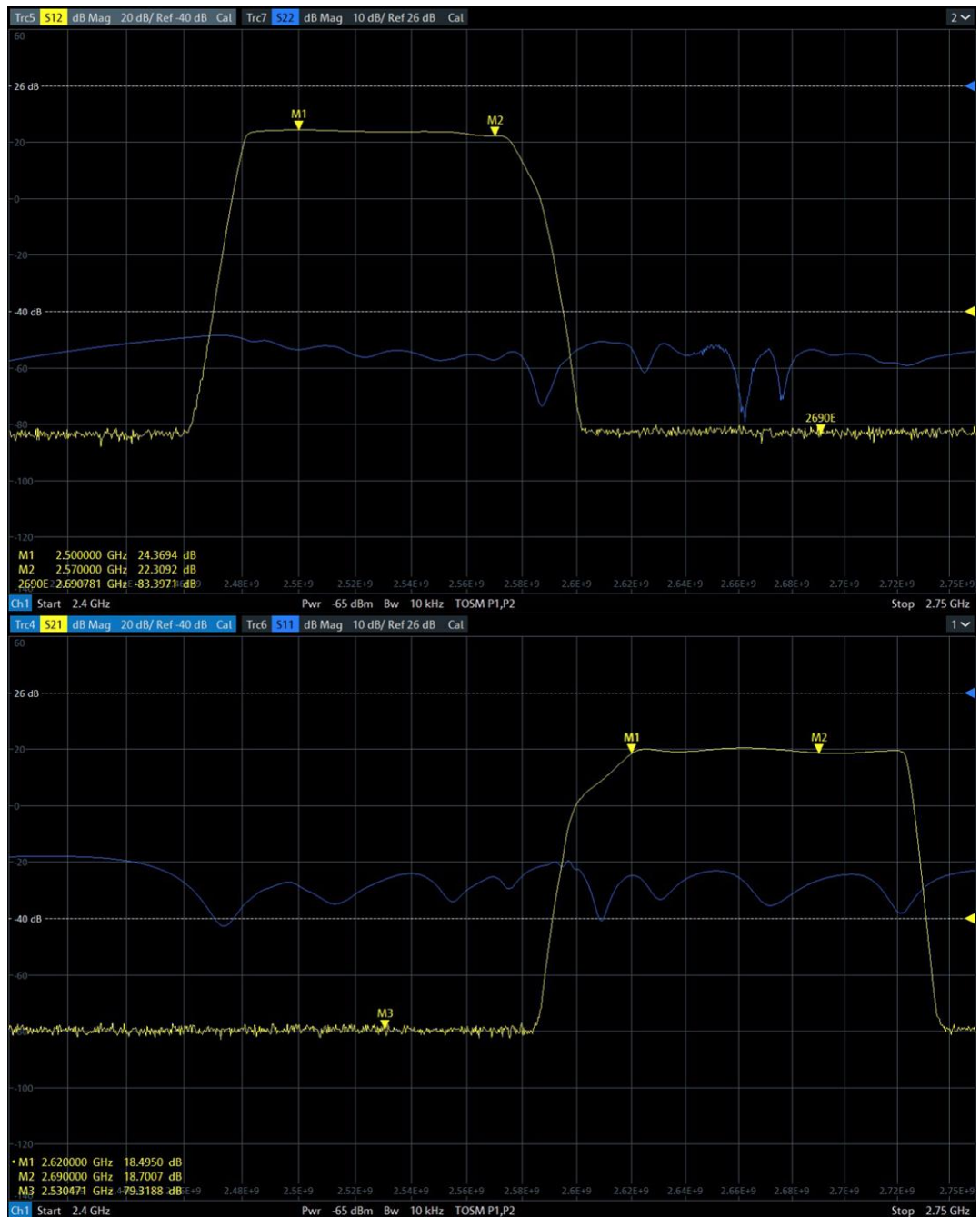


Figura 38. Amplificador IMT-E (arriba UL; abajo DL).

De esta forma se caracterizan todos los amplificadores como se muestra en la tabla 20.

Banda Amplificada	UL (Parámetro S21)	DL (Parámetro S12)
AWS	28,7 dB	28,4 dB
IMT-E	27,3 dB	28,6 dB

Tabla 20. Ganancias de los amplificadores.

Si se compara la ficha técnica del amplificador, mostrada en la tabla 19, y se suma la ganancia de las bandas de amplificación de cada amplificador, se obtiene un valor aproximado a 57 dB. Lo que implica que la ficha técnica de los KW16L sobreestima la ganancia de los equipos y se confirman las conclusiones de [81]. La ficha técnica física de los equipos, entregada en el paquete, se muestra en anexos.

4.4.7 Diseño general de la solución

4.4.7.1 Selección de los accesorios de radiofrecuencia

Dada la selección del amplificador, se adquieren los accesorios para la implementación del sistema. Los equipos seleccionados son los mejores calidad-precio encontrados. Estos dispositivos se adquieren por Amazon, por su calidad de dispositivos tiempos de entrega y política de devolución. En la tabla 21 se revisa el presupuesto y características de dichos accesorios.

Accesorio RF	Pérdida	Cantidad	Precio Unitario	Envío	Total
Cable coaxial RG8/LMR400 - 100 ft/30 m	L (@ 2.5 GHz) = 0,2165 dB/m	1	\$ 352.500,00	\$ 85.000,00	\$ 437.500,00
Conector SMA Macho RG8 Crimp x10	Despreciable	1	\$ 112.000,00	\$ -	\$ 112.000,00
Conector N Macho RG8 Crimp x5	Despreciable	1	\$ 83.000,00	\$ -	\$ 83.000,00
Crimp Tool - Ponchadora RG8 LMR400	NA	1	\$ 100.000,00	\$ -	\$ 100.000,00
Splitter ZD TECH tipo N 2 a 1 (700-2700 MHz)	3 dB/salida	2	\$ 135.000,00	\$ -	\$ 270.000,00
				Total	\$ 1.002.500,00

Tabla 21. Lista de accesorios RF.

Las figuras 39 y 40 muestran parte de la caracterización en radiofrecuencia de los divisores, usando el VNA, donde se observa que están dentro de los parámetros anunciados. Al ser una red de tres puertos, se usa una carga de 50 ohm para conectarla en el puerto sobrante, teniendo en cuenta el principio de superposición. Esta prueba se hace idéntica para ambos *Splitters*, obteniéndose resultados idénticos. En primera instancia, la prueba de aislación entre puertos de la figura 39 es exitosa y se puede observar que los parámetros S21 y S12 se mantienen por debajo de -20 dBm. Esto es un indicador de calidad de construcción del dispositivo, pues indica que no habrá señales anómalas en los canales de los amplificadores.



Figura 39. Prueba de aislamiento de puertos.

Por otra parte, en la prueba de señal directa de la figura 40, entre entrada y salida, se observa una respuesta aproximadamente plana y bidireccional con pérdida de 3 dB (S12 y S21 son casi idénticos). Esto es un buen indicador, pues el equipo se puede modelar como un divisor/combinador ideal, teniendo en cuenta la pérdida en ambas direcciones.

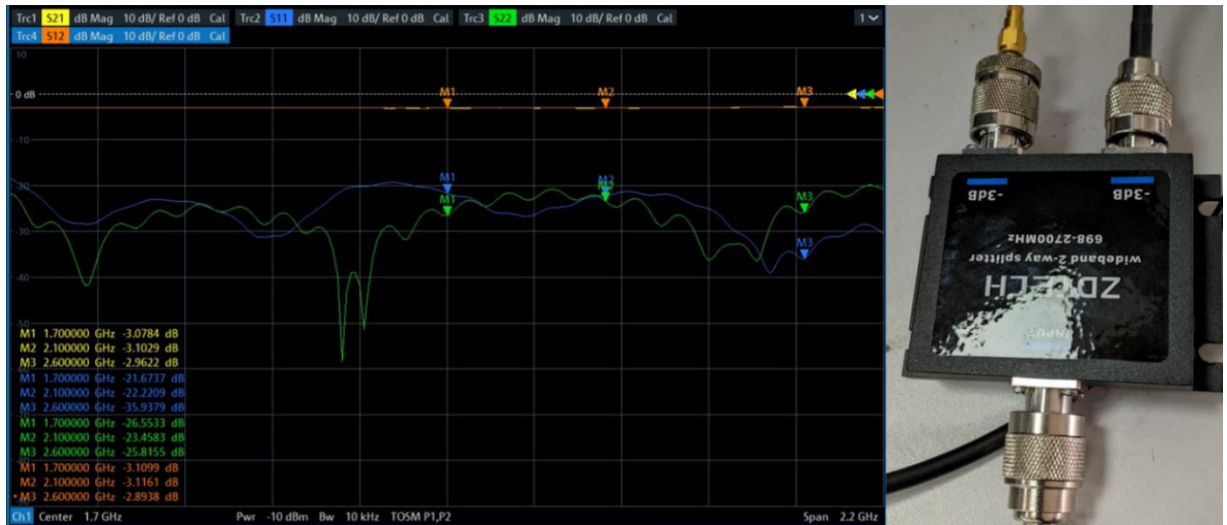


Figura 40. Paso directo e inverso de la señal.

4.4.7.2 Selección de Antenas

Las antenas seleccionadas son aquellas que se usaron para la campaña de medidas, debido a su calidad de construcción y ganancias, las cuales son suficientes para este contexto. La primera es una antena direccional logarítmico-periódica (LDPA) enfocada a telefonía y WiFi de la marca ZDTECH. La segunda es una antena omnidireccional para techo de tipo domo, de la misma marca que la primera y misma característica de frecuencias que la primera. En la figura 41 se pueden observar ambas antenas. Se aclara que la adquisición temprana de las antenas se da debido a que las del laboratorio de la universidad no cuentan con el ancho de banda que se requiere en este proyecto.



Figura 41. Antena LDPA y omnidireccional, extraído de Amazon.

La ficha técnica de estas antenas se encuentra en anexos 2. La primera tiene una ganancia de 11 dBi y la segunda tiene una ganancia de 5 dBi. Luego, al medir el coeficiente de reflexión e impedancia con el VNA para estas antenas (figura 42 y 43), se puede observar que tienen desacoples en las frecuencias de interés, sin embargo, las desviaciones son aceptables dentro de lo esperado. Analizando los valores arrojados por el VNA, especialmente en la antena LDPA, se puede entender la razón por la cual, en la campaña de medidas, la señal en IMT-E es menor que otras señales.

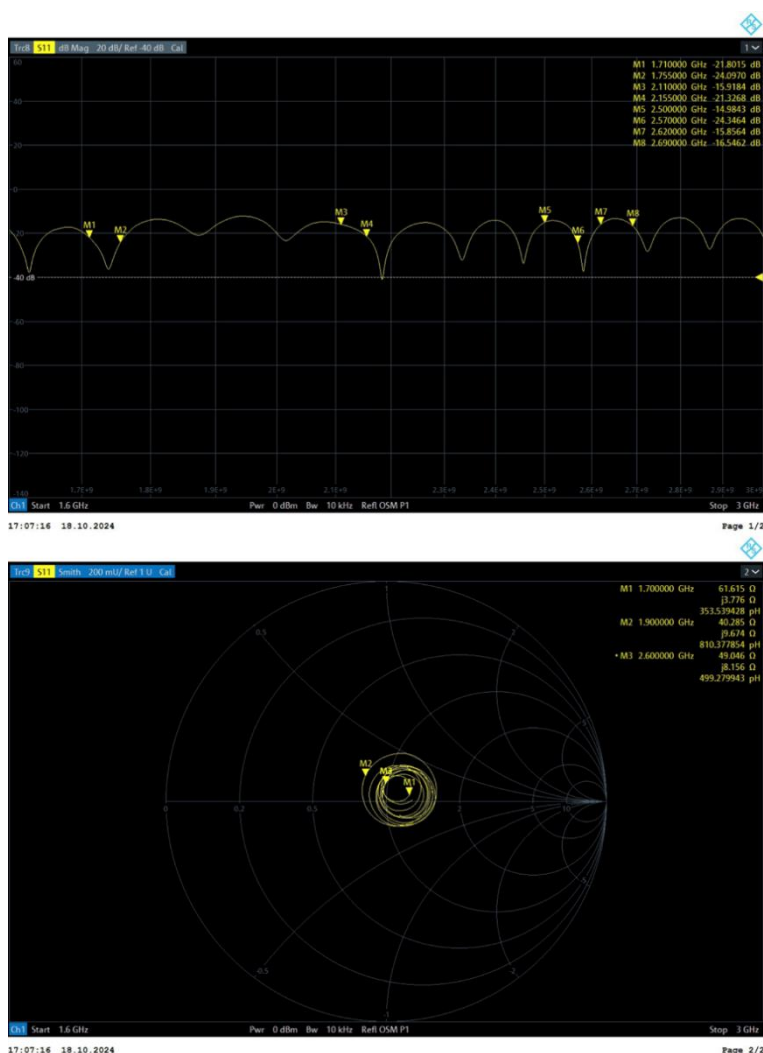


Figura 42. Caracterización de la antena LDPA.

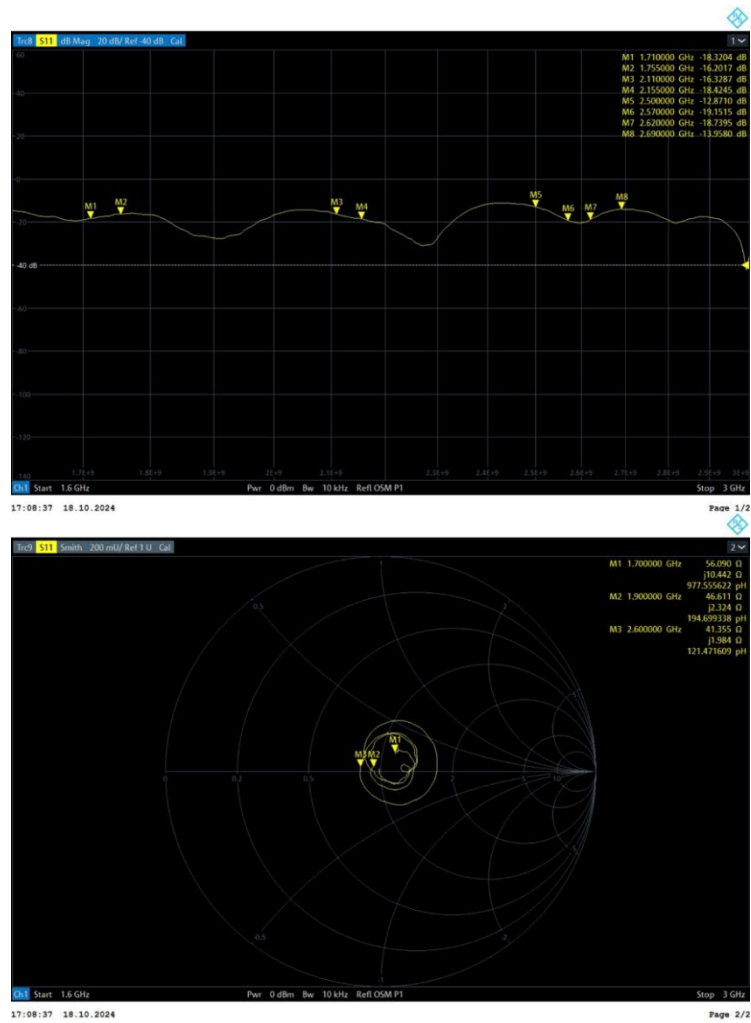


Figura 43. Caracterización de la antena omnidireccional.

4.4.7.3 Diagramado de la solución

Se procede a realizar el diagrama general del sistema, como se observa en la figura 44. El tamaño de los cables se establece in situ, con el criterio de calidad de señal dado por la relación señal ruido de la señal de referencia (RSSNR) detectada en el UE con NCI.

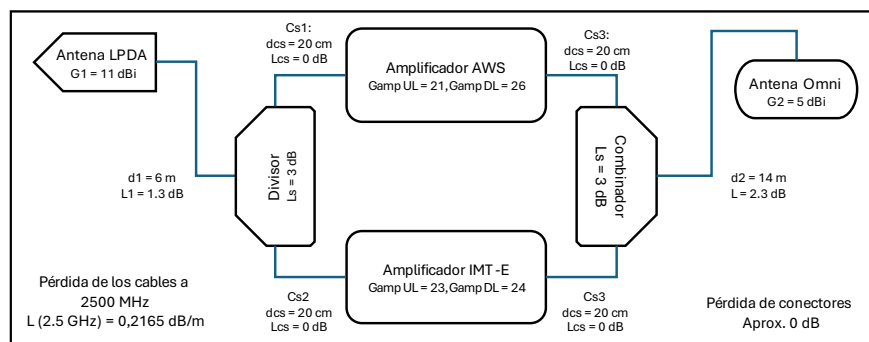


Figura 44. Diagrama en detalle del sistema.

Ahora, el sistema descrito en la figura 44 se ensambla desde el divisor, hasta el combinador y se miden sus parámetros S con el analizador vectorial para caracterizarlo, como se ve en la figura 45. Es decir, se caracteriza de manera separada la etapa procesadora o amplificadora del sistema.



Figura 45. Sistema sin antenas conectado al VNA.

Ahora, en la figura 46 se muestra la configuración del bloque procesador de la señal, el cual fue medido con el VNA. Se observa que se tienen ganancias diferentes a las anunciadas en la ficha técnica.

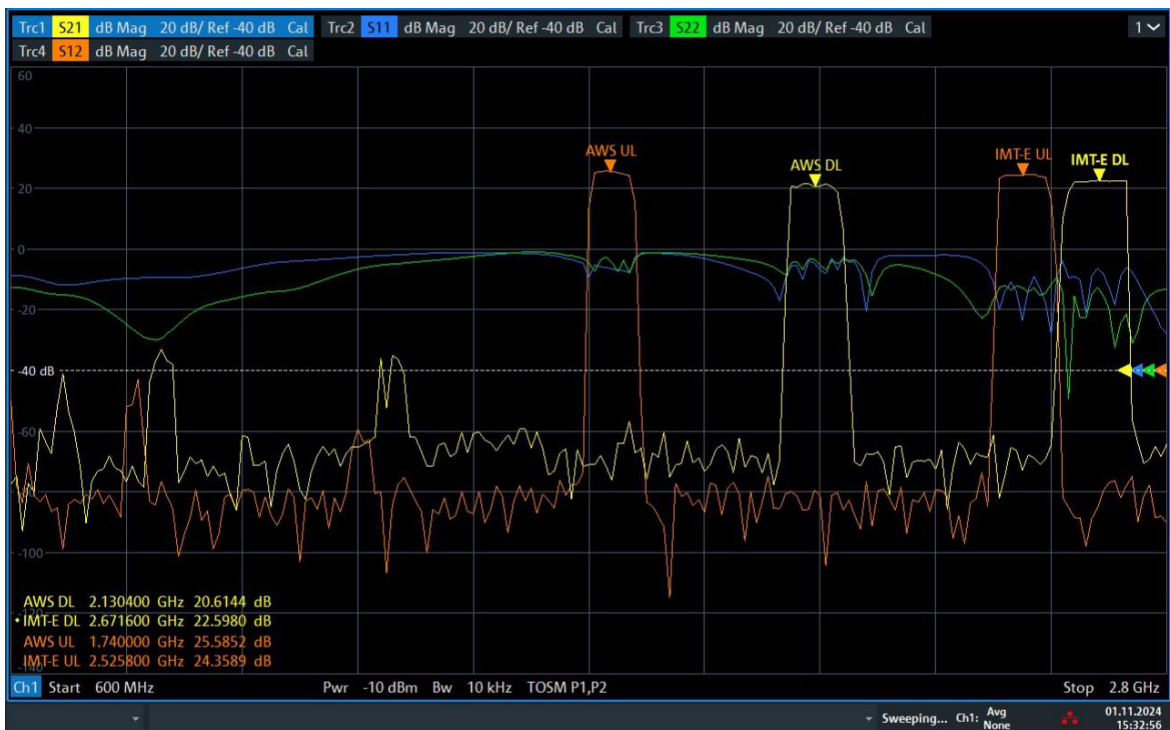


Figura 46. Medida del bloque amplificador con el VNA.

4.4.7.4 Caracterización del sistema

Con las medidas obtenidas, se procede a caracterizar el sistema para estimar los mapas de calor reales en cada una de las frecuencias usadas por cada ORM. Se aclara que el análisis de potencias se construye únicamente con los valores medidos del parámetro S21, o la respuesta en frecuencia del DL del sistema, de modo que se puede hallar una potencia transmitida estimada para calcular el mapa de calor correctamente. Ahora, se muestra la fórmula con la cual se caracteriza el sistema en términos de la potencia, teniendo en cuenta cada elemento de manera individual.

$$P_t - P_r = G_1 + G_{amp} + G_2 - L_{C1} - L_{C2} - 2 * L_c - 2 * L_s$$

Esta fórmula se simplifica con la caracterización del sistema anteriormente hecha, de modo que se puede ver el bloque amplificador así:

$$G_{block} = G_{amp} - 2 * L_c - 2 * L_s$$

Por lo tanto, la fórmula del sistema completo se ve así:

$$P_t - P_r = G_1 - L_{C1} + G_{block} - L_{C2} + G_2$$

Luego, se hace el balance de potencias como se muestra en la tabla 22, de modo que se descubre la ganancia total del sistema.

Banda Amplificada	G ₁ (dBi)	L _{C1} (dB)	G _{block} (dB)	L _{C2} (dB)	G ₂ (dBi)	G _{total} (dB)
AWS	11	1	21	2	5	34
IMT-E	11	1	23	2	5	36

Tabla 22. Caracterización general del sistema.

Ahora, se establece la fórmula de la potencia transmitida del sistema.

$$P_t - P_r = G_{total}$$

$$\Rightarrow P_t = G_{total} + P_r$$

A dicha fórmula se le ingresa la potencia recibida de la señal de cada ORM, en el sitio final en el cual se instala el *fronthaul*. En la figura 47 y 48 se pueden observar las potencias de cada banda específica en el DL de Movistar y Claro, además de otras ORM. Cabe aclarar que la captura de la potencia se realiza conectando la antena en sitio al RSA 306B con sus cables predeterminados, detección tipo AVG (VRMS), configurando la captura con un promedio de 10 muestras, de modo que se establezca la potencia promedio recibida.

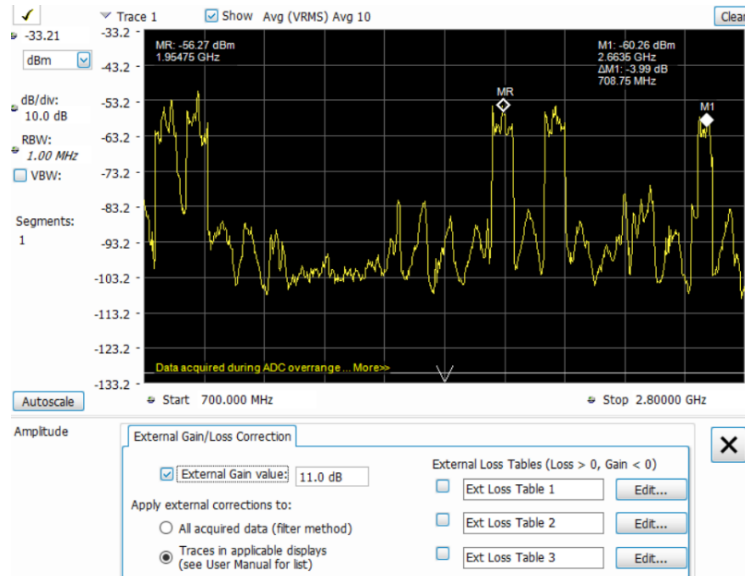


Figura 47. Medidas en Fronthaul con RSA306B.

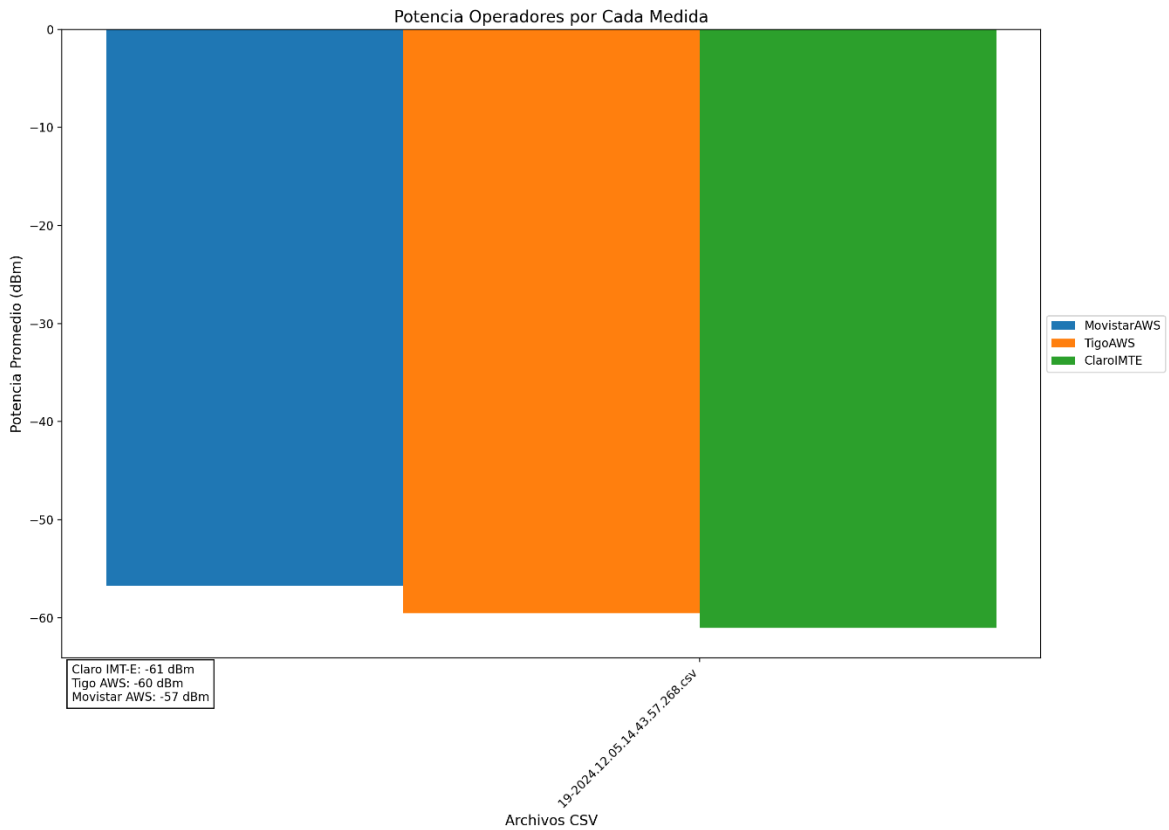


Figura 48. Potencias Recibidas de cada ORM en el backhaul en sitio final.

Como paréntesis importante, en este punto de la implementación se encuentran grandes dificultades para la extensión de la señal AWS, debido a que la señal que llegaba al sistema tenía muy mala calidad, generando interferencias dañinas para el servicio. Por ello, a partir de este momento, solo se hace referencia a la mejoría de la señal de IMT-E. El equipo en AWS se deja apagado para evitar desmejorar el servicio.

Ahora, como se tiene que la potencia recibida de Claro en PCS e IMT-E es de aproximadamente -61 dBm, según la figura 48, las potencias transmitidas para el modelo son:

$$P_{t_IMTE} = -25 \text{ dBm}$$

$$P_{t_AWS} = -23 \text{ dBm}$$

Estos valores de potencia transmitida se usan para el análisis de la siguiente sección. Se muestran las evidencias de la instalación final en la figura 49.



Figura 49. Instalación Final de los Equipos.

Pruebas y Análisis de Resultados

5.1 Campaña de medidas final

Al terminar la implementación se realiza una campaña de medidas final realizando el recorrido propuesto en la figura 50. Los elementos de medida son la aplicación NCI en el UE descrito en otras secciones y el equipo RSA 306B con su antena monopolo.

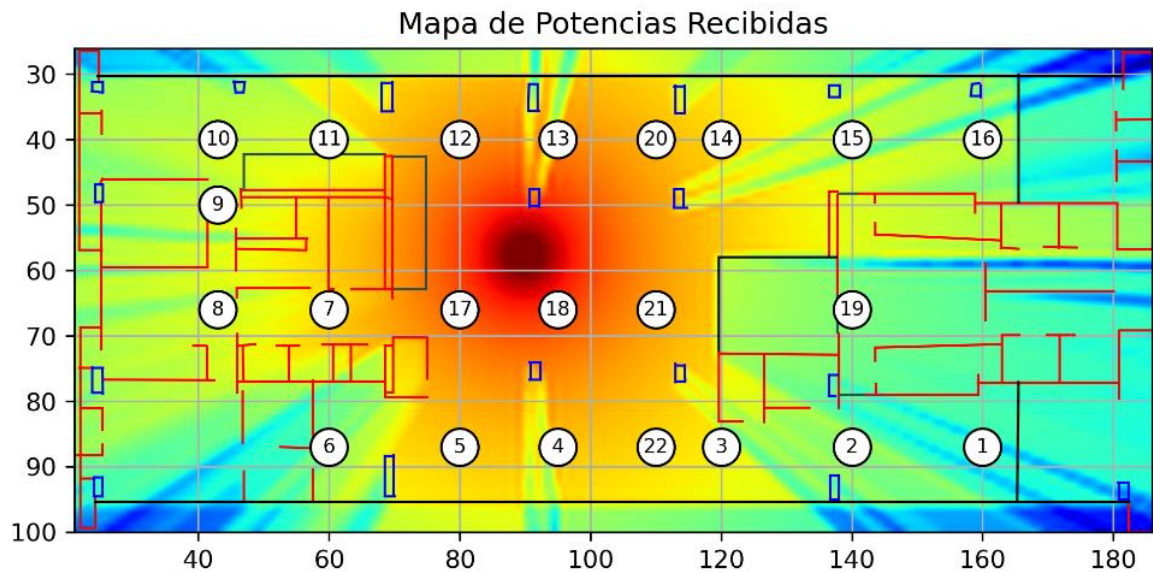


Figura 50. Recorrido Realizado para las Medidas.

Ahora, en la implementación del modelo I-MKM realizada, con la cual se pretende mejorar las estimaciones de pérdidas para el presente contexto, se tiene en cuenta el valor inverso del coeficiente de transmisión del rayo que atraviesa el material, para esto se muestran en la figura 51 los valores de pérdida en función del ángulo de inserción del rayo transmitido para cada tipo de material. El denominado coeficiente de pérdidas (que es simplemente el inverso aditivo del coeficiente de transmisión) para cada material se construye usando las recomendaciones en ITU-R. 2040 [67] y se muestra a continuación.

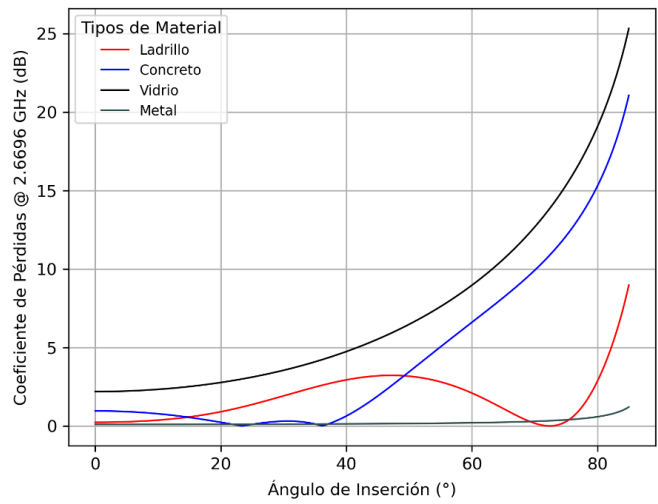


Figura 51. Pérdidas por tipo de material vs ángulo de inserción.

Luego, se realizan los mapas de calor según el MKM (figura 53), I-MKM (figura 54) e ITU (figura 55) para la ORM objetivo de este proyecto. Además, se muestra el mapa de distancias para referencia (figura 52).

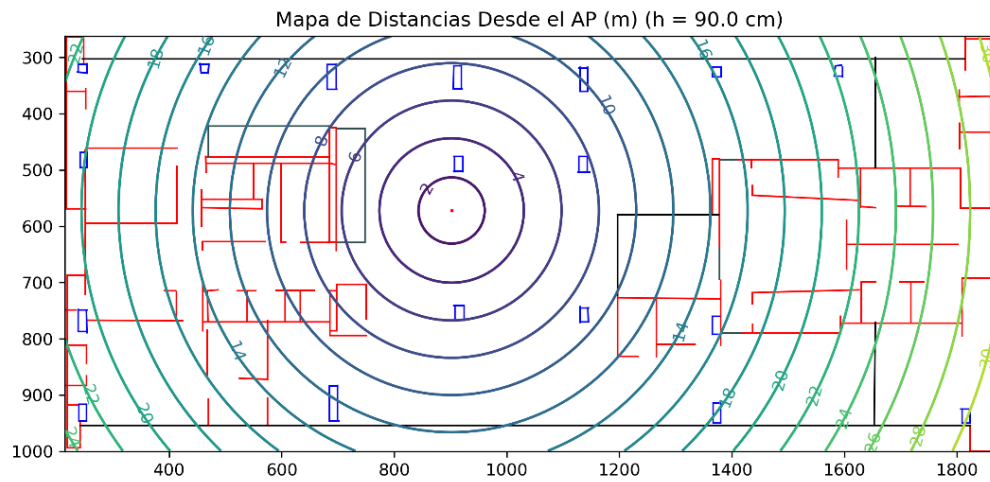


Figura 52. Mapa de distancias generados por los mapas RSSI.

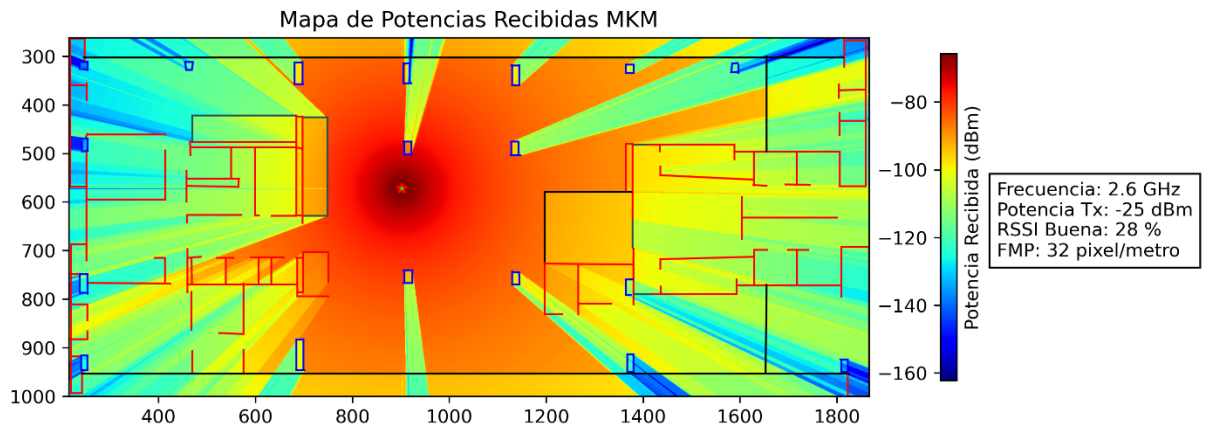


Figura 53. Mapa de Calor para Claro según MKM.

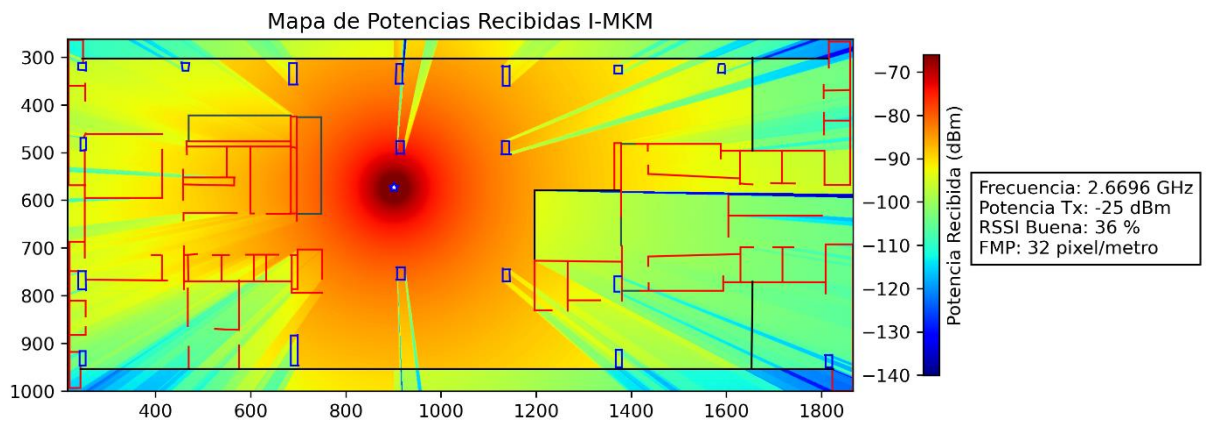


Figura 54. Mapa de calor puro de Claro según I-MKM.

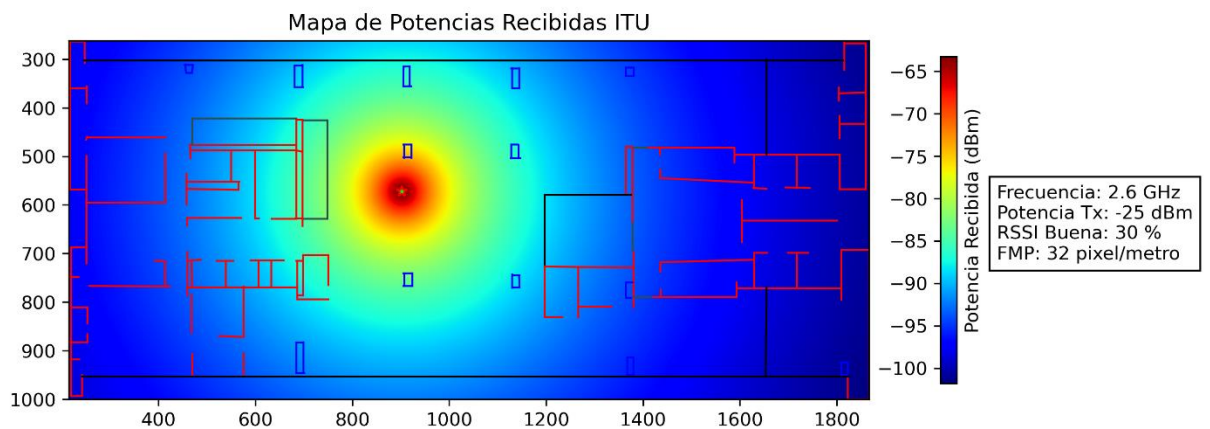


Figura 55. Mapa de calor puro de Claro según ITU 1238.

Ahora, con el código realizado para generar los mapas de calor, se extraen las muestras en cada uno de los puntos del recorrido. Cabe aclarar que los mapas de las figuras anteriores (53 a 55) están compuestos por una cantidad excesiva de puntos. Estos están directamente relacionados con el sistema coordenado del plano en

formato CSV, lo que provoca la necesidad de re-escalar el sistema coordinado teórico a uno de menor resolución. Como se menciona en secciones anteriores, el código es capaz de calcular dicho factor de conversión al preguntar la equivalencia de tamaños en el plano. Luego, este sistema coordinado se redimensiona con dicho factor de conversión, ajustando los modelos de propagación a la realidad. En el código, dicho factor de conversión se denomina Factor Metro-Píxel (FMP) o simplemente factor de conversión. El mapa de calor original tiene FMP igual a 32 píxel/metro, es decir, 32 píxeles de la imagen representan un metro. Esto se reduce 10 veces, de modo que se crea un mapa promediado, en el cual cada punto se asemeja a la escala de señal que miden los equipos usados. En la figura 56 se muestra un mapa con el recorrido de medidas y la extracción de valores de cada punto. Este proceso se hace para los dos modelos, con el fin de compararlos.

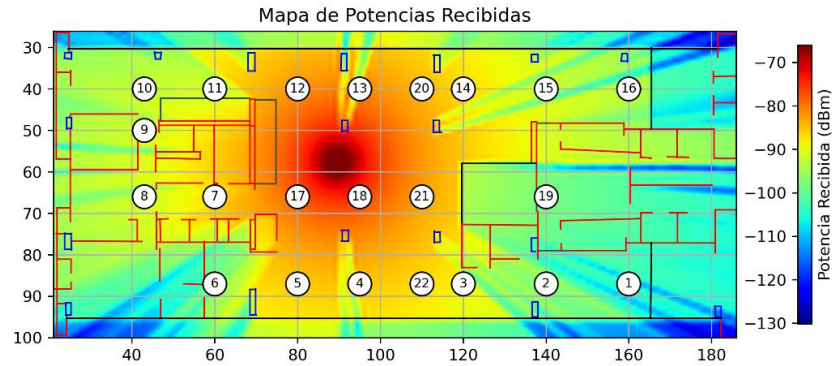


Figura 56. Extracción de datos para IMT-E (I-MKM).

Luego, como se observa en la figura 57, se toman medidas a lo largo del edificio en la trayectoria de los puntos descritos en la figura 56, haciendo uso de Network Cell Info en el UE y el RSA 306B, teniendo en cuenta en los modelos la distancia entre los equipos y la antena domo, la cual es de 90 cm como se ve en el mapa de distancias.



Figura 57. Toma de una muestra con RSA306B.

Cable resaltar que las capturas del RSA 306B son tomadas con la detección AVG (RMS) y un promedio de solo 5 muestras para no acumular potencia extra en las medidas y se trata de mantener el monopolo del RSA306B, lo más vertical posible. Por otra parte, la cantidad de muestras de en la frecuencia es de 801 muestras por unidad de frecuencia, en un rango entre 700 MHz y 2800 MHz, es decir, la distancia entre cada muestra, en frecuencia, es de aproximadamente 2.622 MHz. En la figura 58 se muestran dichas configuraciones, que se pueden verificar uno a uno en los archivos de medidas.

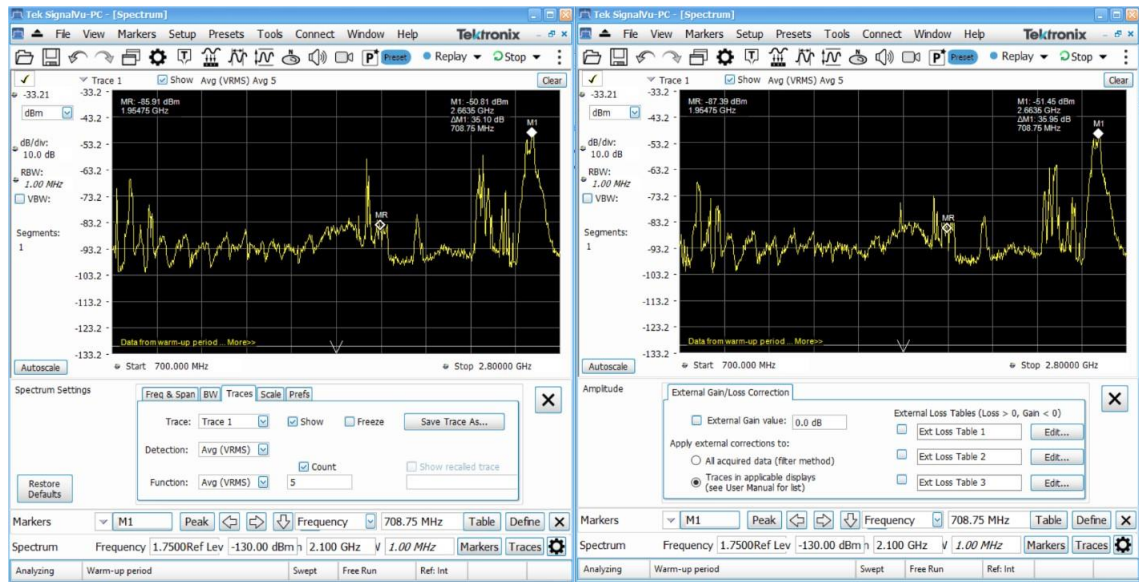


Figura 58. Configuración del RSA306B.

Los datos son guardados en archivos con formato “.Specan”, en el orden de los puntos de medida (de 01 a 22). Dicho formato es usado internamente por el RSA 306B y es la información pura de la gráfica (*Trace 1*) mostrada en pantalla. Esta se obtiene con la opción *Save Trace As* de SignalVU-PC, mostrada en la figura 58. Dicho formato es parecido al formato *XML*, por lo cual es fácilmente procesable en Python con la librería “*xml.etree.ElementTree*” e interpretable con la herramienta de texto de Windows (TXT). En la figura 59 se puede observar la carpeta con los datos y uno de los archivos interpretados con TXT.

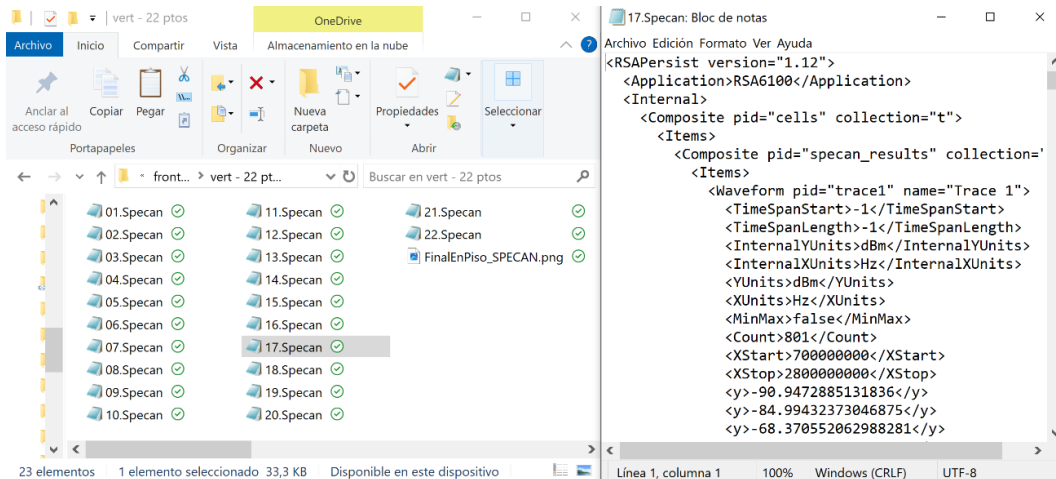


Figura 59. Izq. Carpeta con medidas, der. archivo de medidas.

De este modo, se genera un código que lee toda la carpeta con las medidas y es capaz de calcular la potencia promedio de ventanas específicas en *Trace 1*, generando un vector ordenado con las potencias recibidas en un operador deseado para cada una de las posiciones asignadas. Es decir, este programa lee toda la *Trace 1* y, con un diccionario que contiene la frecuencia central (FC) y el ancho de banda (BW) del DL de cada operador, calcula la potencia promedio de las muestras correspondientes a esa ventana de frecuencias. La generación de

estas ventanas de frecuencia se hace en una campaña de medidas a parte donde se descubre lo siguiente (tabla 23):

Banda	Operador	FC (MHz)	BW (MHz)
PCS	Claro	1937	15
	Movistar	1956.7	15
	Tigo	1980.0	20
AWS	No Ident.	2112.5	5
	No Ident.	2120.0	10
	Movistar	2132.5	15
	Tigo	2147.5	15
IMT-E	No Ident.	2640.0	10
	Claro1	2652.5	15
	Claro2	2669.6	20

Tabla 23. Ventanas frecuenciales usadas por operadores.

Así, este programa calcula las potencias promedio en dichas ventanas y es capaz de generar una gráfica de barras simple de canal de SRM (figura 60), genera los vectores ordenados para las medidas.

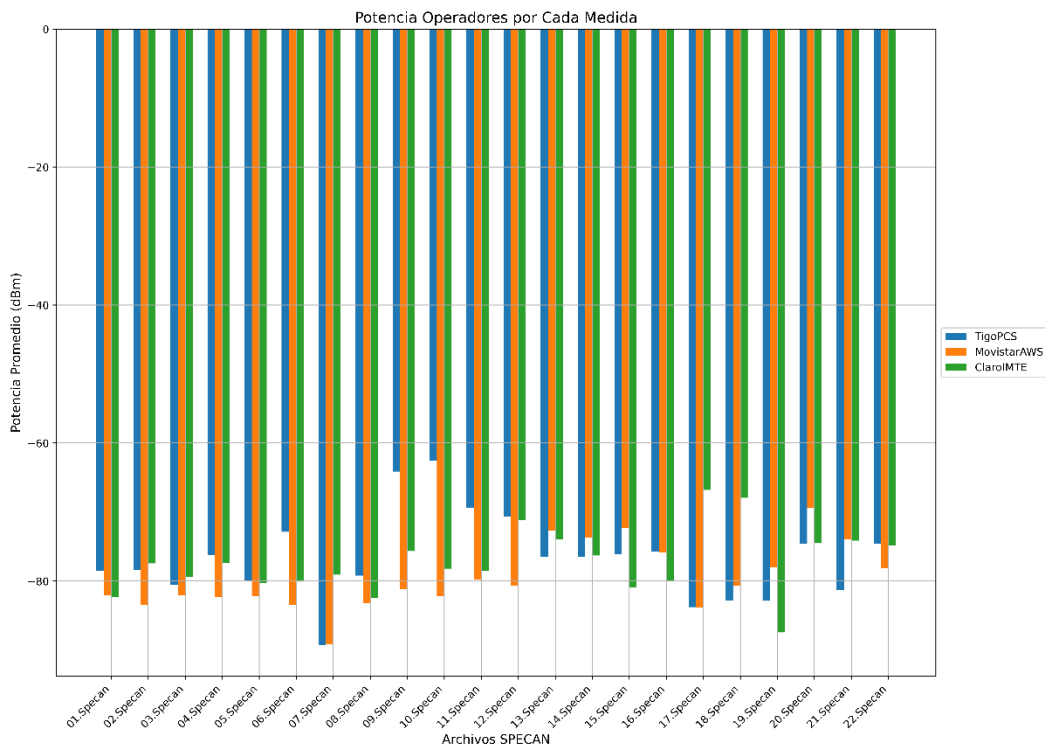


Figura 60. Generación de vector de medidas finales.

Con dicho programa se extrae el vector de medidas finales de *Claro2* en IMT-E (FC 2669.6 MHz, BW 20 MHz). La frecuencia central se selecciona con la medida dada por el UE en NCI y el ancho de banda se infiere revisando el espectro en el RSA 306B. A continuación, se muestra una captura de la medida de NCI (figura 61). Es importante mencionar que la captura del dato de RSRP en NCI se anota teniendo en cuenta la celda seleccionada por el UE cerca del AP, es decir, en las zonas más alejadas el UE se conecta a otras celdas, pero la potencia tomada en NCI para el vector de medidas de RSRP se toma de la celda con PCI: 22 y NID: 7-1, para

consistencia de las medidas. Dichas medidas de RSRP se dejan en anexos, pues son capturas de pantalla del UE.

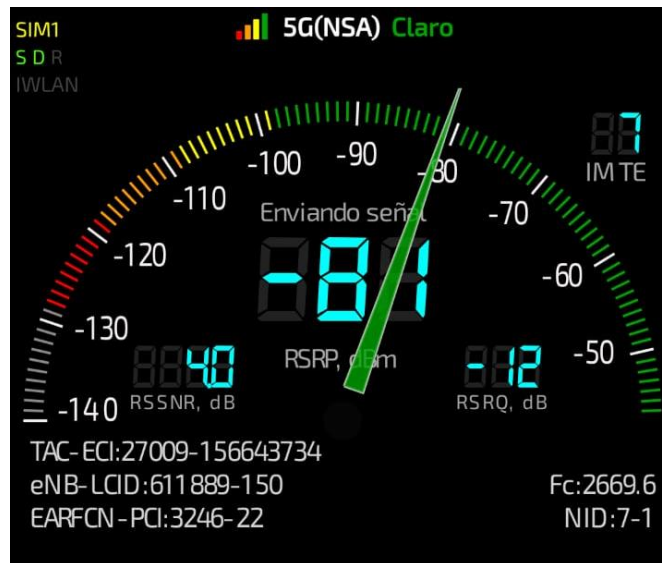


Figura 61. Medida NCI en el punto 18.

Al generar todos los vectores de medidas, se realiza un código que lee dichos vectores y grafica los puntos (figura 62), compara los modelos con el error cuadrático medio (MSE), error aritmético medio (MAE) y el coeficiente de correlación (CORR) (tabla 24), se muestran a continuación la comparación entre los puntos extraídos de los mapas de RSSI y las medidas de RSSI con el equipo RSA306B. En esta gráfica (figura 62) se observa un offset grande en potencia. Esto se puede deber a la energía que aportan las estaciones base aledañas, el ruido en el ambiente e incluso la ganancia de la antena monopolo del equipo de medidas. Otro detalle relevante es que todos los modelos, sobre todo los Motley-Keenan, como ya se mencionaba anteriormente, sobreestiman las pérdidas.

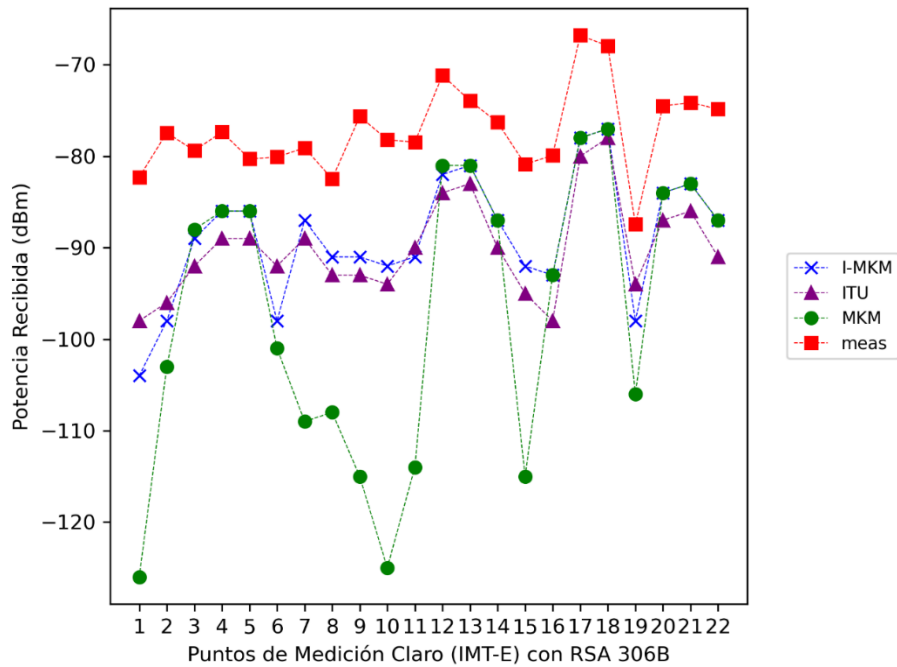


Figura 62. Medidas RSA vs modelos para Claro.

A continuación, en la tabla 24, se estima la efectividad de los modelos con el MSE, el MAE y el coeficiente de correlación para cada modelo, como se muestra en la tabla 24. Se puede observar que el modelo I-MKM para esta comparación es mejor que los demás tanto en MSE como en MAE, sin embargo, el modelo que mejor se ajusta a la forma de las medidas es el modelo ITU.

Modelo	MSE	MAE	CORR
I-MKM	152	12	0.806
MKM	554	20	0.639
ITU	174	13	0.813

Tabla 24. Comparación de modelos y medidas RSSI (RSA306B).

Ahora, dado que se tienen las medidas tomadas con el UE y las medidas reales, se genera un mapa de calor de RSRP (figura 63) y RSSI (figura 64), interpolando las medidas hechas después de la instalación con un sencillo código que aplica la interpolación de Funciones de Base Radial (RBF) con función multicuádrica. En estos mapas se puede observar que se logra el objetivo de entregar señal buena y excelente en la zona central del piso.

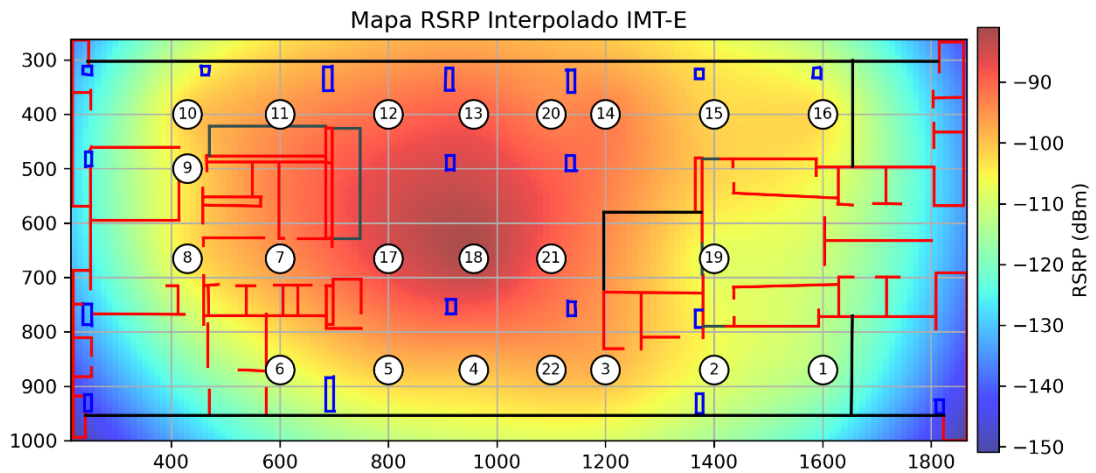


Figura 63. Mapa de RSRP real para Claro en IMTE.

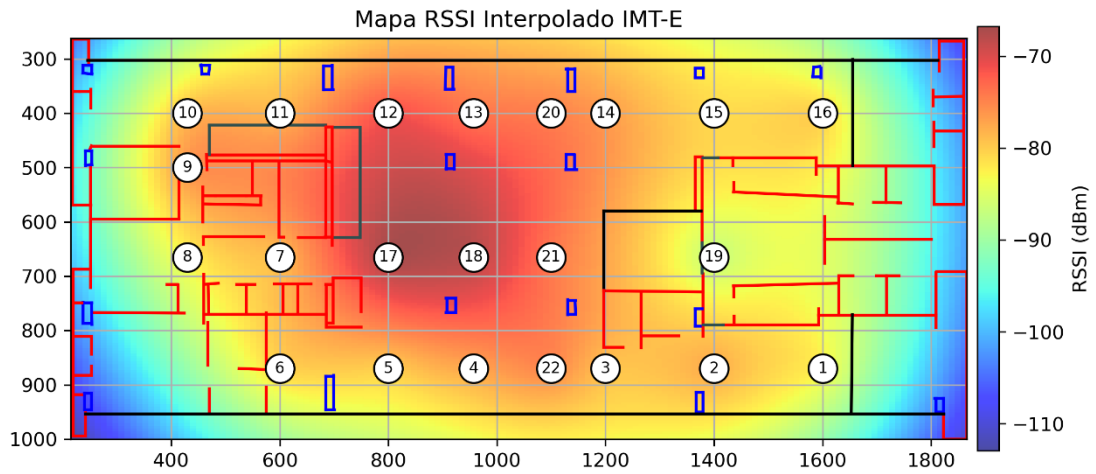


Figura 64. Mapa de RSSI real para Claro en IMTE.

Además, se genera el mismo tipo de mapa con las medidas de la primera campaña de medida. Es decir, se interpolan los datos de la primera campaña de medidas generando el mapa de la figura 65. Como se puede observar comparando entre la figura 63 y la 65, el valor máximo de RSRP aumenta, lo que es suficiente para indicar que la QoS del servicio de Claro mejoró. Cabe aclarar que la interpolación de la figura 65 sobre estima el valor de la RSRP en el centro del mapa, debido a que no hay puntos de medida, lo cual refuerza la afirmación anterior.

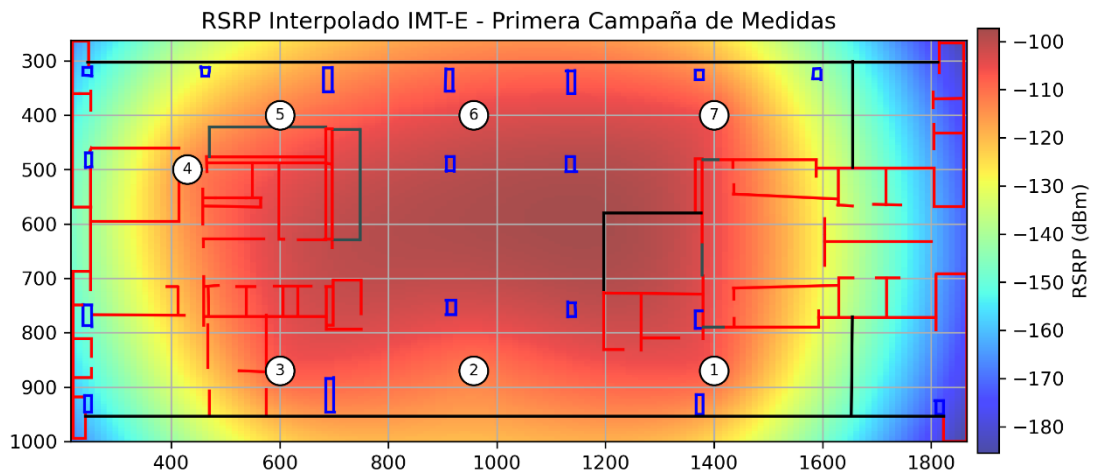


Figura 65. Interpolación de la primera campaña de medidas.

Es importante hacer la claridad de que las medidas hechas con el UE son de RSRP y las del RSA 306 son RSSI, por lo cual no son comparables. Sin embargo, en la figura 66, se realiza la comparación entre datos, es decir, una comparación entre los resultados del I-MKM, las medidas de RSRP con el UE y las medidas de potencia recibida del RSA306B. Con esto se logra observar una gran correlación y se puede afirmar que, para este caso y estas medidas específicos, los modelos podrían llegar a ser estimadores de la RSRP.

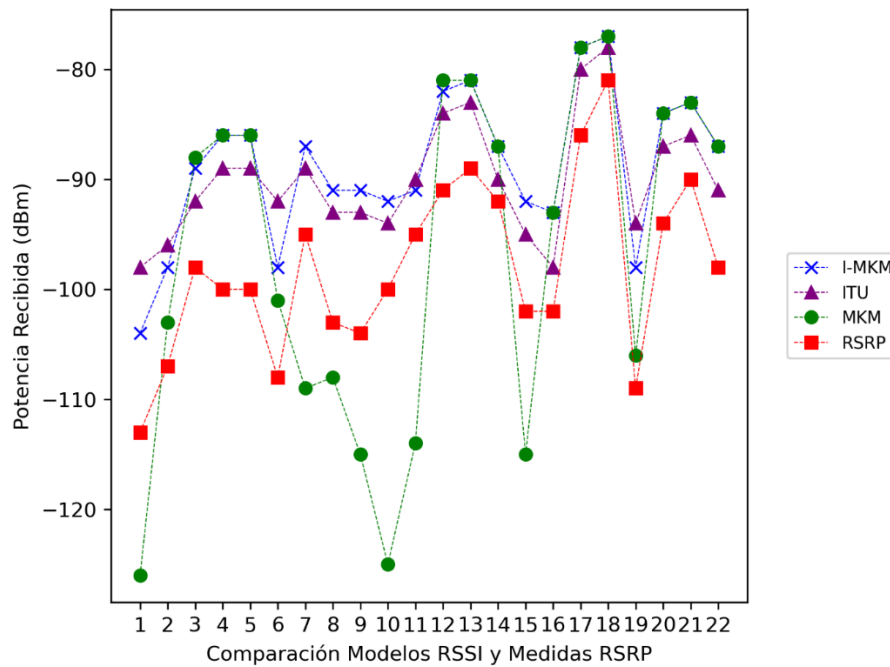


Figura 66. Comparación RSRP y Modelos.

En este caso, la tabla 25, de MSE, MAE y autocorrelación, encuentra que, en cuanto a la estimación de las potencias, ITU es el mejor modelo. Sin embargo, I-MKM se convierte en el mejor modelo en cuanto a la correlación de datos, es decir, la forma de la curva.

Modelo	MSE	MAE	CORR
I-MKM	91	9	0.94
MKM	130	10	0.70
ITU	79	8	0.89

Tabla 25. Comparación de modelos y medidas con UE.

5.2 Ajuste de los modelos

Un esfuerzo por mejorar el I-MKM es realizarle un ajuste de ganancia para que encaje con el contexto de aplicación. Cabe aclarar que se entiende que las medidas tienen energía extra proveniente del ruido del entorno, las BS vecinas y la ganancia de la antena del RSA306B, la cual no pudo ser caracterizada por falta de recursos tecnológicos. Con ello, respecto de las medidas, se halla que el parámetro K_a para el I-MKM es de 11.66 dBm. A continuación, se muestra el modelo ajustado en ganancia, el modelo original y las medidas (figura 67).

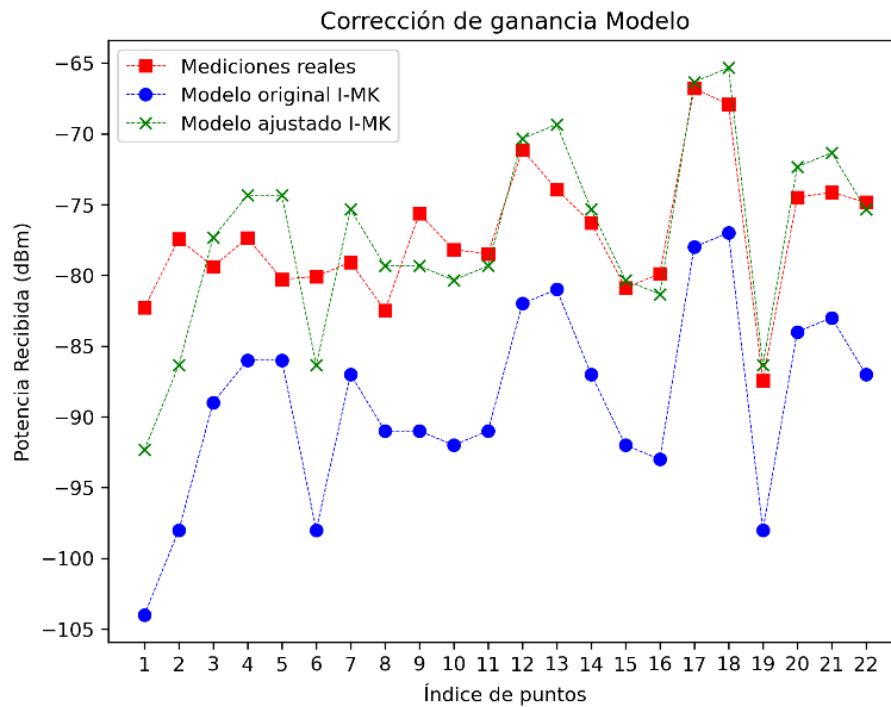


Figura 67. Ajuste de ganancia del I-MKM.

Finalmente, en la figura 68, se muestra una comparación y análisis estadístico de todos los modelos re-escalados usando el parámetro K_a anteriormente encontrado para determinar cuál es el más acertado en forma, respecto de las medidas.

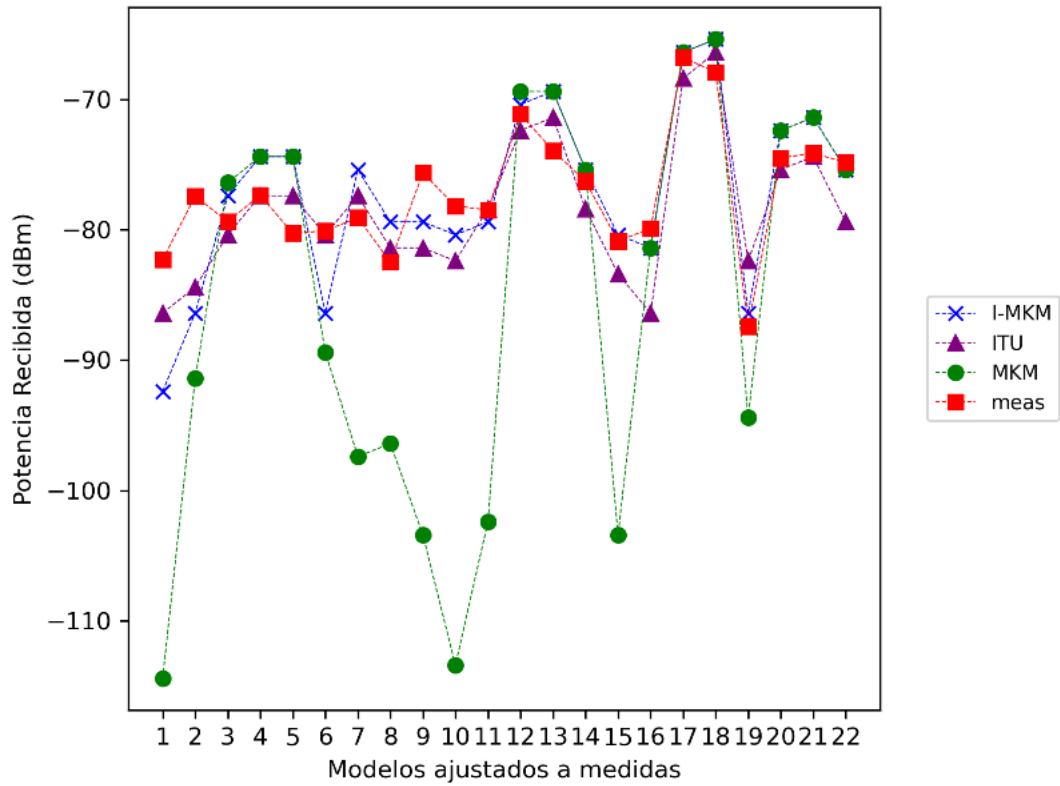


Figura 68. Comparación de medidas vs modelos ajustados ($K_a = 11.66$ dBm)

Ahora, la tabla 26, de análisis estadístico, indica que el mejor modelo es, para este caso y realizado el ajuste de ganancias, el modelo **ITU-R 1238**.

Modelo	MSE	MAE	CORR
I-MKM	16.2	3.06	0.806
MKM	231	10.6	0.639
ITU	11.0	2.59	0.813

Tabla 26. Comparación de modelos ajustados y medidas RSA306B.

5.3 Impacto de la Solución

Después de la revisión general de la irradiación en el piso a causa del sistema instalado, se logra observar como los modelos de propagación apuntan a una mejoría de la señal en términos de la RSSI y la RSRP. Los modelos de propagación se transforman en una herramienta central para el dimensionamiento general del sistema, evitando adquirir equipos de mayor costo/capacidad, a causa de una suficiente irradiación dentro del alcance del proyecto. Además, se logra comprobar que, con estos equipos pequeños, dentro de lo requerido, no solo se logra el objetivo principal del proyecto, si no que se evita generar interferencias al servicio, auto interferencias y efectos anómalos. De este modo los modelos de propagación fungen como criterios robustos para la toma de decisiones en la dimensión de los equipos adquiridos.

Luego, se realizan pruebas finales donde se mide la velocidad de los datos del operador Claro y se comprueba mejoría de la velocidad de transferencia de información (figura 69). Esta medida se realiza a un par de metros del AP, simulando la normalidad de un contratista. En este caso, se logra una mejoría sustancial, tanto de la irradiación electromagnética en la zona central, como de las tasas de velocidad para el UE usado.

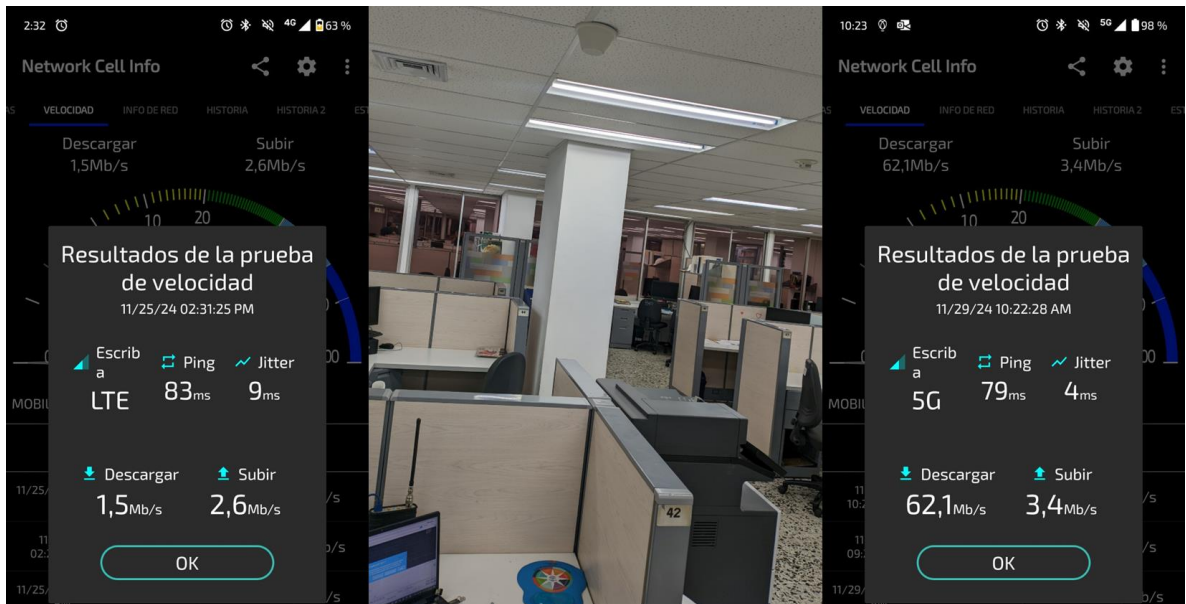


Figura 69. Izquierda, antes; centro, sitio, derecha después.

5.4 Conclusiones.

Este proyecto reafirma la relevancia de los modelos de propagación en el diseño de sistemas capaces de mejorar la calidad y cobertura de señales móviles. La limitación para amplificar señales AWS se debe a la baja calidad de la señal recibida en el *backhaul*, lo cual enfatiza la necesidad de mejorar de la infraestructura de operadores como Movistar, especialmente con la transición hacia 5G NSA o SA. Aunque la infraestructura instalada se donó al DAPD, con el compromiso de la UAG para gestionar los permisos, el marco regulatorio colombiano sigue siendo una barrera importante. Se recomienda que futuros proyectos permanezcan en un ámbito académico hasta que los requisitos regulatorios sean más flexibles, facilitando aplicaciones profesionales de este tipo de sistemas.

El modelo I-MKM se destacó por su versatilidad, permitiendo su aplicación en una amplia gama de escenarios gracias a su capacidad para integrar distintos materiales y frecuencias. Aunque el modelo ITU-R 1238 mostró mayor precisión para este caso específico, su alcance limitado en términos de rango de frecuencias lo hace menos adecuado para contextos más generales. Por otro lado, el uso de amplificadores diseñados para 4G en la extensión de señales 5G demostró ser una solución viable y económica, siempre y cuando se controlen adecuadamente los parámetros RSSNR y RSRP. Se recomienda para futuras investigaciones la mejora de componentes del sistema, como antenas direccionales y cables coaxiales de mayor calidad, así como la caracterización completa de las antenas utilizadas, incluyendo la antena monopolo del RSA 306B, para reducir los desajustes en las mediciones y optimizar los modelos.

Finalmente, la solución A&F implementada logró cumplir con los objetivos planteados al estabilizar y mejorar la velocidad de internet y la calidad de señal de Claro en IMT-E en la zona central del piso, beneficiando a un gran número de usuarios, mientras no fue así para Movistar en AWS/PCS. Los resultados demuestran la viabilidad de diseños escalables y económicos, guiados por modelos de propagación, para optimizar la QoS en entornos interiores desafiantes. Este enfoque sienta las bases para investigaciones futuras, como el desarrollo de sistemas D&F que puedan abordar carencias en la calidad de señal observadas, consolidando un marco para aplicaciones tanto académicas como tecnológicas.

Puntos clave adicionales:

- La normativa colombiana dificulta la implementación de sistemas A&F en contextos profesionales, destacando la necesidad de cambios regulatorios para mayor flexibilidad.
- Mejorar la potencia recibida no siempre implica una mejoría en la calidad de señal, como se observó en AWS y PCS debido a la baja calidad de entrada y limitaciones de infraestructura de las ORM.
- La solución instalada ofrece la posibilidad de esquemas de internet comunitario de bajo costo en el DAPD mediante planes 5G NSA de Claro.

Con estos hallazgos, se demuestra que el diseño guiado por modelos puede proporcionar soluciones innovadoras y rentables para mejorar la calidad del servicio de red móvil en entornos de interior, sentando las bases para su implementación futura en aplicaciones reales.

Bibliografía

- [1] J. Pisarov y G. Mester, «The Impact of 5G Technology on Life in the 21st Century,» *IPSI TAR*, n° 16, pp. 11-14, 2020.
- [2] M. Attaran, «The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization,» *Ambient Intell Human Comput*, n° 14, pp. 5977-5993, 2023.
- [3] J. Navarro-Ortiz, P. Romero-Diaz, S. Sendra, P. R.-M. J. Ameigeiras y J. Lopez-Soler, «A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, n° 2, pp. 905-929, 2020.
- [4] Y. Tang, S. Dananjayan, C. Hou, Q. Guo, S. Luo y Y. He, «A survey on the 5G network and its impact on agriculture: Challenges and opportunities,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 180, 2021.
- [5] Y. Chen, P. Liang, L. Fu, G. Cui, F. Huang, F. Teng y Y. Abbas Bangash, «Using 5G in smart cities: A systematic mapping study,» *Intelligent Systems with Applications*, vol. 14, pp. 2667-3053, 2022.
- [6] G. de Medeiros Sousa y A. M. Pinto Santos, «The viability of Telesurgery Service in the Autonomous Region of the Azores, supported by the 5G Network,» *Procedia Computer Science*, n° 219, pp. 422-430, 2023.
- [7] Ministerio de Tecnologías de Información y las Telecomunicaciones, «Plan 5G Colombia,» Gobierno Colombiano, Bogotá, 2019.
- [8] Ministerio de Tecnologías de Información y las Telecomunicaciones, «Resolución 03947,» Gobierno Colombiano, Bogotá, 2023.
- [9] Ministerio de Tecnologías de Información y las Telecomunicaciones, «Con la Resolución 3947 de 2023, el MinTIC reglamenta el proceso de la subasta 5G,» MinTIC, Bogotá, 2023.
- [10] Caracol Radio, «La tecnología 5G funcionará en Colombia en 2024: MinTic,» Noticias Tecnología, Bogotá, 2023.
- [11] Ministerio de Tecnologías de Información y las Telecomunicaciones, «MinTIC, Ecopetrol y Claro realizan prueba exitosa de tecnología 5G Industrial en la Refinería de Barrancabermeja,» Gobierno Nacional, Bogotá, 2023.
- [12] W. Arrubla-Hoyos, A. Ojeda-Beltrán, A. Solano-Barliza, G. Rambauth-Ibarra, A. Barrios-Ulloa, D. Cama-Pinto, F. M. Arrabal-Campos, J. A. Martínez-Lao, A. Cama-Pinto y F. Manzano-Agugliaro, «Precision Agriculture and Sensor Systems Applications in Colombia through 5G Networks,» *Sensors*, vol. 22, n° 19, p. 7295, 2022.
- [13] A. Barrios-Ulloa, D. Cama-Pinto, F. M. Arrabal-Campos, J. A. Martínez-Lao, J. Monsalvo-Amaris, J. A. Hernández-López y A. Cama-Pinto, «Overview of Mobile Communications in Colombia and Introduction to 5G,» *Sensors*, vol. 23, n° 3, p. 1126, 2023.

- [14] R. Borralho, A. Mohamed, A. Quddus, P. Vieira y R. Tafazzoli, «A Survey on Coverage Enhancement in Cellular Networks: Challenges and Solutions for Future Deployments,» *IEEE Wireless Communications*, pp. Vol.18, no. 3, 2011.
- [15] T. Norp, «5G Requirements and Key Performance Indicators,» *Journal of ICT Standardization*, vol. 6, n° 1-2, pp. 15-30, 2018.
- [16] C. Sudhamani, M. Roslee, J. J. Tiang y A. U. Rehman, «A Survey on 5G Coverage Improvement Techniques: Issues and Future Challenges,» *Sensors*, vol. 23, n° 4, p. 2356, 2023.
- [17] M. Ahmed y S. Faruque, «5G Network Coverage Planning and Analysis of the Deployment Challenges,» *Sensors*, vol. 21, n° 29, p. 6608, 2021.
- [18] M. García Sánchez, C. Iglesias, I. Cuiñas y I. Expósito, «Building Penetration Losses at 3.5 GHz: Dependence on Polarization and Incidence Angle,» *Electronics*, vol. 12, n° 1, p. 106, 2023.
- [19] X. Lin, «An Overview of 5G Advanced Evolution in 3GPP Release 18,» *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, n° 3, pp. 77-83, 2022.
- [20] DANE, «Cuenta Satélite de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CSTIC) 2022,» 27 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/tic/bol-satelite-tic-2022pr.pdf>. [Último acceso: 12 enero 2024].
- [21] Comisión de Regulación de Comunicaciones, «Accesos al servicio de Internet móvil superaron los 40 millones en el primer trimestre de 2023,» Gobierno de Colombia, Bogotá, 2023.
- [22] S. Manap, K. Dimiyati, M. N. Hindia, M. S. Abu Talip y R. Tafazzoli, «Survey of Radio Resource Management in 5G Heterogeneous Networks,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 131202-131223, 2020.
- [23] H. Sánchez-Martínez, «Análisis de aspectos técnicos y tecnológicos de la telefonía móvil 5G, sus posibles beneficios e inconvenientes de implementación en Colombia,» *Redes de Nueva Generación*, 2023.
- [24] Gobierno de Colombia, «‘En Colombia, la conectividad es una misión que está por hacerse’: Presidente Petro,» Gobierno de Colombia, Bogotá, 2022.
- [25] Nextivity, «Cel-Fi Cellular Coverage Solutions,» San Diego, 2024.
- [26] Celona, «5G LAN Product Portfolio,» <https://www.celona.io/products>, 2024.
- [27] Small Cell Forum Limited, «Small Cell Forum,» 2024.
- [28] Agencia Nacional del Espectro, «Cuadro Nacional de Atribución de Bandas,» Gobierno Nacional, Bogotá, 2024.
- [29] 3GPP, «Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Physical layer - general description (3GPP TS 25.201 version 4.3.0 Release 4),» ETSI, Sophia Antípolis, 2002.
- [30] E. Hernandez, «Modulación Digital,» *Sistemas de Telecomunicación*.
- [31] Universidad de Sevilla, «Técnicas de Acceso Múltiple. OFDMA y SC-FDMA.,» Sevilla.

- [32] Universidad de Sevilla, «OFDM,» *Proyectos Universidad de Sevilla*, n° 3.
- [33] MathLab, «OFDM,» 2024.
- [34] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Stanford: Draft of Second Edition, 2020.
- [35] National Geographic España, «¿Cómo funciona tu teléfono móvil?,» *Ciencia y Tecnología*, Madrid, 2023.
- [36] 3GPP, «5G System Overview,» *Technologies*, 2022.
- [37] Nextivity, «Understanding LTE Signal Strength Values,» California, 2021.
- [38] L. Polak, J. Kufa, R. Sotner y T. Fryza, «Measurement and Analysis of 4G/5G Mobile Signal Coverage in a Heavy Industry Environment,» *Sensors*, n° 2538, p. 24, 2024.
- [39] S. Shah, «A Survey From 1G to 5G Including the Advent of 6G: Architectures, Multiple Access Techniques, and Emerging Technologies,» *IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pp. 1117-1123, 2022.
- [40] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «5G - Fifth generation of mobile technologies,» *Technologies*, Ginebra, 2022.
- [41] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «UIT,» Gobierno de Argentina, Buenos Aires.
- [42] A. Weissberger, «ITU-R M.2150: Detailed specifications of the radio interfaces of IMT-2020,» *IEEE ComSoc*, Ginebra, 2021.
- [43] 3GPP, «LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 36.300 version 14.3.0 Release 14),» ETSI, Sophia Antípolis, 2017.
- [44] F. Vook, A. Ghosh, E. Diarte y M. Murphy, «5G New Radio: Overview and Performance,» *Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, vol. 52, pp. 1247-1251, 2018.
- [45] 3GPP, «5G; Study on new radio access technology (3GPP TR 38.912 version 14.1.0 Release 14),» ETSI, Sophia Antípolis, 2017.
- [46] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas terrenales de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT 2020),» ITU, Ginebra, 2021.
- [47] M. Corici, D. Vingarzan y T. Magedanz, «3GPP Evolved Packet Core - the Mass Wireless Broadband all-IP architecture,» *Telecommunications: The Infrastructure for the 21st Century*, pp. 1-6, 2010.
- [48] 3GPP, «LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 36.300 version 14.3.0 Release 14),» ETSI, Sophia Antípolis, 2017.
- [49] I. Parvez, A. Rahmati, I. Guvenc, A. Sarwat y H. Dai, «A Survey on Low Latency Towards 5G: RAN, Core Network and Caching Solutions,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, n° 4, pp. 3098-3130, 2018.

- [50] 3GPP, «5G; System Architecture for the 5G System (3GPP TS 23.501 version 15.3.0 Release 15),» ETSI, Sophia Antópolis, 2018.
- [51] 3GPP, «5G; Access to the 3GPP 5G Core Network (5GCN) via non-3GPP access networks (3GPP TS 24.502 version 16.7.0 Release 16),» ETSI, Sophia Antópolis, 2021.
- [52] V. Kumar, X. Fan, E. Peterson y J. Cree, «A Systematic Study to Determine 5G Baseline Performance for Scientific Computing,» *SoutheastCon 2023*, pp. 43-48, 2023.
- [53] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.525-2. CÁLCULO DE LA ATENUACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE,» ITU, Ginebra, 1994.
- [54] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «RECOMENDACIÓN UIT-R F.1093-2. Efectos de la propagación multitrayecto en el diseño y funcionamiento de los sistemas inalámbricos fijos digitales con visibilidad directa,» ITU, Ginebra, 2006.
- [55] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Interferencia radioeléctrica,» ITU, Ginebra, 2021.
- [56] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «RECOMENDACIÓN UIT-R P.833-3. Atenuación debida a la vegetación,» ITU, Ginebra, 2001.
- [57] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Atenuación debida a los gases atmosféricos y efectos conexos,» ITU, Ginebra, 2022.
- [58] H. Zhao, R. Mayzus, S. Sun, M. Samimi, J. Schulz, Y. Azar, K. Wang, G. Wong, F. Gutierrez y T. Rappaport, «28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city,» *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 5163-5167, 2013.
- [59] Universidad de Sevilla, «Capítulo 6: Modelos de Propagación en Interiores,» [En línea]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11761/fichero/Volumen2%252F11-Cap%C3%ADtulo6+-+Modelos+de+propagaci%C3%B3n+en+interiores.pdf>. [Último acceso: 2024].
- [60] H. A. Obeidat, R. Asif, N. Ali, O. Obeidat, N. Ali, S. M. Jones, W. S. Shuaieb, M. A. Al-Sadoon, K. W. Hameed, A. Alabdullah, Y. A. Dama y R. Abd-Alhameed, «An Indoor Path Loss Prediction Model using Wall Correction Factors for WLAN and 5G Indoor Networks,» *Radio Science Journal*, vol. 3, nº 54, pp. 544-564, 2018.
- [61] L. Nagy, «Indoor Radio Network Optimization,» 28 Septiembre 2010. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/221909454_Indoor_Radio_Network_Optimization.
- [62] COST Action 231, «Digital Mobile radio towards future generation systems,» European Commission, Brussels, 1999.
- [63] F. Mukti, P.-D. Prasetyo-Adi, D. A. Pratseya, V. Sihombing, N. Rahanra, K. Yuliawan y J. Simatupang, «Integrating Cost-231 Multiwall Propagation and Adaptive Data Rate Method for Access Point Placement Recommendation,» *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 12, nº 4, pp. 772-777, 2021.

- [64] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Recomendación UIT-R P.1238-12,» ITUPublicaciones, Ginebra, 2023.
- [65] Y. Zhang y T. Yan, «Loss Correction of Wireless Model in Complex Multi Wall Environment,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1757, n° 012137, 2020.
- [66] S. Hosseinzadeh, H. Larijani y K. Curtis, «An Enhanced Modified Multi Wall Propagation Model,» *IEEE*, 2017.
- [67] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Efectos de los materiales y estructuras de construcción en la propagación de las ondas radioeléctricas por encima de unos 100 MHz,» Julio 2015. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-1-201507-S!!PDF-S.pdf.
- [68] A. Bou, Ö. Bulakci, S. Redana y J. Hämäläinen, «On cell range extension in LTE-Advanced Type 1 inband relay networks,» *Wireless Communications and mobile computing*, vol. 15, pp. 770-786, 2015.
- [69] A. BenMimoune y M. Kadoch, «Relay Technology for 5G Networks and IoT Applications,» *Internet of Things: Novel Advances and Envisioned Applications. Studies in Big Data*, vol. 25, 2017.
- [70] J. Marín-García, C. Romero-Franco y J. Alonso, «A Software Defined Radio Platform for Decode and Forward Relay Nodes Implementation,» *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pp. 1-4, 2019.
- [71] M. Teixeira, A. Alberti, C. Both, A. De Oliveira y K. Vieira, «A Tutorial on Trusted and Untrusted Non-3GPP Accesses in 5G Systems—First Steps Toward a Unified Communications Infrastructure,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 116662-116685, 2022.
- [72] Comisión de Regulación de Comunicaciones, «En 2022, Colombia alcanzó cerca de 50 millones de conexiones a Internet,» Gobierno de Colombia, Bogotá, 2023.
- [73] Agencia Nacional del Espectro, «Documento de consulta pública sobre las bandas de frecuencia identificadas en Colombia para el futuro desarrollo de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT),» ANE, Bogotá, 2024.
- [74] 3GPP, «About 3GPP,» 2024.
- [75] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Sobre la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT),» Ginebra.
- [76] Departamento Administrativo de la Función Pública, «Ley 1341,» Gobierno de Colombia, Bogotá, 2009.
- [77] R. Verdecia-Peña y J. Alonso, «Implementation of D&F Relay Node for Cooperative MIMO Systems through SDR platform,» *IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, pp. 1-5, 2021.
- [78] M. Batistatos, M.-A. Kourtis, G. Xilouris, D. Santorinaios, A. Oikonomakis, E.-Z. Bozis y A. Kourtis, «Wi-Fi 6 aerial relay node in 5G network for emergency operations,» *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 170, n° 154776, 2023.

- [79] M. García, J. Montaña y F. Victorino, «PRESENTACIÓN DE UNA SOLUCIÓN DE RED CELULAR INDOOR. Solución indoor para optimizar el servicio de voz móvil de Movistar dentro de las instalaciones de la empresa Centurylink- Telepuerto,» Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2019.
- [80] F. Curieses-Sanz, «Implantación de cobertura móvil interior y exterior en un recinto hospitalario,» Escuelas Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Valladolid, 2019.
- [81] D. Blandon-Martínez y M. Aragón-Mondragón, «Aumento del área de cobertura de la señal telefónica en Zacarías Rio Dagua con base en el modelo de propagación de tierra plana.,» Javeriana Cali, Cali, 2023.
- [82] G. Liu, Y. Huang, Z. Chen, L. Liu, Q. Wang y N. Li, «5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, n° 11, pp. 83-39, 2020.
- [83] C. Shannon, «A Mathematical Theory of Communication,» *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-656, 1948.
- [84] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz,» ETSI, Ginebra, 2013.
- [85] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Distribuciones de probabilidad para establecer modelos de propagación de las ondas radioeléctricas,» ITU, Ginebra, 2022.
- [86] 3GPP, «LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 36.300 version 10.2.0 Release 10),» ETSI, Sophia Antípolis, 2011.
- [87] 3GPP, «5G; Study on New Radio (NR) access technology (3GPP TR 38.912 version 16.0.0 Release 16),» ETSI, Sophia Antípolis, 2020.
- [88] 3GPP, «Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer for relaying operation (3GPP TS 36.216 version 14.0.0 Release 14),» ETSI, Sophia Antípolis, 2017.
- [89] QMCTELECOM, «Soluciones Indoor,» San Juan, 2024.
- [90] European Commission, «Broadband Evolved FEMTO Networks,» 2012.
- [91] J. Bishop, J.-M. Chareau y F. Bonavitacola, «Implementing 5G NR Features in FPGA,» *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, pp. 373-9, 2018.
- [92] Z. Zhang, X. Chai, K. Long, V. Athanasios y L. Hanzo, «Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, n° 5, pp. 128-137, 2015.
- [93] M. Eguizabal, «Gestión de Recursos Radio en Sistemas Móviles Avanzados de Banda Ancha con Soluciones de Extensión de Cobertura y Capacidad Basados en Despliegues de Red Heterogénea,» Prensas de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2021.
- [94] C.-C. Diego Fernando, A. Aragón-Zavala y G. Castañón-Ávila, «Closing Connectivity Gap: An Overview of Mobile Coverage Solutions for Not-Spots in Rural Zones,» *Sensors*, vol. 21, n° 23, 2021.

- [95] A. Krendzel, «LTE-A Mobile Relay Handling: Architecture Aspects,» *19th European Wireless Conference*, 2013.
- [96] Z. Er-reguig y H. Ammor, «Towards Designing a Microcell Base Station using a Software-Defined Radio Platform,» *2019 7th Mediterranean Congress of Telecommunications (CMT)*, pp. 1-4, 2019.
- [97] MatLab, «OFDM,» 2024.

Anexos

Anexo 1.1. Primera Encuesta – Preguntas.

Primera Encuesta - *Movilex* - Tesis Juan Camilo Ruiz

Primera recogida de información para adquisición de equipos. Sitio: Décimo Piso Alcaldía.

* Obligatoria

1. ¿Cuál es su operador de red móvil? *

- Claro
- Movistar
- Tigo
- Otras

2. ¿Qué tan buena le parece que es la señal de su operador en los cubículos de trabajo del piso 10 de la Alcaldía? *

1: pésima, 2: mala, 3: suficiente, 4: buena, 5: excelente



3. ¿Se ha cambiado de operador o piensa hacerlo? *

- Si
- Lo he pensado
- No

4. ¿De qué operadora viene? *

- Claro
- Movistar
- Tigo
- Otras

5. ¿A qué operador le gustaría pasarse? *

- Claro
- Movistar
- Tigo
- Otras

6. ¿Cuál operador considera que debería mejorar su señal en este piso? *

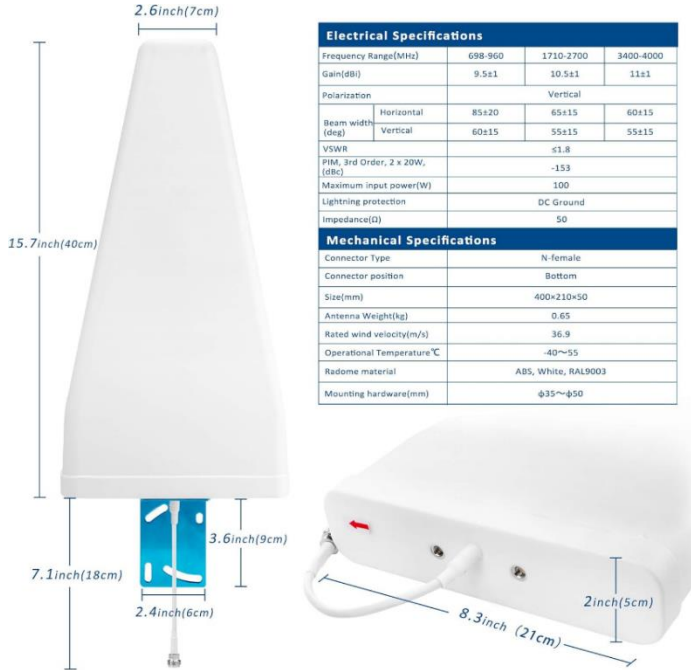
- Claro
- Movistar
- Tigo
- Otras

Anexo 1.2. Respuestas de la encuesta.

Id	Hora de inicio	Hora de finalización	Correo electrónico	Nombre	es su operador de re	es su operador en los d	biado de operador o p	De qué operadora vie	operador le gustaría	era que debería mejc
1	16/09/2024 12:14	16/09/2024 12:15	anonymous		Movistar	3	No			Movistar
2	16/09/2024 15:23	16/09/2024 15:24	anonymous		Movistar	4	Sí	Tigo		Movistar
3	16/09/2024 15:25	16/09/2024 15:28	anonymous		Claro	4	No			Institucional
4	16/09/2024 15:28	16/09/2024 15:30	anonymous		Claro	4	Sí	Movistar		Movistar
5	16/09/2024 15:31	16/09/2024 15:32	anonymous		Claro	3	No			Claro
6	16/09/2024 15:35	16/09/2024 15:35	anonymous		Movistar	4	No			Movistar
7	16/09/2024 15:36	16/09/2024 15:37	anonymous		Tigo	4	No			Movistar
8	16/09/2024 15:37	16/09/2024 15:38	anonymous		Tigo	5	No			Emcali
9	16/09/2024 15:39	16/09/2024 15:40	anonymous		Movistar	2	Lo he pensado		Tigo	Movistar
10	16/09/2024 15:40	16/09/2024 15:42	anonymous		Claro	4	No			No escuché
11	16/09/2024 15:42	16/09/2024 15:43	anonymous		Claro	5	No			Movistar
12	16/09/2024 15:45	16/09/2024 15:49	anonymous		Claro	3	No			Claro
13	16/09/2024 15:50	16/09/2024 15:55	anonymous		Claro	3	No			Claro
14	16/09/2024 15:55	16/09/2024 15:57	anonymous		Tigo	4	No			Tigo
15	16/09/2024 15:57	16/09/2024 15:59	anonymous		Movistar	2	No			Movistar
16	16/09/2024 16:00	16/09/2024 16:02	anonymous		Claro	4	Sí	Movistar		Movistar
17	16/09/2024 16:02	16/09/2024 16:04	anonymous		Movistar	2	Lo he pensado		Móvil Exito	Movistar
18	16/09/2024 16:05	16/09/2024 16:07	anonymous		Movistar	3	Sí	Claro		Movistar
19	16/09/2024 16:08	16/09/2024 16:09	anonymous		Claro	3	Sí	Movistar		Todos
20	16/09/2024 16:21	16/09/2024 16:22	anonymous		Wom	5	Sí	Claro		Claro
21	16/09/2024 16:23	16/09/2024 16:24	anonymous		Claro	3	No			Claro
22	16/09/2024 16:25	16/09/2024 16:28	anonymous		Movistar	1	Sí	Tigo		Movistar
23	16/09/2024 16:35	16/09/2024 16:38	anonymous		Tigo	3	No			Tigo
24	16/09/2024 16:38	16/09/2024 16:41	anonymous		Claro	3	Lo he pensado		No se	Claro
25	16/09/2024 16:44	16/09/2024 16:46	anonymous		Claro	4	No			Movistar

Anexo 2. Elementos para las campañas de medidas

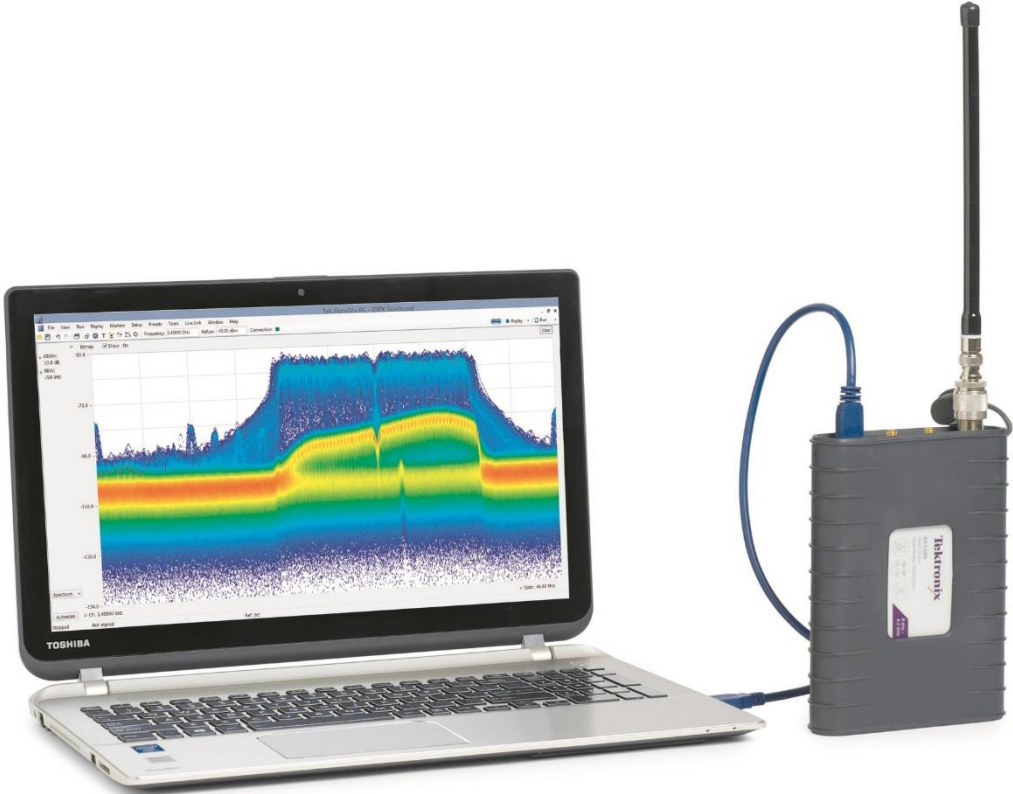
2.1. Antena LDPA, extraído de <https://a.co/d/hNBOF6s>



2.2. Antena Omnidireccional tipo domo, extraído de <https://a.co/d/cMzZD4P>

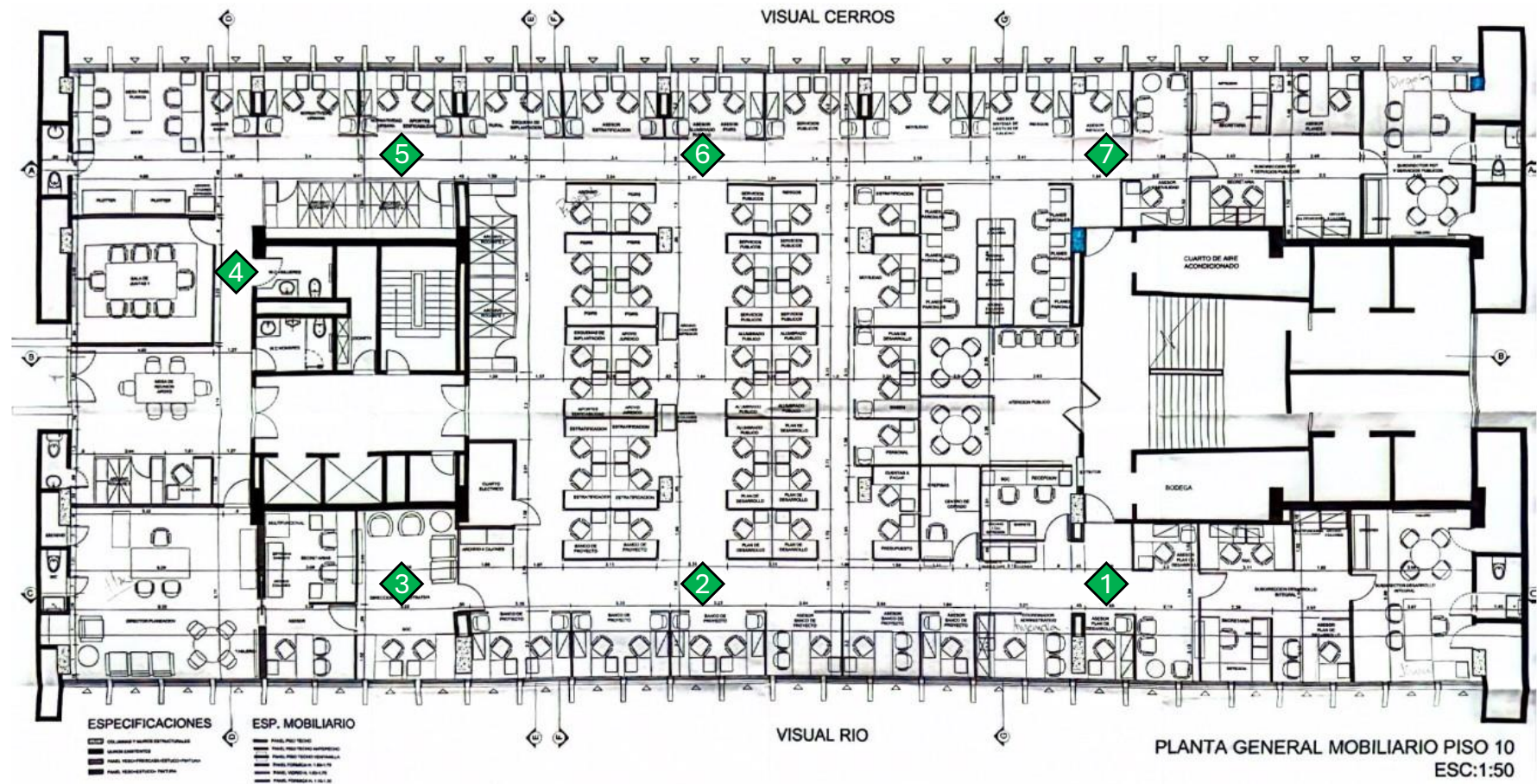


2.3 Tektronix RSA306B, extraído de <https://www.testunlimited.com/Product/Tektronix/RSA306/770>



Anexo 3. Primera campaña de medidas con Network Cell Info

3.1 Puntos de medida, escaneado del piso 10.

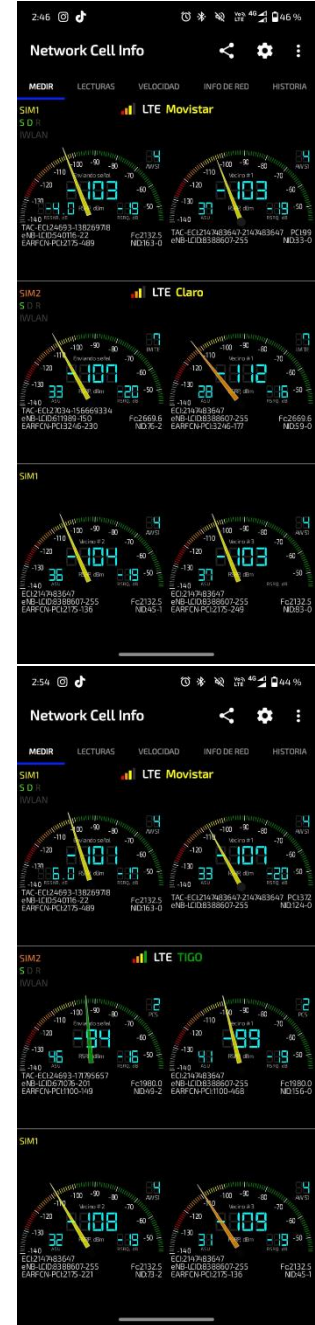
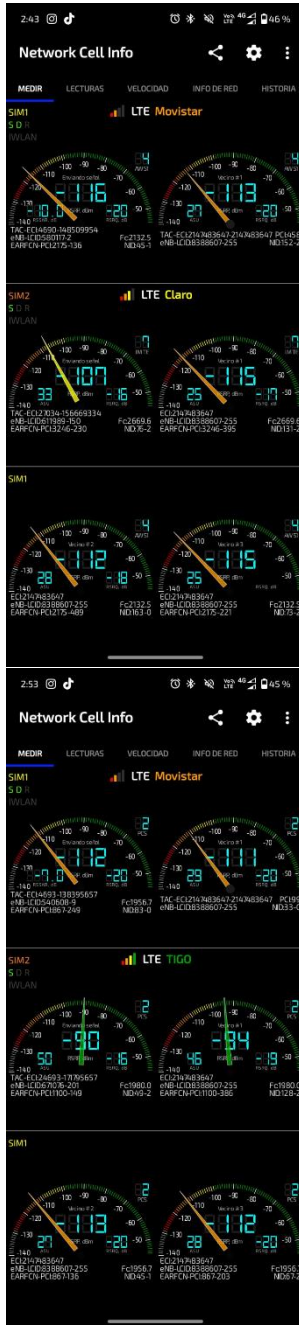


3.2 Capturas de pantalla de la aplicación en los diferentes puntos de medida en orden.

1. Cubículo 83: Puerta de entrada (por donde no se puede salir)

2. Cubículo 93: Centro de pasillo, ala del Río

3. Cubículo 97: Puerta del Despacho



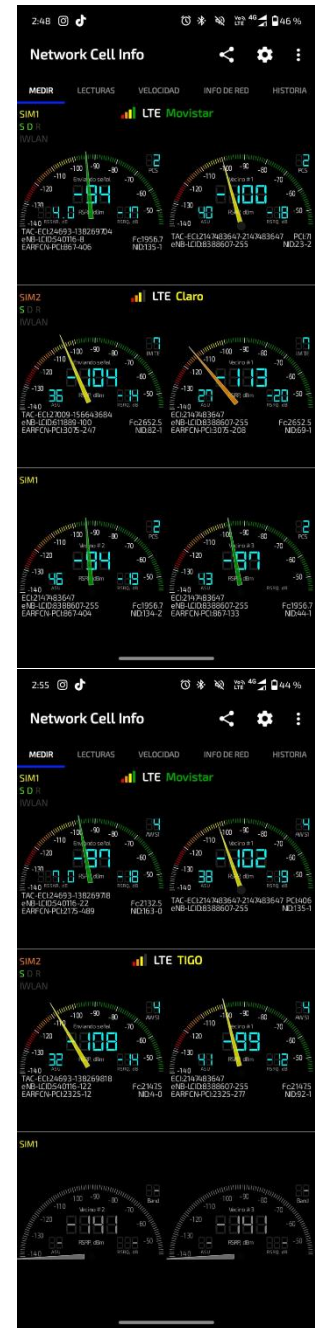
4. Puerta Sala de Juntas



5. Cubículo 22: Al lado de Amanda (el 24 es el de Amanda)



6. Cubículo 14 (mitad del pasillo)



7. Cubículo 7: Puerta de entrada y salida (por donde sí se puede salir)




```

fig.savefig(power_map_path, dpi=300, bbox_inches="tight") #Prueba
plt.savefig("coeficiente de pérdidas @ (f/1e9) GHz.PNG", dpi=300,
bbox_inches="tight")
plt.grid()
plt.show()

#####FIN DEL INICIALIZADOR#####
# ESTE SEPARADOR INDICA QUE LO SIGUIENTE VA EN OTRO CUADRO DEL
NOTBOOK#####
INICIA EL CUADRO EJECUTOR DEL CÓDIGO
# Constantes
#Este código usa distancia en metros y frecuencia en Hz, si no se indica
P_t = -3 # Potencia transmitida en dBm, potencia que sale del amplificador
G_t = 0 # Ganancia de la antena transmisora en dBi, antena Fronthaul
G_r = 0 # Ganancia de la antena receptora en dBi, antena Fronthaul
f = 3605.0 # Frecuencia en Hz
polarization = "TE" #Polarización "TE": vertical y "TM":
horizontal(Horizontal no ha sido implementado, revisar ITU-R 2046)
c = 3e8 # Velocidad de la luz en m/s
lambda_ = c / f

#Posición de la antena de transmisión en el plano
xt = 902
yt = 572

dB = 1 #Distancia mínima (Distancia que supera la zona de Fresnel)
h = 0.9 #Distancia del plano de medida respecto del plano de instalación del
AP (altura)

nota = 1.16
gamma = 0.6

#Generación de la permitividad relativa
fg = f #Frecuen

a = [3.75, 5.31, 6.27, 1]
b = [0, 0, 0, 0]
cc = [0.038, 0.0326, 0.0043, 10**7]
d = [0, 0.0095, 1.1925, 0]

nu = {
1: a[0] + (1j**1.98**cc[0]*f**(d[0]-1)), # ladrillo
2: a[1] + (1j**1.98**cc[1]*f**(d[1]-1)), #Columna de hormigón
3: a[2] + (1j**1.98**cc[2]*f**(d[2]-1)), #vidrio
4: a[3] + (1j**1.98**cc[3]*f**(d[3]-1)), #Armarío metálico/ Puerta
accesorio/ puerta metálica

}

#Fin Generación de la permitividad relativa.....
#####
# Generación de las curvas de pérdidas
wall_losses = []

resolution = 300
liup = np.pi
lidown = -np.pi

h = 1
while h < 5:
    db = []
    theta = np.linspace(lidown,liup,resolution)

    for l in range(resolution):
        db.append(np.abs(wall_loss(h, theta[l])))

    #Modificar tamaño de la estrella que representa al transmisor en el gráfico
    size_star = 6

    #Leer el CSV para sacar el plano
    csv_path = "C:/Users/Juan/OneDrive
    Call/Desktop/Modelo_de_Propagacion/planodapwz.csv" # PUD
    power_map_path = "C:/Users/Juan/OneDrive
    Call/Desktop/Modelo_de_Propagacion/planodapwz_power_map.PNG" # PUD

    wall_colors = {
1: 'red',
2: 'blue',
3: 'black',
4: 'darkslategrey'
}

    # Leer el archivo CSV para obtener las paredes y sus pérdidas
    correspondientes
    x_coords = []
    y_coords = []
    lines = []
    wall_types = set()

    with open(csv_path, "r") as file:
        reader = csv.reader(file)
        for row in reader:
            if len(row) == 5: # Asegurarse de que hay 5 columnas
                xl, yl, zl, y2 = map(int, row[:4])
                walltype = int(row[4])
                wallloss = float(row[4])
                x_coords.extend([xl, x2])
                y_coords.extend([yl, y2])
                lines.append((xl, yl, x2, y2, walltype))
                wall_types.add(walltype)
            else:
                print("Fila con formato inesperado: (row)")

    # Determinar el rango de las coordenadas
    x_min, x_max = min(x_coords), max(x_coords)
    y_min, y_max = min(y_coords), max(y_coords)

    # Variable para el factor de conversión metros a pixeles
    meter_to_pixel_factor = 1.0

    # Variable para almacenar los puntos seleccionados
    selected_points = []

    # Crear la ventana de Tkinter para seleccionar dos puntos
    root = tk.Tk()
    root.title("Selección de puntos para definir el factor de escala del
    plano")

    # Crear una figura y un eje para el gráfico del plano

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
ax.set_xlim(x_min, x_max)
ax.set_ylim(y_min, y_max) # Invertir el eje y para que 0 esté en la parte
superior
ax.set_aspect('equal')

# Dibujar las líneas en el gráfico
for (xl, yl, x2, y2, walltype) in lines:
    ax.plot([xl, x2], [yl, y2], wall_color[walltype])

# Configurar el evento de clic en el gráfico
fig.canvas.mpl_connect('button_press_event', process_point)

# Mostrar el gráfico en Tkinter
canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=root)
canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
canvas.draw()

# Esperar a que el usuario seleccione dos puntos
root.mainloop()

# FIN DEL IPYMO
# ESTE SEPARADOR INDICA QUE LO SIGUIENTE VA EN OTRO CUADRO DEL
NOTBOOK#####
#####Empieza el graficador del coeficiente de
pérdidas#####
# Prueba de la generación de los coeficientes de pérdidas
wall_losses = []
resolution = 300

h = 1
while h < 5:
    db = []
    theta = np.linspace(0, 85 * np.pi / 180, resolution)
    for l in range(resolution):
        db.append(np.abs(wall_loss(h, theta[l])))
        wall_losses.append(db)

# Colores y etiquetas para cada tipo de material
colores = ['red', 'blue', 'black', 'darkslategrey']
materiales = ['Ladrillo', 'Concreto', 'Vidrio', 'Metal'] # Cambia estos
nombres a los tipos específicos de material

# Graficar cada línea con su respectivo color y etiqueta
for l in range(4):
    h = 1
    while h < 5:
        db = []
        theta = np.linspace(0, 85 * np.pi / 180, resolution)
        for l in range(resolution):
            db.append(np.abs(wall_loss(h, theta[l])))
            wall_losses.append(db)

# Agregar Leyenda
plt.legend(title="Tipos de Material", loc='best', fontsize='small',
frameon=True)

# Configuración de la cuadrícula y mostrar el gráfico
plt.grid()
plt.savefig("coeficiente de pérdidas @ (f/1e9) GHz.PNG", dpi=300,
bbox_inches="tight")
plt.show()
# Fin del código graficador del coeficiente de pérdidas

```

4.2 Código Multimodelo (ITU Y MKM)

```

#INICIO MULTIMODELO
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
import matplotlib.colors as mcolors
import tkinter as tk
from tkinter import simpledialog
import csv
import random
from scipy.interpolate import griddata

def count_walls(x0, y0, x1, y1, lines):
    intersected_walls = []
    for (x2, y2, x3, y3, walltype) in lines:
        if len(intersected_walls) >= 2 and modelo == "ITU":
            Mx0 = 1
            intersected_walls.append(1)
            return intersected_walls
        elif len(intersected_walls) == 0 and modelo == "ITU":
            Mx0 = 0
            intersected_walls.append(0)
            return intersected_walls
        if x2 == x3: # Pared vertical
            # Calcular el punto de intersección
            if x0 <= x1: # Rayo no es vertical
                t = (x2 - x0) / (x1 - x0)
                intersect_y = y0 + t * (y1 - y0)
                # Verificar si el punto de intersección está dentro del rango
                del segmento de la pared
                if min(y2, y3) <= intersect_y <= max(y2, y3) and 0 <= t <=
                1:
                    intersected_walls.append((x2, y2, x3, y3, walltype))
            elif x0 >= x1: # Rayo vertical y coincide con la pared
                # Verificar si el rango del rayo interseca con la pared
                if min(y0, y1) <= max(y2, y3) and max(y0, y1) >= min(y2,
                y3):
                    intersected_walls.append((x2, y2, x3, y3, walltype))
            elif y2 == y3: # Pared horizontal
            # Calcular el punto de intersección
            if y0 <= y1: # Rayo no es horizontal
                t = (y2 - y0) / (y1 - y0)
                intersect_x = x0 + t * (x1 - x0)
                # Verificar si el punto de intersección está dentro del rango
                del segmento de la pared
                if min(x2, x3) <= intersect_x <= max(x2, x3) and 0 <= t <=
                1:
                    intersected_walls.append((x2, y2, x3, y3, walltype))
            elif y0 == y1 and x2 == x3: # Rayo horizontal y pared vertical
                if min(x0, x1) <= x2 <= max(x0, x1) and min(y2, y3) <= y0 <=
                max(y2, y3):
                    intersected_walls.append((x2, y2, x3, y3, walltype))
            # Casos donde el rayo es horizontal y la pared es vertical
            if y0 == y1 and x2 == x3: # Rayo horizontal y pared vertical
                if min(x0, x1) <= x2 <= max(x0, x1) and min(y2, y3) <= y0 <=
                max(y2, y3):
                    intersected_walls.append((x2, y2, x3, y3, walltype))
            # Casos donde el rayo es vertical y la pared es horizontal
            if x0 == x1 and y2 == y3: # Rayo vertical y pared horizontal
                if min(y0, y1) <= y2 <= max(y0, y1) and min(x2, x3) <= x0 <=
                max(x2, x3):
                    intersected_walls.append((x2, y2, x3, y3, walltype))
    return intersected_walls

def process_point(event):
    x, y = event.xdata, event.ydata
    if len(selected_points) < 2:
        selected_points.append((x, y))
    if len(selected_points) == 2:
        # Calcular la distancia en pixeles entre los dos puntos
        seleccionados
        px1, py1 = selected_points[0]
        px2, py2 = selected_points[1]
        pixel_distance = np.sqrt((px2 - px1) ** 2 + (py2 - py1) ** 2)
        # Solicitar al usuario la distancia real en metros
        real_distance = simpledialog.askfloat("Distancia Real",
        "Introduce la distancia real en metros:")
        if real_distance is not None:
            global meter_to_pixel_factor
            meter_to_pixel_factor = real_distance / pixel_distance
            print("Factor de conversión (MPM /m/pixel):
            (meter_to_pixel_factor)")
            # Cerrar la ventana de selección de puntos y abrir una nueva
            ventana para seleccionar el transmisor
            root.destroy()
            ask_transmitter_position()

def ask_transmitter_position():
    def on_click(event):
        if event.inlines is not None:
            x, y = event.xdata, event.ydata
            root.destroy()
            process_transmitter_position(x, y)
    # Crear la ventana de Tkinter para el plano
    root = tk.Tk()
    root.title("Selección de la posición del transmisor")
    # Crear una figura y un eje para el gráfico del plano
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
    ax.set_xlim(x_min, x_max)
    ax.set_ylim(y_min, y_max) # Invertir el eje y para que 0 esté en la
    parte superior
    ax.set_aspect('equal')
    ax.plot(xt, yt, marker='o', color='black', markersize=1,
    markeredgcolor='red', zorder=2)
    # Dibujar las líneas en el gráfico
    for (xl, yl, x2, y2, walltype) in lines:
        ax.plot([xl, x2], [yl, y2], wall_color[walltype])
    # Configurar el evento de clic en el gráfico
    fig.canvas.mpl_connect('button_press_event', on_click)
    # Mostrar el gráfico en Tkinter
    canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=root)
    canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
    canvas.draw()
    # Esperar a que el usuario seleccione un punto
    root.mainloop()

def process_transmitter_position(x0, y0):
    # Diccionario de pérdidas por tipo de pared y frecuencia
    wall_losses = {
1: {700e6: 1.45, 850e6: 2.40, 1700e6: 4.02, 1900e6:
13.85, 2100e6: 13.10, 2600e6: 9.40, 3500e6: 14.11},
2: {700e6: 3.00, 850e6: 5.00, 1700e6: 8.00, 1900e6:
20.00, 2100e6: 210.0, 2600e6: 19.0, 3500e6: 29.00},
3: {700e6: 7.10, 850e6: 3.50, 1700e6: 4.51, 1900e6:
10.52, 2100e6: 17.25, 2600e6: 14.44, 3500e6: 17.09},
4: {700e6: 25.2, 850e6: 14.6, 1700e6: 15.60, 1900e6:
28.37, 2100e6: 21.25, 2600e6: 19.57, 3500e6: 33.07},
}
    # Voy a escribir un Wall Losses basado, no en mis medidas,
    sino en los valores de los artículos:
    wall_losses = {
1: {700e6: 3.00, 850e6: 3.000, 1700e6: 3.00, 1900e6:
3.000, 2100e6: 6.000, 2600e6: 6.000, 3500e6: 6.000},
2: {700e6: 12.0, 850e6: 12.00, 1700e6: 12.47,
1900e6: 12.470, 2100e6: 12.470, 2600e6: 12.470, 3500e6: 12.470},
3: {700e6: 6.00, 850e6: 6.000, 1700e6: 6.00, 1900e6:
6.00, 2100e6: 6.00, 2600e6: 6.00, 3500e6: 6.00},
4: {700e6: 10.0, 850e6: 10.00, 1700e6: 10.0, 1900e6:
10.00, 2100e6: 10.00, 2600e6: 10.00, 3500e6: 10.00},
}
    # Ladrillo: 2; Columna: 3; Vidrio: 4; Armario Metálico
    #1; Brick: concrete, concrete block - 2; 2: Foundation
    wall - 15; 3: Glass Window - 3; 4: Metal Shelf - 6
    free_space_loss = 20 * np.log10(distance**4 * np.pi /
    c)

    # Dibujar las líneas en el gráfico
    for (xl, yl, x2, y2, walltype) in lines:
        ax.plot([xl, x2], [yl, y2], wall_color[walltype], lw=1)

```

```

model_loss = sum(wall_losses[walltype][f] for (L, _) in
    _ walltype) in intersected_walls)
total_loss = free_space_loss + model_loss
elif modelo == "MWM":
    #global wall_losses
    #voy a escribir un Wall Losses basado, no en mis medidas,
    #sino en los valores de los artículos:
    #1: Ladrillo, 2: Columna, 3: Vidrio, 4: Superficie
    #Metalica
    wall_losses = {
        1: (700e6: 4.0, 850e6: 4.0, 1700e6: 4.0, 1900e6:
            4.0, 2100e6: 4.0, 2600e6: 4.0, 3500e6: 4.0, 4.0),
        2: (700e6: 12.47, 850e6: 12.47, 1700e6: 12.47,
            1900e6: 12.47, 2100e6: 12.47, 2600e6: 12.47, 3500e6: 12.47),
        3: (700e6: 6.0, 850e6: 6.0, 1700e6: 6.0, 1900e6:
            6.0, 2100e6: 6.0, 2600e6: 6.0, 3500e6: 6.0),
        4: (700e6: 10.0, 850e6: 10.0, 1700e6: 10.0, 1900e6:
            10.0, 2100e6: 10.0, 2600e6: 10.0, 3500e6: 10.0),
    }
    #-----
    #Partiré el modelo entre 3 términos:
    #B: Free space loss con dB
    #L: 10 * n * log(d)
    #MWM: Factor de pérdidas por paredes
    n = 2 #Recomendado en la literatura
    L0 = 20 * np.log10(f * 4 * np.pi / c)
    Ld = 10 * n * np.log10(distance)
    intersected_walls = count_walls(x0, y0, x + x_min, y +
        y_min, lines)
    # Calcular la pérdida total debido a las paredes
    model_loss = sum(wall_losses[walltype][f] for (L, _) in
        _ walltype) in intersected_walls)
    total_loss = L0 + Ld + model_loss
elif modelo == "ITU":
    #Los valores se sacan de la recomendación ITU-R 1238,
    #Cuadro 2. Coeficientes de pérdida de transmisión básica
    #válidos entre 300 MHz y 82.0 GHz
    #https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-
    P-1238-12-202308-11PDF-S.pdf
    intersected_walls = count_walls(x0, y0, x + x_min, y +
        y_min, lines)
    if len(intersected_walls) == 0: #Hay loss
        alfa = 1.46
        beta = 34.62
        gamma = 2.03
        sigma = 3.76
    elif len(intersected_walls) >= 1: # No hay loss
        alfa = 2.46
        beta = 29.53
        gamma = 2.38
        sigma = 5.04
    model_loss = 10 * alfa * np.log10(distance) + beta + 10
    * gamma * np.log10(f/1e9)
    #mu = model_loss # free_space_loss
    free_space_loss = 0
    total_loss = free_space_loss + model_loss
    #Se pone cero porque el modelo no indica nada de añadir
    #FSI a la pérdida total
    #Solo se tienen implícitamente en cuenta para el cálculo
    de mu
    P_r = P_t + G_t + G_r - total_loss
    ...
    #Prueba para Interpolador
    # Interpolación para obtener el mapa completo
    points = np.array([x.flatten(), y.flatten()]).T
    values = Pr.flatten()
    # Interpolo los valores para obtener el mapa de pérdidas
    completo
    # Pr_map = griddata(points, values, (X, Y), method='cubic') #
    Usa 'linear' o
    'cubic'
    #Prueba para Interpolador**
    Pr_map[y, x] = P_r
    measuremade += 1
    if P_r >= -90:
        good += 1
    # Crear el mapa de calor de pérdidas
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
    #Prueba para Interpolador
    dbmin=Pr_map.min()
    print("Pr mínima: " + str(dbmin))
    dbmax=Pr_map.max()
    print("Pr máxima: " + str(dbmax))
    print("Puntos con Señal Excelente: " + str(excellent) )
    print("Puntos con Señal Buena: " + str(good) )
    print ("Puntos totales: " + str(measuremade) )
    print ("Excelent Coverage: " + str(excellent/measuremade*100) + " %")
    print ("Good Coverage: " + str(good/measuremade*100) + " %")
    ax.plot(xt, yt, marker='o', color='black', markersize=1,
        markeredgecolor='red', zorder=2)
    cax = ax.imshow(Pr_map, cmap='jet', interpolation='gaussian',
        extent=[x_min, x_max, y_min, y_max], alpha=1, vmin=dbmin, vmax=dbmax)
    ax.set_xlim(x_min, x_max)
    ax.set_ylim(y_min, y_max) # Invertir el eje y para que 0 esté en la parte
    superior
    ax.set_aspect('equal')
    #Nota para dar info en la
    #imagen
    # Crear la nota como una cadena de texto
    nota = (
        f'Frecuencia: {f/1e9} GHz\n'
        f'Potencia Tx: {P_t} dBm\n'
        f'RSSI Buena: {int(good/measuremade*100)} %\n'
        f'FMP: {int(np.round(1/meter_to_pixel_factor))} pixel/metro'
    )
    # Agregar la nota al gráfico en la esquina superior derecha
    ax.text(
        xnota, ynota, # Coordenadas relativas (fuera del gráfico principal)
        transform=ax.transAxes, # Coordenadas relativas al eje
        fontsize=10,
        verticalalignment='top',
        bbox=dict(facecolor='white', alpha=1, edgecolor='black') #
        Opcional: fondo y borde
    )
    # fin de la
    # nota
    #-----
    # Crear la ventana de Tkinter para seleccionar dos puntos
    root = tk.Tk()
    root.title("Selección de puntos para definir el factor de conversión")
    # Crear una figura y un eje para el gráfico del plano
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
    ax.set_xlim(x_min, x_max)
    ax.set_ylim(y_max, y_min) # Invertir el eje y para que 0 esté en la parte
    superior
    ax.set_aspect('equal')
    # Dibujar las líneas en el gráfico
    for (x1, y1, x2, y2, walltype) in lines:
        ax.plot([x1, x2], [y1, y2], wall_colors[walltype])
    # Configurar el evento de clic en el gráfico
    fig.canvas.mpl_connect('button_press_event', process_point)
    # Mostrar el gráfico en Tkinter
    canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=root)
    canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
    canvas.draw()
    # Esperar a que el usuario seleccione dos puntos
    root.mainloop()
    #FIN DEL EJECUTOR MULTIMODELO
    #-----
    # Crear el modelo de interpolación
    rbf = RBF(x_points, y_points, potencias, function='multiquadric', epsilon=1)
    # Cambia epsilon si es necesario
    # Generar la cuadrícula para la interpolación
    grid_x, grid_y = np.linspace(x_min, x_max, resolution), np.linspace(y_max,
        y_min, resolution)
    grid_x, grid_y = np.meshgrid(grid_x, grid_y)
    # Interpolo para toda la cuadrícula
    grid_x_rbf = rbf(grid_x, grid_y)
    # Graficar el mapa de calor
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
    cax = ax.imshow(
        grid_x_rbf,
        cmap='jet',
        origin='upper', # Aseguro que el origen esté en la esquina inferior
        izquierda
        extent=[x_min, x_max, y_min, y_max], # Alinea los datos con los ejes
        alpha=0.7,
        aspect='equal'
    )
    # Dibujar los puntos de medida
    for i, (y, x) in enumerate(puntos): # [y, x] formato
        ax.plot(x, y, 'o', markersize=15, markeredgecolor='black', zorder=5)
        print(potencias[i])
        ax.text(x, y, str(i + 1), color='black', fontsize=8, ha='center',
            va='center', zorder=6)
    # Dibujar las líneas en el gráfico
    for (x1, y1, x2, y2, walltype) in lines:
        ax.plot([x1, x2], [y1, y2], wall_colors[walltype])
    # Personalizar el gráfico
    ax.set_title("Mapa RSSP Interpolado DM-T")
    ax.set_xlim(x_min, x_max)
    ax.set_ylim(y_max, y_min)
    ax.grid()
    # Barra de color
    cbar = plt.colorbar(cax, ax=ax, orientation='vertical', shrink=0.5,
        pad=0.07)
    cbar.set_label('RSSP (dBm)')
    # Guardar la figura
    fig.savefig("mapa_RSSP_interpolado.PNG", dpi=300, bbox_inches='tight')
    plt.show()
    print(potencias)
    #-----
    # reducir pr map
    # Los puntos estan en formato (y, x)!!!!!!
    csv_comp = "C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
        Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion/Medidas
        Finales/FinalDefinitivo/CompFinal/RSSP_mapa_clear.csv"
    puntos = [(870, 1400),
        (870, 957),
        (870, 800),
        (870, 600), #Fin de la línea del río
        (665, 600), #Paisillo
        (660, 430), #Mesa Conector
        (680, 430), #Puerta de la sala de juntas
        (400, 430), #Frente a Manda
    ]

```

4.3 Interpolador de las medidas RSSI y RSSRP

```

# ESTE SEPARADOR INDICA QUE LO SIGUIENTE VA EN OTRO CUADRO DEL
#NOTEBOOK
#-----
#ACLÁRESE QUE ESTE CÓDIGO DEBE IR JUSTO AL FINA DEL CÓDIGO DEL ANEXO 4,
# PUES USA SUS VARIABLES PARA INTERPOLAR LAS MEDIDAS Y TENER COHERENCIA EN
# TAMAÑO DE LOS MAPAS
#ACLÁRESE IGUALMENTE QUE SE DEBE EJECUTAR UNA VEZ FINALIZADOS TODOS LOS
# PROCESOS DE LOS CÓDIGOS ANTERIORES
#Import numpy as np
#Import matplotlib.pyplot as plt
#Import csv
from scipy.interpolate import RBF
# Ruta del archivo CSV de las potencias de donde leerá
ruta_csv_medidas = "C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
    Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion/Medidas
    Finales/FinalDefinitivo/CompFinal/RSSP_mapa_clear.csv"
# Leer las potencias desde el archivo CSV
with open(ruta_csv_medidas, 'r') as file:
    reader = csv.reader(file)
    for row in reader:
        potencias = np.array([float(value) for value in row])
# Ruta del archivo CSV de las potencias
ruta_csv_medidas = "C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ
    Cali/Desktop/Modelo_de_Propagacion/ResultadosComp/comp_measure_clear.csv"
# Leer las potencias desde el archivo CSV
with open(ruta_csv_medidas, 'r') as file:
    reader = csv.reader(file)
    for row in reader:
        potencias = np.array([float(value) for value in row])
# Generar el mapa de calor interpolado
resolution = 150
#-----
# ESTE SEPARADOR INDICA QUE LO SIGUIENTE VA EN OTRO CUADRO DEL
#NOTEBOOK
#-----
#ACLÁRESE QUE ESTE EXTRACTOR DEBE IR JUSTO DESPUÉS DEL CÓDIGO DEL MODELO
# PUES USA SUS VARIABLES PARA EXTRAER LOS DATOS
#ACLÁRESE QUE ESTE SE DEBE EJECUTAR DESPUÉS QUE EL MODELO CALCULA EL MAPA
# DE CALOR
# Extracción de información en ruta de medidas
#-----
if len(potencias) != len(puntos):
    raise ValueError("El número de potencias no coincide con el número de
    puntos de medida.")
x_points = []
y_points = []
for i, (y, x) in enumerate(puntos): # [y, x] formato
    x_points.append(x)
    y_points.append(y)
# Crear el modelo de interpolación
rbf = RBF(x_points, y_points, potencias, function='multiquadric', epsilon=1)
# Cambia epsilon si es necesario
# Generar la cuadrícula para la interpolación
grid_x, grid_y = np.linspace(x_min, x_max, resolution), np.linspace(y_max,
    y_min, resolution)
grid_x, grid_y = np.meshgrid(grid_x, grid_y)
# Interpolo para toda la cuadrícula
grid_x_rbf = rbf(grid_x, grid_y)
# Graficar el mapa de calor
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
cax = ax.imshow(
    grid_x_rbf,
    cmap='jet',
    origin='upper', # Aseguro que el origen esté en la esquina inferior
    izquierda
    extent=[x_min, x_max, y_min, y_max], # Alinea los datos con los ejes
    alpha=0.7,
    aspect='equal'
)
# Dibujar los puntos de medida
for i, (y, x) in enumerate(puntos): # [y, x] formato
    ax.plot(x, y, 'o', markersize=15, markeredgecolor='black', zorder=5)
    print(potencias[i])
    ax.text(x, y, str(i + 1), color='black', fontsize=8, ha='center',
        va='center', zorder=6)
# Dibujar las líneas en el gráfico
for (x1, y1, x2, y2, walltype) in lines:
    ax.plot([x1, x2], [y1, y2], wall_colors[walltype])
# Personalizar el gráfico
ax.set_title("Mapa RSSP Interpolado DM-T")
ax.set_xlim(x_min, x_max)
ax.set_ylim(y_max, y_min)
ax.grid()
# Barra de color
cbar = plt.colorbar(cax, ax=ax, orientation='vertical', shrink=0.5,
    pad=0.07)
cbar.set_label('RSSP (dBm)')
# Guardar la figura
fig.savefig("mapa_RSSP_interpolado.PNG", dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.show()
print(potencias)

```

4.4 Extractor de datos del mapa de calor

```

# ESTE SEPARADOR INDICA QUE LO SIGUIENTE VA EN OTRO CUADRO DEL
#NOTEBOOK
#-----
#ACLÁRESE QUE ESTE EXTRACTOR DEBE IR JUSTO DESPUÉS DEL CÓDIGO DEL MODELO
# PUES USA SUS VARIABLES PARA EXTRAER LOS DATOS
#ACLÁRESE QUE ESTE SE DEBE EJECUTAR DESPUÉS QUE EL MODELO CALCULA EL MAPA
# DE CALOR
# Extracción de información en ruta de medidas
#-----
# reducir pr map
# Los puntos estan en formato (y, x)!!!!!!
csv_comp = "C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
    Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion/Medidas
    Finales/FinalDefinitivo/CompFinal/comp_modelo_clear.csv"
puntos = [(870, 1400),
    (870, 957),
    (870, 800),
    (870, 600), #Fin de la línea del río
    (665, 600), #Paisillo
    (660, 430), #Mesa Conector
    (680, 430), #Puerta de la sala de juntas
    (400, 430), #Frente a Manda

```

```

(400, 600), #inicia la línea de los cerros
(400, 800),
(400, 925),
(400, 1200),
(400, 1400),
(400, 1600), #fin de la línea de los cerros
(665, 800), #Centro 1
(665, 925), #Centro 1
(665, 1400), #Centro 1
(400, 1100),
(665, 1100),
(870, 1100)
]
# Definir el tamaño del bloque para el promedio (por ejemplo, 4x4)
block_size = 10
block_size = int(block_size)
l1lines = []
for (x1, y1, x2, y2, walltype) in lines:
    l1lines.append((x1/block_size, y1/block_size, x2/block_size, y2/block_size, walltype))
puntos_r = []
for (x, y) in puntos:
    puntos_r.append((x//block_size, y//block_size))

x_min = x_min/block_size
x_max = x_max/block_size
y_min = y_min/block_size
y_max = y_max/block_size

# Obtener las dimensiones del mapa original
height, width = Pr_map.shape

# Asegurarse de que el tamaño del mapa sea divisible por el tamaño del bloque
height_r = height // block_size
width_r = width // block_size

# Crear un nuevo mapa para almacenar los valores promedio
Pr_map_r = np.zeros((height_r, width_r))

# Realizar la Transformada de Hough para detectar líneas
minLineLength = 10
maxLineGap = 5
lines = cv2.HoughLinesP(dilation, 1, np.pi / 180, 50, minLineLength, maxLineGap)
# Nota es la línea original:
lines = cv2.HoughLines(binary, 1, np.pi/180, 50, minLineLength, maxLineGap)

if lines is not None:
    lines = [list(line[0]) + [1] for line in lines] # Añadir el tipo de pared (1 por defecto)
    else:
        lines = []
return img, lines

# Función para mostrar la imagen en el canvas
def show_image_on_canvas(canvas, img):
    img_rgb = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2RGB)
    img_pil = Image.fromarray(img_rgb)
    img_tk = ImageTk.PhotoImage(image=img_pil)
    canvas.create_image(0, 0, anchor=tk.NW, image=img_tk)
    canvas.image = img_tk

# Función para borrar líneas
def erase_line(event, canvas, lines, scale):
    x_click, y_click = event.x, event.y
    threshold = 5 # Tolerancia de píxeles para detectar la línea
    for i, line in enumerate(lines):
        x1, y1, x2, y2 = [int(coord * scale) for coord in line[:4]]
        # Verificar si el clic está dentro del dominio de la línea
        if min(x1, x2) - threshold <= x_click <= max(x1, x2) + threshold and
           min(y1, y2) - threshold <= y_click <= max(y1, y2) + threshold:
            # Calcular la distancia del punto clicado a la línea
            distance = np.abs((y2 - y1) * x_click - (x2 - x1) * y_click + x2 * y1 - y2 * x1) / np.sqrt((y2 - y1) ** 2 + (x2 - x1) ** 2)
            if distance <= threshold:
                del lines[i]
                canvas.delete("all")
                show_image_on_canvas(canvas, scaled_img)
                draw_lines(canvas, lines, scale)
                break

# Limpiar el canvas y volver a dibujar la imagen y las líneas restantes
def start_erase_mode(canvas):
    canvas.config(cursor="cross")
    canvas.bind("<Button-1>", lambda event: erase_line(event, canvas, lines, scale))

# Función para restaurar el cursor normal
def stop_erase_mode(canvas):
    canvas.config(cursor="")
    canvas.unbind("<Button-1>")

def change_wall_type(event, canvas, lines, scale):
    x_click, y_click = event.x, event.y
    threshold = 5 # Tolerancia de píxeles para detectar la línea
    for i, line in enumerate(lines):
        x1, y1, x2, y2 = [int(coord * scale) for coord in line[:4]]
        # Verificar si el clic está dentro del dominio de la línea
        if min(x1, x2) - threshold <= x_click <= max(x1, x2) + threshold and
           min(y1, y2) - threshold <= y_click <= max(y1, y2) + threshold:
            # Calcular la distancia del punto clicado a la línea
            distance = np.abs((y2 - y1) * x_click - (x2 - x1) * y_click + x2 * y1 - y2 * x1) / np.sqrt((y2 - y1) ** 2 + (x2 - x1) ** 2)
            if distance <= threshold:
                print(lines[i])
                lines[i][4] = select_wall_type()
                print(lines[i])
                canvas.delete("all")
                show_image_on_canvas(canvas, scaled_img)
                draw_lines(canvas, lines, scale)
                break

# Configuración de la interfaz Tkinter
root = tk.Tk()
root.title("Entorno Interactivo para Caracterización de Paredes")
# Ajustar la ventana al tamaño de la pantalla
screen_width, screen_height = adjust_window(root)
# Crear un frame para el canvas y los botones
frame = tk.Frame(root)
frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

# Crear el canvas para mostrar la imagen y las líneas
canvas_width = screen_width - 200
canvas_height = screen_height
canvas = Canvas(frame, bg="white", width=canvas_width, height=canvas_height)
canvas.pack(side=tk.LEFT, fill=tk.BOTH, expand=True)

# Cargar la imagen y detectar las líneas
img_path = 'C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Call/Desktop/plandopn.png'
img, lines = load_image_and_detect_lines(img_path)
# Variables
wall_types = set()

# Zoom
scale = 4
zoom_canvas = 4

def create_wall(canvas, lines, scale, zoom_canvas):
    # Escalar la imagen al tamaño del canvas y obtener el factor de escala
    scaled_img, scale = scale_image(img, canvas_width, canvas_height)
    # Mostrar la imagen escalada en el canvas
    show_image_on_canvas(canvas, scaled_img)

# Dibujar las líneas detectadas en el canvas con el factor de escala
draw_lines(canvas, lines, scale)

# Crear un frame para los botones y el zoom
button_frame = tk.Frame(frame, width=200, bg="lightgray")
button_frame.pack(side=tk.RIGHT, fill=tk.Y)

# Crear el canvas para mostrar el zoom
zoom_canvas = Canvas(button_frame, width=80, height=80, bg="white")

```

4.5 Código para crear el plano

```

# ACLARARSE QUE ESTE ES EL PRIMER CÓDIGO QUE EL LECTOR DEBE TRABAJAR SI QUIERE REALIZAR EL MESMO PROCESO.
ESTE CÓDIGO RECIBE UN PNG DEL BLUECHART DEL PLANO EN QUE QUIERA TRABAJAR
Y LAS PAREDES DEL BLUECHART DEBEN SER SIEMPRE DE 1 PIXEL DE ANCHO, DE LO CONTRARIO EL MODELO CALCULARÁ PÉRDIDAS ESTÁ.
RECUERDE QUE CADA RECTA EN EL PLANO ES UNA PARED

# INICIO DEL CÓDIGO INTERACTIVO PARA AJUSTAR PLANO

import cv2
import numpy as np
import tkinter as tk
from tkinter import Canvas, Button, FileDialog, SimpleDialog
from PIL import Image, ImageTk
import csv
import random

# Función para leer CSV
def read_csv():
    csv_path = FileDialog.askopenfilename(defaultextension=".csv",
    filetypes=[("CSV files", "*.csv")])
    global lines
    lines = []
    with open(csv_path, "r") as file:
        reader = csv.reader(file)
        for row in reader:
            if len(row) == 5: # Asegurarse de que hay 5 columnas
                x1, y1, x2, y2 = map(int, row[:4])
                walltype = int(row[4])
                #walltype = float(row[4])
                #x, coords.extend([x1, x2])
                #y, coords.extend([y1, y2])
                lines.append((x1, y1, x2, y2, walltype))
                wall_type.add(walltype)
            else:
                print(f"Filas con formato inesperado: {row}")
    canvas.delete("all")
    show_image_on_canvas(canvas, scaled_img)
    draw_lines(canvas, lines, scale)
    return lines

# Función para ajustar la ventana al tamaño de la pantalla
def adjust_window(root):
    screen_width = root.winfo.screenwidth()
    screen_height = root.winfo.screenheight()
    root.geometry(f"{screen_width}x{screen_height}")
    return screen_width, screen_height

# Función para escalar la imagen al tamaño del canvas
def scale_image(img, max_width, max_height):
    height, width = img.shape[:2]
    scale = min(max_width / width, max_height / height)
    new_width = int(width * scale)
    new_height = int(height * scale)
    resized_img = cv2.resize(img, (new_width, new_height),
    interpolation=cv2.INTER_AREA)
    return resized_img, scale

# Función para generar colores aleatorios que sean suficientemente diferentes entre sí
def generate_random_colors(num_colors):
    colors = []
    for i in range(num_colors):
        if i == 0:
            color = "green"
        else:
            color = "#%06x" % format(random.randint(0, 0xFFFFFF))
        colors.append(color)
    return colors

# Función para dibujar las líneas en la imagen con colores según el tipo de pared
def draw_lines(canvas, lines, scale):
    types = set(line[4] for line in lines) # Obtener los tipos de pared únicos
    type_to_color = {}
    # Generar colores aleatorios para cada tipo de pared
    colors = generate_random_colors(len(types))
    for t, color in zip(types, colors):
        type_to_color[t] = color
    # Dibujar cada línea con el color correspondiente a su tipo de pared
    for line in lines:
        x1, y1, x2, y2, wall_type = [int(coord * scale) for coord in line[:4]] + [line[4]]
        canvas.create_line(x1, y1, x2, y2, fill=type_to_color[wall_type], width=2)

# Función para cargar la imagen y detectar líneas
def load_image_and_detect_lines(img_path):
    img = cv2.imread(img_path)
    img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2RGB)
    # binary = cv2.threshold(img, 255, cv2.THRESH_BINARY)
    # binary = cv2.bitwise_not(binary)

## QUITAR SI ES NECESARIO
# Aplicar detección de bordes usando Canny
edges = cv2.Canny(img, 10, 100, apertureSize=3)
# Kernel = np.ones((4, 4), np.uint8)
# dilation = cv2.dilate(edges, kernel, iterations=1)

# Realizar la Transformada de Hough para detectar líneas
minLineLength = 10
maxLineGap = 5
lines = cv2.HoughLinesP(dilation, 1, np.pi / 180, 50, minLineLength, maxLineGap)
# Nota es la línea original:
lines = cv2.HoughLines(binary, 1, np.pi/180, 50, minLineLength, maxLineGap)

if lines is not None:
    lines = [list(line[0]) + [1] for line in lines] # Añadir el tipo de pared (1 por defecto)
    else:
        lines = []
return img, lines

# Función para mostrar la imagen en el canvas
def show_image_on_canvas(canvas, img):
    img_rgb = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2RGB)
    img_pil = Image.fromarray(img_rgb)
    img_tk = ImageTk.PhotoImage(image=img_pil)
    canvas.create_image(0, 0, anchor=tk.NW, image=img_tk)
    canvas.image = img_tk

# Función para borrar líneas
def erase_line(event, canvas, lines, scale):
    x_click, y_click = event.x, event.y
    threshold = 5 # Tolerancia de píxeles para detectar la línea
    for i, line in enumerate(lines):
        x1, y1, x2, y2 = [int(coord * scale) for coord in line[:4]]
        # Verificar si el clic está dentro del dominio de la línea
        if min(x1, x2) - threshold <= x_click <= max(x1, x2) + threshold and
           min(y1, y2) - threshold <= y_click <= max(y1, y2) + threshold:
            # Calcular la distancia del punto clicado a la línea
            distance = np.abs((y2 - y1) * x_click - (x2 - x1) * y_click + x2 * y1 - y2 * x1) / np.sqrt((y2 - y1) ** 2 + (x2 - x1) ** 2)
            if distance <= threshold:
                del lines[i]
                canvas.delete("all")
                show_image_on_canvas(canvas, scaled_img)
                draw_lines(canvas, lines, scale)
                break

# Limpiar el canvas y volver a dibujar la imagen y las líneas restantes
def start_erase_mode(canvas):
    canvas.config(cursor="cross")
    canvas.bind("<Button-1>", lambda event: erase_line(event, canvas, lines, scale))

# Función para restaurar el cursor normal
def stop_erase_mode(canvas):
    canvas.config(cursor="")
    canvas.unbind("<Button-1>")

def change_wall_type(event, canvas, lines, scale):
    x_click, y_click = event.x, event.y
    threshold = 5 # Tolerancia de píxeles para detectar la línea
    for i, line in enumerate(lines):
        x1, y1, x2, y2 = [int(coord * scale) for coord in line[:4]]
        # Verificar si el clic está dentro del dominio de la línea
        if min(x1, x2) - threshold <= x_click <= max(x1, x2) + threshold and
           min(y1, y2) - threshold <= y_click <= max(y1, y2) + threshold:
            # Calcular la distancia del punto clicado a la línea
            distance = np.abs((y2 - y1) * x_click - (x2 - x1) * y_click + x2 * y1 - y2 * x1) / np.sqrt((y2 - y1) ** 2 + (x2 - x1) ** 2)
            if distance <= threshold:
                print(lines[i])
                lines[i][4] = select_wall_type()
                print(lines[i])
                canvas.delete("all")
                show_image_on_canvas(canvas, scaled_img)
                draw_lines(canvas, lines, scale)
                break

# Configuración de la interfaz Tkinter
root = tk.Tk()
root.title("Entorno Interactivo para Caracterización de Paredes")
# Ajustar la ventana al tamaño de la pantalla
screen_width, screen_height = adjust_window(root)
# Crear un frame para el canvas y los botones
frame = tk.Frame(root)
frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

# Crear el canvas para mostrar la imagen y las líneas
canvas_width = screen_width - 200
canvas_height = screen_height
canvas = Canvas(frame, bg="white", width=canvas_width, height=canvas_height)
canvas.pack(side=tk.LEFT, fill=tk.BOTH, expand=True)

# Cargar la imagen y detectar las líneas
img_path = 'C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Call/Desktop/plandopn.png'
img, lines = load_image_and_detect_lines(img_path)
# Variables
wall_types = set()

# Zoom
scale = 4
zoom_canvas = 4

def create_wall(canvas, lines, scale, zoom_canvas):
    # Escalar la imagen al tamaño del canvas y obtener el factor de escala
    scaled_img, scale = scale_image(img, canvas_width, canvas_height)
    # Mostrar la imagen escalada en el canvas
    show_image_on_canvas(canvas, scaled_img)

# Dibujar las líneas detectadas en el canvas con el factor de escala
draw_lines(canvas, lines, scale)

# Crear un frame para los botones y el zoom
button_frame = tk.Frame(frame, width=200, bg="lightgray")
button_frame.pack(side=tk.RIGHT, fill=tk.Y)

# Crear el canvas para mostrar el zoom
zoom_canvas = Canvas(button_frame, width=80, height=80, bg="white")

```

```

zoom_canvas.pack(pady=10)

# Crear los botones
btn_create = Button(button_frame, text="Crear Pared", command=lambda:
create_wall(canvas, lines, scale, zoom_canvas))
btn_erase.pack(pady=10)

btn_erase = Button(button_frame, text="Borrar Linea", command=lambda:
start_erase_mode(canvas))
btn_erase.pack(pady=10)

btn_stop_erase = Button(button_frame, text="Detener Borrado",
command=lambda: stop_erase_mode(canvas))

```

```

btn_stop_erase.pack(pady=10)

btn_type = Button(button_frame, text="Cambiar Tipo", command=lambda:
start_change_mode(canvas))
btn_type.pack(pady=10)

btn_type = Button(button_frame, text="Detener Cambiar Tipo", command=lambda:
stop_change_mode(canvas))
btn_type.pack(pady=10)

btn_save = Button(button_frame, text="Leer CSV", command=lambda: read_csv())
btn_save.pack(pady=10)

```

```

btn_save = Button(button_frame, text="Guardar CSV", command=lambda:
save_lines_to_csv(lines))
btn_save.pack(pady=10)

# Iniciar el bucle principal de la interfaz
root.mainloop()
#FIN DEL CÓDIGO PARA CREAR LOS PLANOS
SIEMPRE VEZ USADO TENGA EL CSV DE SU PLANO, PROCEDA A CALCULAR LOS MAPAS DE
CALOR QUE NECESITE

```

4.6 Lector de los datos CSV generados por el RSA 306 B

```

import os
import csv
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Definir las frecuencias centrales y anchos de banda (en Hz) para cada
operador
operators = {
    'PCS': {
        #MovistarPCS: (1956.765, 1566),
        #ClaroPCS: (1937.565, 1566),
        #TigoPCS: (1988.065, 2066),
    },
    'AMG': {
        #NI 9MHz: (2132.565, 566),
        #NI 10MHz: (2128.6, 1066),
        #MovistarAMG: (2132.565, 1566),
        #TigoAMG: (2147.565, 1566),
    },
    'DME': {
        #NI 10MHz: (2648.6, 1066),
        #ClaroDME: (2652.565, 1566),
        #ClaroDME: (2669.665, 2066),
    }
}

```

```

# Inicializar listas para comp_measure de cada operadora
comp_measure_claro = []
comp_measure_tigo = []
comp_measure_movistar = []

# Función para leer un archivo CSV y extraer frecuencias y niveles de potencia
def read_csv(filepath):
    frequencies = []
    power_levels = []
    trace_data = False

    with open(filepath, 'r') as file:
        reader = csv.reader(file)
        for row in reader:
            if 'Trace' in row:
                trace_data = True
                continue
            if trace_data:
                try:
                    power = float(row[0])
                    frequency = float(row[1])
                    power_levels.append(power)
                    frequencies.append(frequency)
                except:
                    continue

    return np.array(frequencies), np.array(power_levels)

# Función para calcular la potencia promedio en un rango de frecuencias
especifico
def calculate_segment_power(frequencies, power_levels, center_freq,
bandwidth):

```

```

min_freq = center_freq - bandwidth / 2
max_freq = center_freq + bandwidth / 2
mask = (frequencies >= min_freq) & (frequencies <= max_freq)
if np.any(mask):
    return np.mean(power_levels[mask]) #Se ajusta la ganancia
else:
    return "error" # Valor de referencia si no hay datos

# Función para calcular las potencias de cada operador en cada archivo CSV
def calculate_operator_powers(frequencies, power_levels):
    operator_powers = {}
    for band, segments in OPERATORS.items():
        for operator, (center_freq, bandwidth) in segments.items():
            avg_power = calculate_segment_power(frequencies, power_levels,
center_freq, bandwidth)
            operator_powers[operator] = avg_power
    return operator_powers

# Función para graficar las potencias por operadora para cada archivo CSV
def plot_operator_powers(csv_folder):
    csv_files = sorted([f for f in os.listdir(csv_folder) if
f.endswith('.csv')])
    operator_averages = {}
    file_names = []

    for csv_file in csv_files:
        filepath = os.path.join(csv_folder, csv_file)
        frequencies, power_levels = read_csv(filepath)
        avg_powers = calculate_operator_powers(frequencies, power_levels)

        # Añadir la potencia de cada operadora a sus respectivas listas de
comparación
        comp_measure_claro.append(avg_powers.get('ClaroDME', -100))
        comp_measure_tigo.append(avg_powers.get('TigoAMG', -100))
        comp_measure_movistar.append(avg_powers.get('MovistarAMG', -100))

        operator_averages.append(list(avg_powers.values()))
        file_names.append(csv_file)

# Configuración del gráfico
n_files = len(csv_files)
n_operators = len(operator_averages)
bar_width = 0.2
index = np.arange(n_files)

fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 10))

for i, operator in enumerate(avg_powers.keys()):
    bar_positions = index + 1 + bar_width
    operator_powers = [op_avg[i] for op_avg in operator_averages]
    ax.bar(bar_positions, operator_powers, bar_width, label=operator)

ax.set_xlabel('Archivos CSV', fontsize=12)
ax.set_ylabel('Potencia Promedio (dBm)', fontsize=12)
ax.set_title('Potencia Operadores por Cada Medida', fontsize=14)
ax.set_xticks(index + bar_width * (n_operators / 2))
ax.set_xticklabels(file_names, rotation=45, ha='right')

# Mover la leyenda a la derecha del gráfico
ax.legend(loc='center left', bbox_to_anchor=(1.0, 0.5), fontsize=10)

```

```

nota = (
    f'Claro DME: {int(np.round(comp_measure_claro[0]))} dBm\n'
    f'Tigo AMG: {int(np.round(comp_measure_tigo[0]))} dBm\n'
    f'Movistar AMG: {int(np.round(comp_measure_movistar[0]))} dBm'
)

# Agregar la nota al gráfico en la esquina superior derecha
ax.text(
    0.8, 0.0, # Coordenadas relativas (fuera del gráfico principal)
    nota,
    transform=ax.transAxes, # Coordenadas relativas al eje
    fontsize=10,
    verticalalignment='top',
    bbox=dict(accelor='white', alpha=1, edgecolor='black') #
Opcional: fondo y borde
)

plt.tight_layout()

plt.savefig(os.path.join(csv_folder, 'FinalEnPiso.png'), format='png',
dpi=900)
plt.show()

```

```

# Ruta de la carpeta con los CSV para el comp
csv_folder = 'C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la
instalacion/Puntos de medida/Medidas Finales buenas RSA306B'
# Ruta de la carpeta de la medida en la antena amarrada
csv_folder = 'C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion
csv_folder = 'C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion
Finales/FinalDefinitiva/backhaul'

# Generar el gráfico
plot_operator_powers(csv_folder)

# Imprimir los vectores de comparación de potencia para cada operador

print('comp_measure_claro =', comp_measure_claro)
print('comp_measure_tigo =', comp_measure_tigo)
print('comp_measure_movistar =', comp_measure_movistar)

# Final del lector rsa 306B

```

4.7 Lector de los datos .Specan generados por el RSA 306 B

```

import os
import csv
import xml.etree.ElementTree as ET
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

OPERATORS = {
    'PCS': {
        #MovistarPCS: (1956.765, 1566),
        #ClaroPCS: (1937.565, 1566),
        #TigoPCS: (1988.065, 2066),
    },
    'AMG': {
        #NI 9MHz: (2132.565, 566),
        #NI 10MHz: (2128.6, 1066),
        #MovistarAMG: (2132.565, 1566),
        #TigoAMG: (2147.565, 1566),
    },
    'DME': {
        #NI 10MHz: (2648.6, 1066),
        #ClaroDME: (2652.565, 1566),
        #ClaroDME: (2669.665, 2066),
    }
}

# Inicializar listas para comp_measure de cada operadora
comp_measure_claro = []
comp_measure_tigo = []
comp_measure_movistar = []

# Función para leer un archivo .Specan y extraer frecuencias y niveles de
potencia
def read_specan(filepath):
    frequencies = []
    power_levels = []
    try:
        tree = ET.parse(filepath)
        root = tree.getroot()

        # Buscar el nodo correspondiente a las frecuencias y niveles de
potencia
        waveform = root.find("./Waveform[@id='tracel']")
        if waveform is None:
            raise ValueError("No se encontró la traza en el archivo
(filepath)")

        x_start = float(waveform.find('XStart').text)
        x_stop = float(waveform.find('XStop').text)
        count = int(waveform.find('Count').text)

        y_values = [float(y.text) for y in waveform.findall('y')]

        # Generar las frecuencias correspondientes

```

```

frequencies = np.linspace(x_start, x_stop, count)
power_levels = np.array(y_values)
except Exception as e:
    print(f"Error leyendo el archivo {filepath}: {e}")

return np.array(frequencies), np.array(power_levels)

# Función para calcular la potencia promedio en un rango de frecuencias
especifico
def calculate_segment_power(frequencies, power_levels, center_freq,
bandwidth):
    min_freq = center_freq - bandwidth / 2
    max_freq = center_freq + bandwidth / 2
    mask = (frequencies >= min_freq) & (frequencies <= max_freq)
    if np.any(mask):
        return np.mean(power_levels[mask])
    else:
        return "ERR" # Valor de referencia si no hay datos

# Función para calcular las potencias de cada operador en cada archivo
.Specan
def calculate_operator_powers(frequencies, power_levels):
    operator_powers = {}
    for band, segments in OPERATORS.items():
        for operator, (center_freq, bandwidth) in segments.items():
            avg_power = calculate_segment_power(frequencies, power_levels,
center_freq, bandwidth)
            operator_powers[operator] = avg_power
    return operator_powers

# Función para graficar las potencias por operadora para cada archivo .Specan
def plot_operator_powers(specan_folder):
    specan_files = sorted([f for f in os.listdir(specan_folder) if
f.endswith('.Specan')])
    operator_averages = {}
    file_names = []

    for specan_file in specan_files:
        filepath = os.path.join(specan_folder, specan_file)
        frequencies, power_levels = read_specan(filepath)
        if frequencies.size > 0 and power_levels.size > 0:
            avg_powers = calculate_operator_powers(frequencies,
power_levels)

            # Añadir la potencia de cada operadora a sus respectivas listas
de comparación
            comp_measure_claro.append(avg_powers.get('ClaroDME', -100))
            comp_measure_tigo.append(avg_powers.get('TigoPCS', -100))
            comp_measure_movistar.append(avg_powers.get('MovistarAMG',
-100))

            operator_averages.append(list(avg_powers.values()))
            file_names.append(specan_file)

# Configuración del gráfico
n_files = len(specan_files)
n_operators = len(operator_averages)
bar_width = 0.2
index = np.arange(n_files)

fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 10))

for i, operator in enumerate(avg_powers.keys()):
    bar_positions = index + 1 + bar_width
    operator_powers = [op_avg[i] for op_avg in operator_averages]
    ax.bar(bar_positions, operator_powers, bar_width,
label=operator)

ax.set_xlabel('Archivos SPECAN', fontsize=12)
ax.set_ylabel('Potencia Promedio (dBm)', fontsize=12)
ax.set_title('Potencia Operadores por Cada Medida', fontsize=14)
ax.set_xticks(index + bar_width * (n_operators / 2))
ax.set_xticklabels(file_names, rotation=45, ha='right')

# Mover la leyenda a la derecha del gráfico
ax.legend(loc='center left', bbox_to_anchor=(1.0, 0.5),
fontsize=10)

plt.tight_layout()
plt.grid()
plt.savefig(os.path.join(specan_folder, 'FinalInPiso_SPECAN.png'),
format='png', dpi=900)
plt.show()

# Ruta de la carpeta con los archivos SPECAN
specan_folder = 'C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion/Medidas
Finales/FinalDefinitiva/Fronthaul/ver_22 proc'

# Generar el gráfico
plot_operator_powers(specan_folder)

# Imprimir los vectores de comparación de potencia para cada operador
print('comp_measure_claro =', comp_measure_claro)
print('comp_measure_tigo =', comp_measure_tigo)
print('comp_measure_movistar =', comp_measure_movistar)

csv_csv = 'C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion/Medidas
Finales/FinalDefinitiva/CompFinal/comp_measure_claro.csv' #Acá guarda los
datos
with open(csv_csv, mode='w', newline='') as file:
    writer = csv.writer(file)
    writer.writerow(comp_measure_claro)

```

4.8 Comparador de modelos

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import csv
from sklearn.metrics import mean_squared_error

# Leer los archivos CSV
with open('C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion/Medidas
Finales/FinalDefinitiva/CompFinal/comp_modelo_claro.csv', mode='r') as
file:

```

```

reader = csv.reader(file)
comp_modelo = [(float(value)) for value in next(reader)]

with open('C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion/Medidas
Finales/FinalDefinitiva/CompFinal/comp_ttu_claro.csv', mode='r') as file:
    reader = csv.reader(file)
    comp_ttu = [(float(value)) for value in next(reader)]

```

```

with open('C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion/Medidas
Finales/FinalDefinitiva/CompFinal/comp_modelo_claro.csv', mode='r') as file:
    reader = csv.reader(file)
    comp_modelo = [(float(value)) for value in next(reader)]

with open('C:/Users/Juan/OneDrive - PUJ Cali/Tesis de Grado/0000
Mediciones/Analizador de Espectro Portatil/Medidas de la instalacion/Medidas
Finales/FinalDefinitiva/CompFinal/comp_modelo_claro.csv', mode='r') as
file:

```


Anexo 6. Medidas RSRP finales con NCI

1. 01



2. 02



3. 03



4. 04



5. 05



6. 06



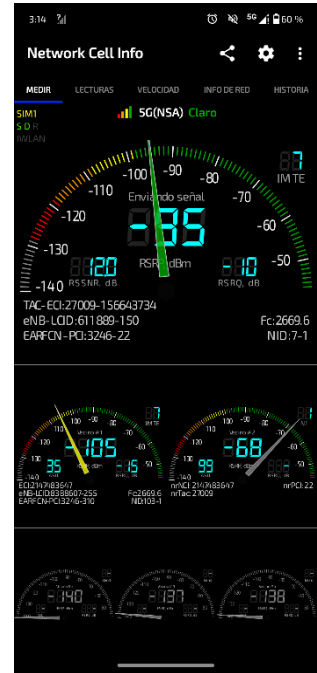
7. 07



9. 09



11. 11



8. 08



10. 10



12. 12



13. 13



15. 15



17. 17



14. 14



16. 16



18. 18



19. 19



20. 20



21. 21



22. 22



Anexo 7. Comunicaciones MinTIC.

A continuación, se comparten las respuestas de MinTIC tanto en OneDrive como anexos al documento:

- [MinTIC](#)

https://javerianacaliedu-my.sharepoint.com/:f/g/personal/juancarize13_javerianacali_edu_co/EjflJhzUxqIMqg5AumdLJVEB_YUnABD_6jMTe2TtXigZGw?e=5MWz6h

Ahora en versión adjunta al documento en formato .docx.



01. Posicion Antena
-Negativa inicial.pdf



02. Posicion Antena
- Respuesta ONTIC.p



03. Permiso para
Uso de Espectro (der



04. Permiso para
uso de Espectro (den

Anexo 8. Especificaciones del Amplificador Lintratek, extraído de <https://es.lintratek.com/kw16l-4g-mobile-booster-cell-phone-network-frequency-customization-65db-gain-16dbm-output-with-optional-n-sma-female-connector-product/>

Comer	Amplificador de señal de teléfono móvil para uso doméstico con luz andheld	
Diseño de apariencia	Rayo/blanco o color personalizado con pantalla LCD.	
Tamaño	125*90*18mm, 0,52 kg	
Tamaño del paquete	380*220*100 mm, 1,3 kg	
Frecuencia de soporte	(Banda 13) LTE 700MHZ (Banda 5) CDMA 850MHZ (By8)GSM 900MHZ (Banda 4) AWS 1700MHZ (Banda 3)DCS 1800MHZ (Banda 2) UDS 1900MHZ (Banda 1)WCDMA 2100MHZ (Banda 7) LTE 2600MHZ	
Cobertura	600m ²	
Potencia de salida	16 ±2dBm	16 ±2dBm
Ganar	65±2dB	65±2dB
MTBF	> 50000 horas	
Fuente de alimentación	AC:100~240V, 50/60Hz ; DC:5V 1A Estándar UE / Reino Unido / EE. UU.	
Consumo de energía	< 5W	