

Proyecto aplicado: análisis de radiofrecuencia de la calidad de experiencia (QOE) con software libre: guía técnica para sustentar vacíos de conectividad ante entes reguladores

Mauricio Salazar Páez

Asesor

Raul Bareno Gutiérrez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI

Especialización en Redes de Telecomunicaciones

2026

Dedicatoria

A mi familia, esposa y amigos, por su apoyo incondicional y colaboración constante, pilares fundamentales en mi crecimiento profesional. A la comunidad rural de Bogotá, especialmente a los habitantes de las veredas Curubital, La Regadera y Los Arrayanes, cuya valiosa retroalimentación permitió la consolidación de la etapa de planeación y diagnóstico. Finalmente, a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), por su disposición y respaldo académico durante todo mi proceso formativo y el desarrollo del presente proyecto.

Agradecimientos

Expreso mi más sincera gratitud a mi director de proyecto, por su orientación constante y sus valiosas observaciones, las cuales permitieron dotar a este trabajo del rigor técnico y metodológico necesario para un Especialista en Redes de Telecomunicaciones. A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) y a la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI), por brindarme las herramientas académicas y el acceso a recursos de investigación de alto nivel que sustentan este diagnóstico. Un agradecimiento especial a los habitantes de las veredas Curubital, La Regadera y Los Arrayanes en Bogotá. Su colaboración en la toma de datos y su retroalimentación en la fase de planeación fueron el motor de este proyecto, permitiendo que esta guía técnica sea un instrumento real de empoderamiento social. Finalmente, agradezco a las comunidades de desarrollo de software libre de *QGIS*, *Radio Mobile* y *G-NetTrack*, cuya tecnología accesible hizo posible la creación de esta metodología replicable para el cierre de la brecha digital rural.

Resumen

En la actualidad, los vacíos de cobertura móvil en las comunidades rurales restringen el acceso a servicios como la educación y la salud, lo que profundiza la desigualdad social y técnica. Superar esta barrera es fundamental para garantizar el derecho a la conectividad y fomentar el desarrollo socioeconómico en regiones aisladas, integrándolas al ecosistema digital nacional. Por ello, este proyecto documenta una metodología técnica replicable para el diagnóstico preciso de estas deficiencias, con el fin de proporcionar herramientas técnicas a las poblaciones vulnerables. El enfoque metodológico se basa en mediciones de campo y pruebas de calidad para contrastar la cobertura teórica con la realidad del usuario, empleando herramientas de software libre como *QGIS* para el análisis geoespacial, *Radio Mobile* para simulaciones y *G-NetTrack* para la captura de datos en la red de acceso. A través de este proceso y del análisis de la banda de 700 MHz, se entrega un diagnóstico georreferenciado y una guía metodológica que empodera a los líderes locales en la elaboración de informes técnicos robustos. En conclusión, el proyecto permite sustentar la mejora de la infraestructura ante operadores y entes reguladores como el MinTIC y la CRC, promoviendo así la equidad en el acceso a redes móviles y el desarrollo sostenible del territorio.

Palabras clave: Calidad de Experiencia (*QoE*), Brecha digital rural, Software libre, Regulación de telecomunicaciones.

Abstract

Currently, mobile coverage gaps in rural communities restrict access to essential services such as education and healthcare, deepening social and technical inequality. Overcoming this barrier is fundamental to guaranteeing the right to connectivity and fostering socioeconomic development in isolated regions, effectively integrating them into the national digital ecosystem. Therefore, this project documents a replicable technical methodology for the precise diagnosis of these deficiencies, aiming to provide technical tools to vulnerable populations. The methodological approach is based on field measurements (Drive Test) and Quality of Experience (QoE) testing to contrast theoretical coverage with the user's reality, employing open-source tools such as QGIS for geospatial analysis, Radio Mobile for simulations, and G-NetTrack for access network data collection. Through this process and the analysis of the 700 MHz band, the project delivers a detailed georeferenced diagnosis and a documented methodological guide that empowers local leaders to produce robust technical reports. In conclusion, the project enables the substantiation of infrastructure improvements before operators and regulatory bodies, such as MinTIC and the CRC, thus promoting equity in access to mobile networks and the sustainable development of the territory.

Keywords: Quality of Experience (QoE), Rural digital divide, Open-source software, Telecommunications regulation.

Definiciones

Calidad de Experiencia (*QoE*): Es la métrica prioritaria del proyecto, centrada en la percepción, satisfacción y experiencia general del usuario al utilizar los servicios de telecomunicaciones, superando las métricas puramente técnicas.

Drive Test y *Walk Test*: Metodologías de medición de campo que consisten en recopilar datos de la red móvil en movimiento (en vehículo o a pie, respectivamente) para verificar la cobertura real y la calidad de la señal en territorio.

Análisis RAN (Red de Acceso Radio): Proceso de recolección y evaluación de parámetros técnicos de la red móvil, como la intensidad de señal y la calidad de la conexión, a través de aplicaciones especializadas.

QGIS: Herramienta de software de código abierto para el Análisis Geoespacial que permite mapear, visualizar y analizar los datos de cobertura recolectados durante las pruebas de campo.

Radio Mobile: Software libre utilizado para la simulación y predicción de redes inalámbricas, permitiendo evaluar la configuración requerida para el despliegue de estaciones base.

G-NetTrack: Aplicación avanzada de análisis RAN utilizada para la recolección de datos técnicos georreferenciados durante la ejecución de los *Drive Tests*.

Vacíos de Cobertura Móvil: Situaciones de inconsistencia o inexistencia del servicio móvil, caracterizadas habitualmente por una discrepancia entre la cobertura teórica reportada por los operadores y la realidad del usuario.

Banda de 700 MHz: Porción del espectro radioeléctrico estratégica para zonas rurales debido a su mayor alcance y penetración, siendo óptima para mejorar la conectividad en áreas de difícil acceso.

Replicabilidad: Capacidad de la metodología para ser reproducida por otras comunidades o líderes locales utilizando herramientas de bajo costo y software abierto, fomentando el conocimiento comunal.

Entes Reguladores (MinTIC y CRC): Organismos gubernamentales (Ministerio TIC y Comisión de Regulación de Comunicaciones) encargados de supervisar el sector, formular políticas públicas y garantizar el cumplimiento de las obligaciones de cobertura.

Abogacía Digital: Acción de utilizar informes técnicos detallados y evidencia empírica para que las comunidades locales gestionen de manera efectiva la mejora de su infraestructura ante operadores y entes reguladores.

RSRP y *SINR*: Parámetros técnicos críticos recolectados por herramientas como *G-NetTrack*; el primero mide la potencia de la señal recibida y el segundo la relación señal/ruido, determinando la estabilidad de la conexión.

Zonas de Sombra: Áreas específicas identificadas mediante validación de campo donde la cobertura es nula o deficiente, a pesar de lo que indiquen los modelos teóricos.

Obligaciones de Hacer (ODH): Compromisos legales derivados de las subastas de espectro (Ejemplo 5G) donde los operadores deben realizar despliegues en zonas rurales desatendidas.

Tabla de Contenido

Objetivos.....	20
General.....	20
Específicos.....	20
Marco Conceptual.....	21
Marco Teórico	21
Propiedades de Propagación y Espectro en la Banda de 700 MHz.....	21
Arquitectura de Red de Acceso Radio (RAN) e Indicadores de Desempeño	21
Transición de Calidad de Servicio (QoS) a Calidad de Experiencia (QoE).....	22
Ecosistema de Software Libre y Modelado Predictivo	22
Abogacía Digital y Empoderamiento Técnico	23
Marco Referencial	23
Contexto Nacional y Brecha Digital	23
Marco Normativo y Ecosistema Institucional.....	24
Contexto Geográfico del Estudio	24
Estándares de Validación Tecnológica	24
Viabilidad y Replicabilidad Comunitaria.....	25
Metodología Diseño y Planeación	26
Fase de Conceptualización y Preparación	26
Revisión Documental	26
Configuración de Software.....	26
Planificación de Campo	26
Fase de Adquisición de Datos (Medición en Campo)	26

Ejecución de Pruebas	26
Captura de Parámetros RAN	26
Medición de QoE	27
Análisis Geoespacial y Propagación.....	27
Procesamiento en QGIS	27
Modelación en Radio Mobile.....	27
Optimización en 700 MHz	27
Diseño de Soluciones y Documentación	27
Propuestas Técnicas	27
Guía Metodológica.....	27
Generación de Informes y Escalamiento	28
Estructuración de Informes	28
Resultados.....	29
Diagnóstico de Cobertura Real y Calidad de Experiencia (QoE)	29
Protocolo de Alistamiento y Planificación Técnica	29
Ejecución de Recolección de Datos y Parámetros RAN.....	38
Análisis Potencia y tecnología	39
Métricas de Calidad de Experiencia (QoE).....	43
Análisis Geoespacial y Contraste de Cobertura	49
Cartografía de Cobertura Teórica.....	49
Validación de Infraestructura existente y su impacto	57
Propuesta de Solución Técnica Aplicada	59
Fundamentación técnica banda 700MHz.....	60

Infraestructura existente y perfil de elevación	60
Identificación de vacíos potenciales y Emplazamientos nuevos requeridos.....	63
Implementación de diseño final (simulación)	67
Informe de Escalamiento Regulatorio y Guía Metodológica Replicable	73
Elaboración del Insumo Regulatorio.....	73
Producto: Guía Metodológica Replicable	75
Conclusiones	77
Diagnóstico Georreferenciado y Caracterización de la Red.....	77
Análisis de Causas y Limitaciones Físicas	77
Propuesta de Optimización y Despliegue.....	77
Guía metodológica y transferencia de conocimiento	78
Recomendaciones y Limitaciones.....	79
Recomendación de expansión de infraestructura	79
Limitaciones del estudio y desafíos generales.....	79
Referencias Bibliográficas	81
Apéndices.....	90

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Resumen Fases Proyecto</i>	28
Tabla 2 <i>Puntos de interés identificados en la zona de aplicación</i>	32
Tabla 3 <i>Simbología y clasificación</i>	39
Tabla 4 <i>Consolidado de Resultados Técnicos y QoE en Campo</i>	46
Tabla 5 <i>Mapas de cobertura oficiales</i>	50
Tabla 6 <i>Emplazamientos de infraestructura existente como propuesta</i>	63
Tabla 7 <i>Emplazamientos de infraestructura definitivos como propuesta de despliegue</i>	66
Tabla 8 <i>Parametrización de Radio Mobile</i>	68
Tabla 9 <i>Matriz de configuración física final</i>	70

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Configuración y parametrización G-NetTrack</i>	30
Figura 2 <i>Veredas de influencia & ruta Usme Rural</i>	35
Figura 3 <i>Infraestructura Identificada de Redes Móviles</i>	37
Figura 4 <i>Toma de mediciones en cambo (Drive Test)</i>	38
Figura 5 <i>Análisis información RAN Operador Claro</i>	40
Figura 6 <i>Análisis información RAN Operador Movistar</i>	41
Figura 7 <i>Análisis información RAN Operador Tigo</i>	42
Figura 8 <i>Mapa de puntos de interés</i>	44
Figura 9 <i>Mediciones puntuales y análisis POIs</i>	45
Figura 10 <i>Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo UMTS (Claro)</i>	51
Figura 11 <i>Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo LTE (Claro)</i>	51
Figura 12 <i>Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo UMTS (Movistar)</i>	52
Figura 13 <i>Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo LTE (Movistar)</i>	53
Figura 14 <i>Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo UMTS (Tigo)</i>	54
Figura 15 <i>Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo LTE (Tigo)</i>	55
Figura 16 <i>Cobertura reportada WOM</i>	56

Figura 17 <i>Análisis línea de vista CED Rural La Mayoría vs Infraestructura Claro</i>	57
Figura 18 <i>Análisis línea de vista CED Rural El Curubital vs Infraestructura Claro</i>	58
Figura 19 <i>Análisis línea de vista USS Destino (Salud) vs Infraestructura Claro</i>	59
Figura 20 <i>Estructuras Tipo Torre Identificadas</i>	60
Figura 21 <i>Validación perfil de elevación para despliegue e implementación</i>	62
Figura 22 <i>Estacion EAAB Las mercedes Estructura</i>	63
Figura 23 <i>Simulación Inicial Uso de infraestructura existente</i>	64
Figura 24 <i>Sitio Nuevo Propuesto análisis</i>	66
Figura 25 <i>Predicción teórica de cobertura (Propuesta Final)</i>	71
Figura 26 <i>Radicaos entes gubernamentales MINTIC</i>	74
Figura 27 <i>Guia Metodológica página servidora</i>	75

Lista de apéndices

Apéndice A *Informe de Escalamiento a Operadores, Entes Reguladores y Gubernamentales ..* 90

Apéndice B *Guía Metodológica Replicable para el Análisis de Vacíos de Cobertura Rural* 91

Introducción

La conectividad móvil se ha transformado en un pilar fundamental para la equidad social y el desarrollo económico; no obstante, en Colombia persiste una brecha digital crítica en las zonas rurales. Este proyecto surge como una respuesta técnica desde la ingeniería de telecomunicaciones para abordar la discrepancia entre la cobertura teórica reportada por los operadores y la Calidad de Experiencia (*QoE*) que realmente perciben los usuarios en el territorio. La relevancia de este proyecto no solo radica en el diagnóstico técnico, sino en la aplicación de una filosofía de empoderamiento comunitario a través del conocimiento. (Alcaldía de Bogotá, 2020) (Steven, 2022)

A diferencia de las auditorías tradicionales de red que requieren herramientas propietarias de alto costo, esta propuesta se fundamenta en el uso de software libre y de código abierto, como *QGIS*, *Radio Mobile* y *G-NetTrack*. Esta elección garantiza la replicabilidad de la metodología, permitiendo que cualquier comunidad rural, comenzando por el caso de estudio en la zona rural de Bogotá, pueda autogestionar la recolección de pruebas de campo mediante *Drive Tests* y *Walk Test* con rigor profesional. (Gyokov Solutions, 2024) (QGIS Development Team, 2024)

A continuación, se estructuran la identificación de la problemática hasta la entrega de una solución técnica aplicada. inicialmente se detalla el planteamiento del problema y el marco conceptual que sustenta el uso de la banda de 700 MHz como tecnología estratégica para el despliegue rural. Posteriormente, se describe la metodología sistemática dividida en cinco fases, que abarcan desde la simulación de redes inalámbricas hasta la generación de informes de escalamiento regulatorio ante el MinTIC y la CRC. (Agencia Nacional del Espectro (ANE), 2020)

Finalmente, se busca trascender el ejercicio académico para convertir este en un insumo de abogacía digital. A través de la elaboración de una Guía Metodológica Replicable, se pretende que los resultados obtenidos sirvan como una herramienta tangible para que los líderes locales puedan sustentar técnicamente los vacíos de conectividad, impulsando así el desarrollo sostenible y la mejora efectiva en la calidad de vida de las poblaciones rurales.

Planteamiento del Problema

Descripción

La problemática central radica en la persistencia de vacíos de cobertura móvil en numerosas comunidades rurales, lo que resulta en una inconsistencia o inexistencia de servicio. Esta deficiencia es un factor limitante que restringe el acceso democrático y generalizado a la información, la educación, la salud y la inclusión económica, perpetuando la brecha digital y social en estas áreas.

La magnitud del problema en el contexto nacional es alta, evidenciada por informes que señalan que "el 90 % de los centros poblados no tienen cobertura 4G". A pesar de los esfuerzos y proyectos de conectividad implementados, existe una discrepancia entre la cobertura teórica que reportan los operadores y la percepción deficiente o la experiencia real del servicio por parte de los usuarios. Los niveles teóricos resultan optimistas y requieren una validación real de campo para identificar con precisión las áreas de baja o nula cobertura, también conocidas como "zonas de sombra".

Actualmente, las comunidades carecen de herramientas de bajo costo o el conocimiento técnico documentado para realizar un diagnóstico empírico y georreferenciado de estas deficiencias. El proyecto busca superar esta barrera mediante el uso de software libre como *QGIS*, *Radio Mobile* y *G-NetTrack*. Al aplicar mediciones técnicas puntuales (*Drive Test* y *QoE*), se puede obtener un análisis robusto que permita plantear soluciones menos costosas y escalables, como la optimización del despliegue en la banda de 700 MHz, que resulta ideal en zonas rurales por su mayor alcance y penetración. Sin un diagnóstico técnico sólido y una guía metodológica replicable, las comunidades rurales no pueden sustentar informes completos ante

los entes regulatorios (MinTIC y CRC) para lograr mejoras en la infraestructura y la eficiencia operativa de los operadores.

Pregunta de Investigación

Ante este escenario, la pregunta que busca responder el proyecto es: ¿Cómo se puede identificar y analizar los vacíos de cobertura móvil en comunidades rurales mediante mediciones de campo (*Drive Test* y *QoE*) y software libre, y cómo se puede documentar una metodología replicable para generar informes técnicos complejos que sirvan como insumo para la sustentación efectiva ante operadores y entes regulatorios, con el fin de proponer soluciones que mejoren la conectividad y, por ende, la calidad de vida de sus habitantes?

Justificación

La brecha digital en las zonas rurales de Colombia persiste como un desafío crítico debido a una geografía compleja que dificulta el despliegue de infraestructura convencional. En este contexto, el proyecto es pertinente en el sentido que aborda directamente las limitantes que impiden el acceso a servicios básicos de educación y salud, alineándose con políticas nacionales que buscan garantizar la conectividad universal como un derecho fundamental.

Asimismo, la investigación posee una alta relevancia técnica y social al proporcionar un diagnóstico basado en la experiencia real del usuario, superando las simulaciones teóricas que suelen ser excesivamente optimistas. Al validar la calidad del servicio en territorio, se genera información de alto valor para el desarrollo sostenible y se ofrecen pruebas empíricas necesarias para orientar las inversiones de los operadores y las decisiones del Estado.

La propuesta se sustenta en el uso estratégico de herramientas de software libre y de bajo costo como *QGIS*, *Radio Mobile* y *G-NetTrack*. Este enfoque garantiza que la metodología sea ejecutable y replicable sin la necesidad de grandes presupuestos en licencias de software,

permitiendo que comunidades con recursos limitados puedan realizar diagnósticos técnicos de alta precisión con herramientas de código abierto.

Finalmente, el estudio se centra en el análisis de la Calidad de Experiencia (*QoE*) y la optimización de la banda de 700 MHz en entornos rurales específicos. El alcance del trabajo culmina con la entrega de una guía metodológica que empodera a los líderes locales, brindándoles el soporte técnico necesario para gestionar mejoras en la conectividad ante entes reguladores como el MinTIC y la CRC.

Objetivos

Objetivo General

Implementar una metodología técnica basada en software libre y mediciones de campo (*Drive Test*) para diagnosticar vacíos de cobertura móvil en la zona rural de Bogotá, mediante una guía técnica que sustente la mejora de infraestructura ante entes reguladores.

Objetivos Específicos

Diagnosticar la cobertura móvil real y los parámetros de Calidad de Experiencia (*QoE*) mediante *Drive Tests* con la aplicación *G-NetTrack*, identificando geográficamente las deficiencias de red por cada operador.

Analizar geo-espacialmente las zonas de sombra detectadas mediante *QGIS* y *Radio Mobile*, contrastando técnicamente la cobertura teórica reportada frente a la experiencia real del usuario en territorio.

Proponer soluciones de red optimizadas en la banda de 700 MHz, fundamentadas en simulaciones de propagación que sustenten la viabilidad técnica de expansión de infraestructura ante el MinTIC y los operadores.

Desarrollar una guía metodológica replicable sobre el uso de software libre y protocolos de medición, que facilite a los líderes comunitarios la generación de informes técnicos robustos ante la CRC y el MinTIC.

Marco Conceptual

Marco Teórico

A continuación, se establecen los fundamentos científicos y tecnológicos que sustentan el análisis de redes móviles en entornos rurales, articulando los principios de la física de radiofrecuencia con las métricas modernas de evaluación de servicios.

Propiedades de Propagación y Espectro en la Banda de 700 MHz

La selección de bandas de frecuencia es el factor determinante para superar vacíos de conectividad en entornos de alta complejidad geográfica. Las bandas bajas, específicamente la frecuencia de 700 MHz, poseen propiedades físicas de baja atenuación por distancia y una elevada capacidad de difracción. Esta característica permite que la señal rodee obstáculos naturales y penetre en valles donde bandas de mayor frecuencia se verían bloqueadas por la pérdida de línea de vista (LOS). (Cárdenas, 2017)

En comparación con las bandas medias (1900 MHz o 2500 MHz), la banda de 700 MHz permite maximizar el radio de cobertura de las estaciones base (EB), optimizando el número de sitios necesarios para cubrir áreas extensas. Esta eficiencia técnica reduce la complejidad logística y los costos operativos en zonas de difícil acceso, convirtiéndose en la base para el despliegue de tecnologías 4G, 5G e Internet de las Cosas (IoT).

Arquitectura de Red de Acceso Radio (RAN) e Indicadores de Desempeño

El análisis de la Red de Acceso Radio (RAN) permite capturar el comportamiento físico de las ondas electromagnéticas en la última milla, superando las limitaciones de las predicciones teóricas por software. (Bustos, 2023). El diagnóstico de la red se fundamenta en dos parámetros críticos de la industria:

RSRP (Reference Signal Received Power): Mide la potencia de la señal de referencia recibida, siendo el indicador principal para determinar la presencia de cobertura.

SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio): Determina la calidad de la señal frente al ruido e interferencias, lo que define la estabilidad de la conexión y la capacidad efectiva de transporte de datos.

La brecha entre la simulación y la realidad técnica fundamenta la necesidad de realizar validaciones empíricas en campo para obtener datos precisos sobre el desempeño real de la red frente a los mapas teóricos.

Transición de Calidad de Servicio (QoS) a Calidad de Experiencia (QoE)

Este estudio prioriza la Calidad de Experiencia (*QoE*) sobre la Calidad de Servicio (*QoS*). Mientras que la *QoS* se enfoca en el rendimiento de la red desde la perspectiva del operador (latencia, jitter y ancho de banda), la *QoE* evalúa la satisfacción y percepción real del usuario final. Este cambio de paradigma permite traducir indicadores técnicos en impactos sociales tangibles, como la viabilidad de servicios de telemedicina, educación virtual y procesos de tecnificación agrícola. (Adamowicz, 2025)

Ecosistema de Software Libre y Modelado Predictivo

La arquitectura técnica del proyecto se sustenta en herramientas de código abierto que garantizan rigor y replicabilidad:

Análisis Geoespacial (QGIS): Actúa como el motor cartográfico para procesar datos georreferenciados, generando mapas de calor y delimitando con precisión las "zonas de sombra". (QGIS Development Team, 2024)

Simulación con Radio Mobile: Esta herramienta facilita la transición del dato empírico al modelo teórico. Utiliza el modelo de propagación Longley-Rice (Irregular Terrain Model - ITM)

para predecir la degradación de la señal considerando la topografía y las condiciones atmosféricas, permitiendo planificar la ubicación óptima de nuevas estaciones base. (Radio Mobile (Link Technologies, Inc.), 2024)

Auditoría con *G-NetTrack*: Permite la conversión de terminales móviles en instrumentos de medición profesional para la captura de parámetros RAN en tiempo real, eliminando la subjetividad de los reportes tradicionales.

Abogacía Digital y Empoderamiento Técnico

La abogacía digital define como el uso estratégico de esta evidencia empírica e informes técnicos para la gestión efectiva de infraestructura ante terceros. Este enfoque transforma al líder comunitario en un actor técnico capaz de sustentar vacíos de conectividad mediante indicadores robustos. La incidencia ante el Estado y los operadores trasciende la petición informal y se convierte en una exigencia técnica de cumplimiento de estándares, impulsando el desarrollo sostenible y la equidad digital en el territorio. (Mintic, 2022)

Marco Referencial

A continuación, se contextualiza el proyecto dentro de la realidad nacional de las telecomunicaciones en Colombia, estableciendo el entorno geográfico, normativo y social que valida la ejecución de la propuesta.

Contexto Nacional y Brecha Digital

La brecha digital en Colombia persiste como un desafío estructural que afecta desproporcionadamente a las poblaciones rurales. Según datos oficiales del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), aproximadamente el 90 % de los centros poblados en el país carecen de cobertura *4G*. Esta deficiencia en la infraestructura de red no solo limita la comunicación, sino que se traduce en una barrera crítica para la inclusión

económica, el desarrollo socioeconómico y el acceso democrático a servicios del Estado.

(Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), 2019)

Marco Normativo y Ecosistema Institucional

La articulación con el ecosistema institucional es el paso crítico para transformar hallazgos técnicos en mejoras tangibles. En este ámbito, el MinTIC y la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) actúan como los organismos rectores encargados de supervisar el sector y formular las políticas de conectividad.

Dentro de este marco legal, la banda de 700 MHz funciona como un instrumento regulatorio estratégico vinculado a las Obligaciones de Hacer (ODH) derivadas de las subastas de espectro. (Agencia Nacional del Espectro (ANE), 2020). Estas obligaciones exigen a los operadores móviles el despliegue de infraestructura en zonas rurales históricamente desatendidas. Por tanto, los diagnósticos empíricos generados en este estudio constituyen el sustento legal necesario para que los entes reguladores supervisen y exijan el cumplimiento de dichos compromisos de expansión.

Contexto Geográfico del Estudio

El área de intervención del proyecto se localiza en la zona rural sur de Bogotá, abarcando veredas como Curubital, Las Mercedes, La Regadera y Los Arrayanes. Estas zonas presentan desafíos particulares de acceso y una topografía compleja que dificulta la propagación de señales móviles. Esta realidad geográfica hace del uso de bandas bajas la solución técnica más eficiente para mitigar las deficiencias de cobertura reportadas por la comunidad y garantizar la equidad digital en el territorio.

Estándares de Validación Tecnológica

Para la verificación de cobertura móvil, las técnicas de *Drive Test* y *Walk Test* se consolidan como el estándar de referencia en la industria. La relevancia de estas metodologías en el presente estudio radica en su capacidad para identificar con precisión las "zonas de sombra" que los modelos teóricos suelen omitir. Al recolectar datos georreferenciados directamente en el territorio, se generan mapas de desempeño real que constituyen evidencia técnica robusta para procesos de auditoría ante los entes reguladores. (sutel, 2017)

Viabilidad y Replicabilidad Comunitaria

El uso de software libre representa una ruptura con la dependencia de herramientas de ingeniería propietarias de alto costo, garantizando la viabilidad económica del proyecto. Este enfoque fomenta la transferencia de conocimiento hacia los líderes comunitarios de la zona rural de Bogotá, eliminando las barreras de entrada por licenciamiento. Al ser una metodología de acceso abierto, se transforma en un activo social sostenible que permite a las comunidades rurales replicar estudios de cobertura de manera autónoma, convirtiendo la evidencia técnica en una herramienta de gestión para el cierre de la brecha digital. (Contreras, 2010)

Metodología Diseño y Planeación

El análisis de la conectividad rural integra las dimensiones cuantitativa y cualitativa a través de un enfoque mixto. La captura de parámetros técnicos de la red y el modelamiento geoespacial se complementan con la valoración de la experiencia de cara al usuario y el impacto social de la desconexión en el territorio. Esta combinación permite transformar los datos de radiofrecuencia en indicadores de abogacía digital para la comunidad.

La ejecución técnica se estructura en cinco fases secuenciales. Este procedimiento garantiza el rigor en el contraste entre la cobertura teórica reportada por operadores y la realidad operativa detectada en campo, asegurando replicabilidad del estudio en otros entornos rurales.

Fase de Conceptualización y Preparación

Para esta etapa se establecen las bases técnicas y la parametrización de herramientas.

Revisión Documental

Análisis de normativas del MinTIC/CRC y estándares de la banda de 700 MHz.

Configuración de Software

Instalación y preparación de QGIS, Radio Mobile y G-NetTrack.

Planificación de Campo

Diseño de rutas de navegación para Drive Tests.

Fase de Adquisición de Datos (Medición en Campo)

Orientada a la obtención de evidencia técnica objetiva mediante mediciones directas en la zona de aplicación.

Ejecución de Pruebas

Recorridos vehiculares y peatonales para verificar la cobertura real en tiempo real.

Captura de Parámetros RAN

Registro georreferenciado de indicadores técnicos (RSRP y SINR) para tecnologías 3G, 4G y 5G a través de G-NetTrack.

Medición de QoE

Evaluación de la perspectiva del usuario mediante pruebas de velocidad (carga/descarga), latencia y estabilidad de conexión.

Análisis Geoespacial y Propagación

Fase de convergencia entre la evidencia de territorio y los modelos matemáticos.

Procesamiento en QGIS

Importación de datos crudos para la generación de mapas de calor y delimitación geométrica de "vacío de cobertura".

Modelación en Radio Mobile

Ejecución de simulaciones teóricas para contrastar los datos empíricos con modelos de propagación estándar.

Optimización en 700 MHz

Modelado de escenarios potenciales para determinar la ubicación estratégica de estaciones base en los vacíos detectados.

Diseño de Soluciones y Documentación

Transformación de hallazgos en propuestas de ingeniería y herramientas de capacitación.

Propuestas Técnicas

Diseño de alternativas de conectividad técnica y económicamente viables basadas en la banda de 700 MHz.

Guía Metodológica

Documentación del protocolo técnico (parametrización de software y captura de datos) para asegurar la replicabilidad comunitaria.

Generación de Informes y Escalamiento

Consolidación de instrumentos de incidencia institucional.

Estructuración de Informes

Redacción de documentos técnicos alineados con las Obligaciones de Hacer (ODH) para su presentación ante el MinTIC, la CRC y operadores.

Tabla 1

Resumen Fases Proyecto

Fase	Actividad Principal	Mes
1	Conceptualización y Preparación: Revisión documental, configuración de software (QGIS, Radio Mobile, G-NetTrack) y diseño de rutas.	1
2	Adquisición de Datos Empíricos: Drive Tests, recolección de parámetros RAN (RSRP, SINR) y medición de QoE.	2
3	Análisis Geoespacial y Simulación: Procesamiento en QGIS, simulación de cobertura en 700 MHz e identificación de patrones de falla.	3
4	Diseño de Soluciones y Documentación: Elaboración de propuestas técnicas y redacción de la Guía.	4
5	Informes y Escalamiento: Revisión final de productos, presentación a stakeholders y entrega del informe final.	5

Nota. Descripción de las etapas del proyecto y su implementación. *Fuente.* Autoría propia.

Resultados

Diagnóstico de Cobertura Real y Calidad de Experiencia (QoE)

A continuación, se constituye la fase técnica de cierre de la brecha entre la planificación metodológica y la realidad operativa en territorio. Los resultados consignados son el producto de la ejecución de las fases de Adquisición de Datos Empíricos y Análisis Geoespacial, permitiendo contrastar la cobertura teórica reportada por los operadores con la Calidad de Experiencia (*QoE*) real percibida por los habitantes rurales de Bogotá.

Mediante el uso de herramientas de software libre como *G-NetTrack*, *QGIS* y *Radio Mobile*, se presenta un diagnóstico georreferenciado que identifica con precisión las deficiencias de red y las "zonas de sombra" en las veredas de estudio, proporcionando el sustento empírico necesario para la posterior abogacía digital ante entes reguladores.

Protocolo de Alistamiento y Planificación Técnica

Previo al despliegue en campo, se ejecuta un protocolo de alistamiento técnico que garantiza la validez de las mediciones de radiofrecuencia. Esta permite configurar el ecosistema de herramientas para capturar datos con el rigor requerido.

Parametrización de Herramientas de Medición Se procede a la configuración técnica de la aplicación *G-NetTrack* para asegurar una captura de alta resolución de los parámetros de la Red de Acceso Radio (RAN). Se definieron los siguientes criterios operativos:

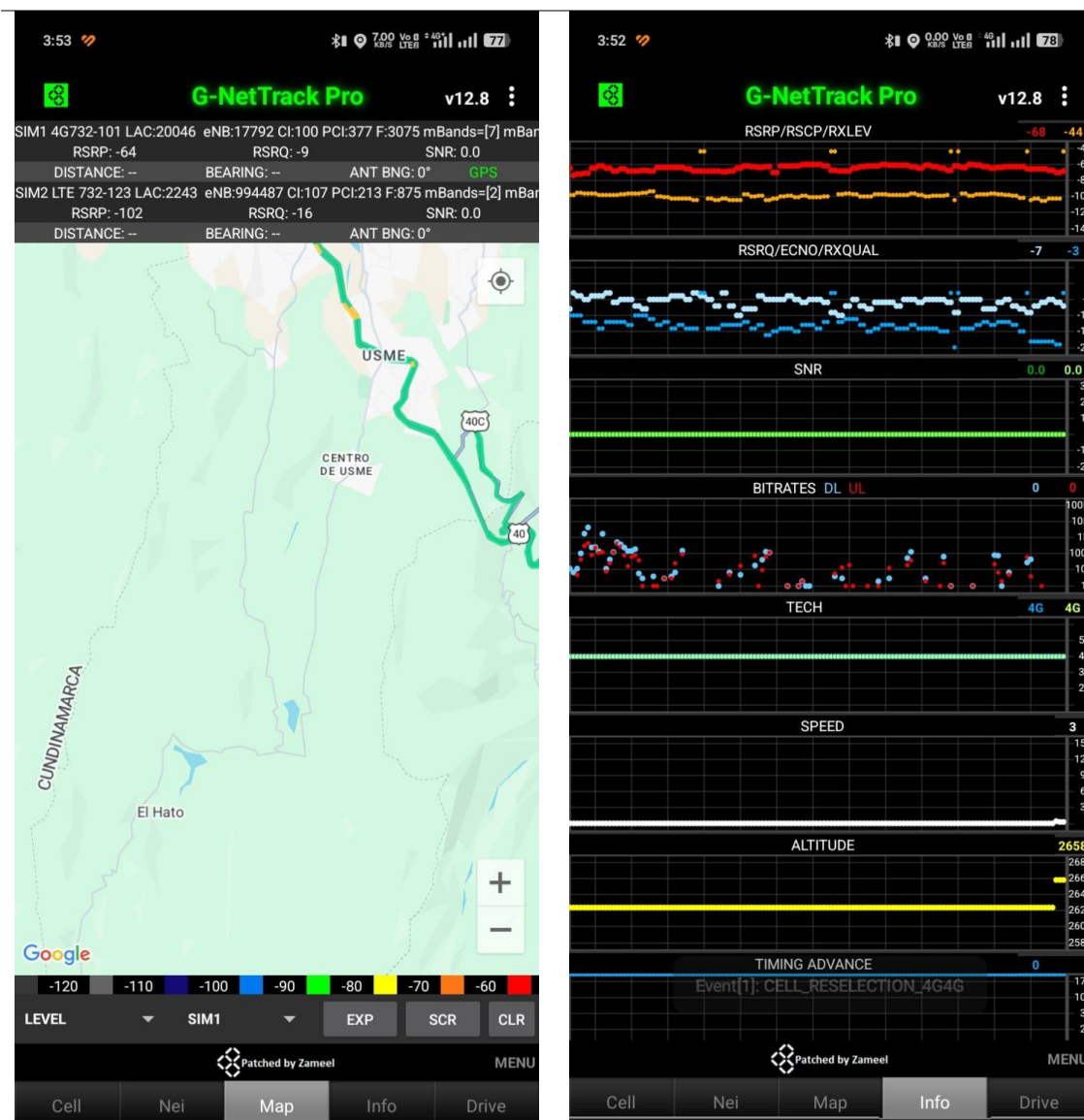
Frecuencia de Muestreo: Configurada para registros cada segundo, permitiendo una densidad de datos óptima para detectar variaciones mínimas de señal.

Formatos de Exportación: Ajuste para la generación de archivos KML y de texto, asegurando la interoperabilidad con los motores de análisis de *QGIS*.

Variables Críticas: Se priorizó el registro de la Intensidad de Señal (*RSRP*) y la Relación Señal/Ruido (*SINR*) para las tecnologías 3G, 4G y 5G presentes.

Figura 1

Configuración y parametrización G-NetTrack



Nota. Configuración y parametrización en aplicación de *Drive Test* método de toma de información de la red de acceso radio en campo. *Fuente.* Autoría propia.

Definición de Puntos de Interés (POI) y Áreas Críticas Se han identificado y se han

categorizado los nodos estratégicos a partir de la revisión de bases de datos de la Secretaría de Educación, el Ministerio de Salud (RUAF/SISPRO) y la cartografía oficial del IGAC. La priorización de estos puntos se ha fundamentado en su importancia para la infraestructura social y estatal, seleccionando:

Nodos de Prestación de Servicios de Salud: Puntos de atención registrados ante la red pública que requieren conectividad para la implementación de servicios de telemedicina.

Planteles Educativos Oficiales: Escuelas rurales categorizadas por el SIMAT donde la brecha digital ha limitado el acceso a recursos pedagógicos en línea.

Sedes de Gestión Gubernamental: Salones comunales y puntos de atención ciudadana registrados en el inventario de bienes públicos municipales.

Centros Poblados y Asentamientos Rurales (Caseríos): Se han delimitado las áreas de mayor densidad habitacional rural, donde la concentración de viviendas demanda una infraestructura de red robusta.

Tabla 2*Puntos de interés identificados en la zona de aplicación*

ID	Nombre de la Ubicación	Tipo de Infraestructura	Vereda / Sector	Relevancia para el Diagnóstico (QoE / Carga Social)
POI-01	CED Rural El Curubital	Educación	Curubital	Nodo crítico para validar el acceso a plataformas educativas; registra voz robotizada y falla en navegación.
POI-02	CED Rural Los Arrayanes	Educación	Los Arrayanes	Punto de referencia para medir la penetración de señal en aulas rurales; presenta velocidades críticas de 14 kbps.
POI-03	CED Rural Las Mercedes	Educación	Las Mercedes	Evaluación de la brecha digital en el borde del polígono; registra potencia de -109 dBm sin navegación.
POI-04	IED El Destino (La Regadera)	Educación / Social	La Regadera	Centro de convergencia comunitaria; punto de control para demostrar la inestabilidad de la red 4G.

POI-05	USS Destino (Subred Sur)	Salud	La Regadera	Punto vital para validar servicios de telemedicina; la latencia actual impide la atención médica remota efectiva.
POI-06	EAAB Las Mercedes Radio Estación	Infraestructura	Las Mercedes	Zona de interés institucional para validar la cobertura en áreas de operación de servicios públicos esenciales.
POI-07	Restaurante Tres Esquinas	Comercio / Social	El Destino	Punto de alta afluencia turística y comercial; ideal para medir la experiencia del usuario final en streaming.
POI-08	CED Rural La Mayoría	Educación	La Mayoría	Validación de obsolescencia tecnológica; se detecta tecnología 2G/3G inoperante para datos.
POI-09	CED Rural El Hato	Educación	El Hato	Evaluación de la calidad de voz y servicios básicos en zonas de baja densidad poblacional.
POI-10	IED Rural Pasquilla	Educación	Pasquilla	Nodo principal de educación rural; registra percepciones de

				servicio deficiente y carga lenta de contenidos.
POI-11	CED Rural Olarte	Educación	Olarte	Punto de monitoreo para validar la fluctuación de servidoras urbanas en el entorno rural.
POI-12	CED Rural La Argentina	Educación	La Argentina	Identificación de vacíos de cobertura para operadores que no sean el dominante.
POI-13	Subred Salud Sur E.S.E.	Salud	Pasquilla / Sur	Punto de control de salud pública; documenta la falta total de cobertura para el operador Tigo.
POI-14	EAAB Hato El	Infraestructura	El Hato	Validación de conectividad para la gestión de recursos hídricos en el territorio.
POI-15	Caserío Min. Agricultura	Social / Vivienda	Curubital	Evaluación del impacto de la brecha digital en proyectos gubernamentales de desarrollo agrario.
POI-16	Sector Rancho Boyacense	Comercio / Turismo	Curubital / Sur	Referencia comercial para medir la degradación del

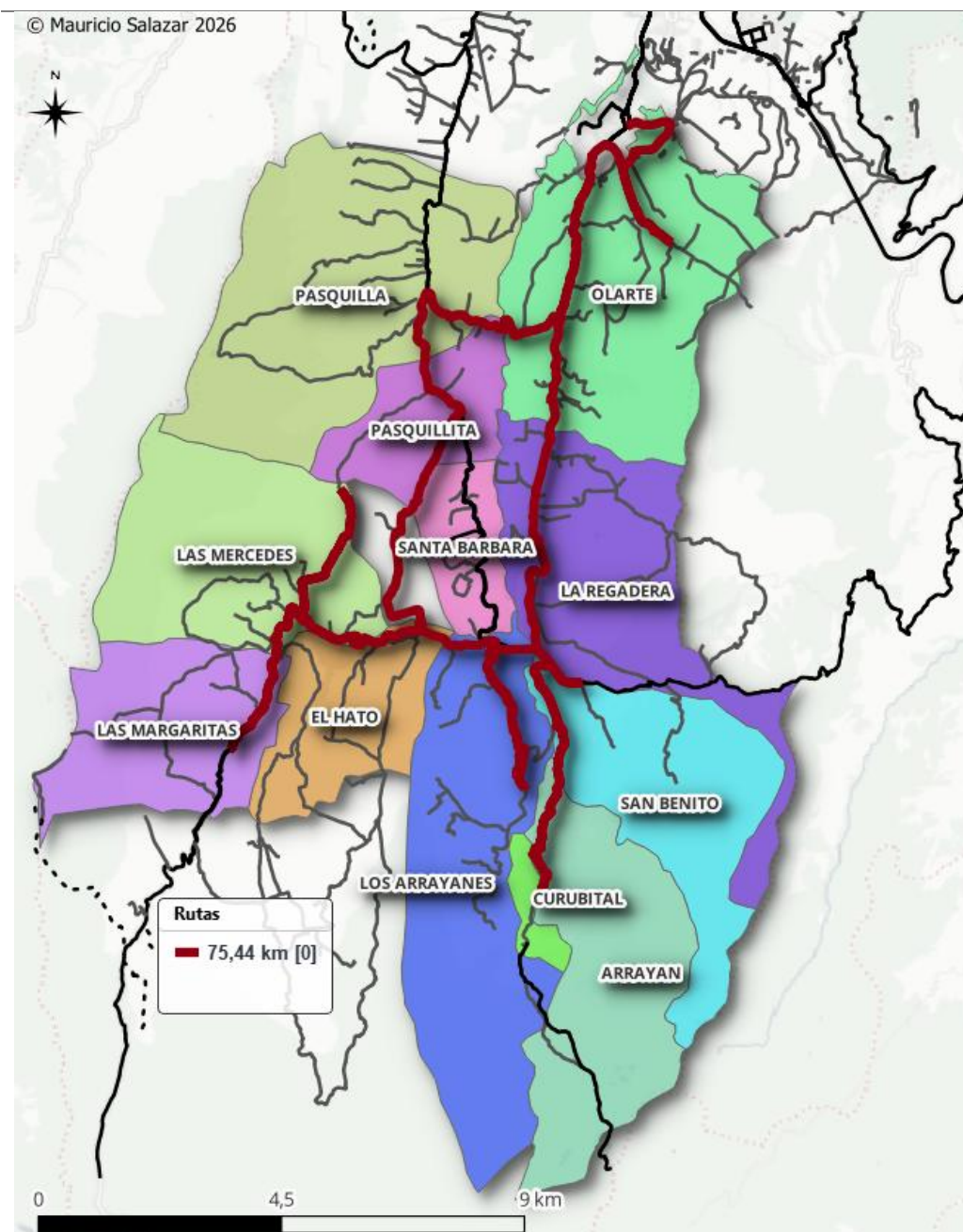
				servicio en nodos de actividad económica local.
POI-17	Batallón de Instrucción 13	Institucional	Sector Rural	Punto de seguridad estratégica; validación de cobertura para comunicaciones de defensa y emergencias.

Nota. Puntos de interés identificados en el polígono de aplicación del proyecto. *Fuente.* Autoria Propia

Diseño de la Ruta de evaluación: Utilizando *QGIS*, se trazó una ruta de navegación estratégica que integró tanto vías principales para *Drive Tests* como senderos de difícil acceso, la ruta se diseñada específicamente para cruzar áreas donde los modelos teóricos indican cobertura, permitiendo validar la existencia de vacíos reales en el servicio. La información que alimenta esta etapa corresponde a bases de datos públicas de georeferenciación como lo son (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, 2025), (Secretaría Distrital de Planeación, 2022)

Figura 2

Veredas de influencia & ruta Usme Rural



Nota. Ruta identificada para aplicación de pruebas en campo y en consecuencia se aterriza el impacto político es decir las veredas impactadas por la ruta. *Fuente.* Autoria propia

Identificación de Infraestructura Existente: Se procede a identificar la infraestructura física (estaciones base y sitios) desplegada en la zona a través del portal de datos abiertos de la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC).

Herramienta Postdata: Mapa de Sitios de Infraestructura Móvil (Comision de Regulacion de Comunicaciones, 2026), se descargó la data geoespacial para validar qué operadores cuentan con torres propias o compartidas en el territorio. Este análisis permitió:

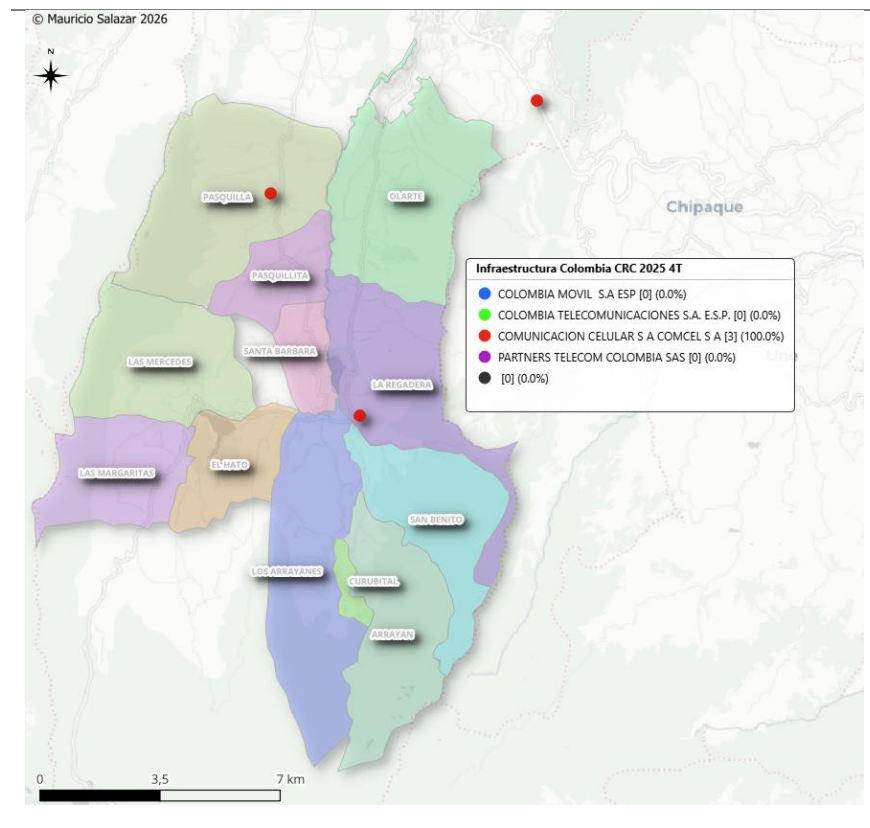
Identificar la densidad de estaciones: Validar si los vacíos de señal detectados coinciden con la ausencia física de infraestructura.

Sustentar la compartición: Identificar estructuras que puedan ser utilizadas para el despliegue de la banda de 700 MHz, optimizando la inversión bajo el modelo de infraestructura pasiva.

Verificar la tecnología: Confirmar si los sitios reportados cuentan con sectores 4G o si presentan obsolescencia técnica (solo 2G/3G).

Figura 3

Infraestructura Identificada de Redes Móviles



Nota. Estacion base de servicio móvil identificadas mediante validación de bases de datos gubernamentales. *Fuente.* Autoría propia

Ejecución de Recolección de Datos y Parámetros RAN

La captura de evidencia técnica en territorio se ejecuta mediante la implementación de la metodología de *Drive Test*, permitiendo la recopilación de datos de la red móvil en movimiento vehicular. Los recorridos abarcaron las veredas en zona rural de Usme, asegurando una cobertura integral del polígono de estudio definido con la ruta.

Captura de Parámetros de la Red de Acceso Radio (RAN): La obtención de datos técnicos georreferenciados se efectuó a través de la aplicación G-NetTrack, la cual permitió el registro automático e ininterrumpido de los parámetros críticos de la red. Durante la ejecución de los recorridos, se documentaron los siguientes indicadores:

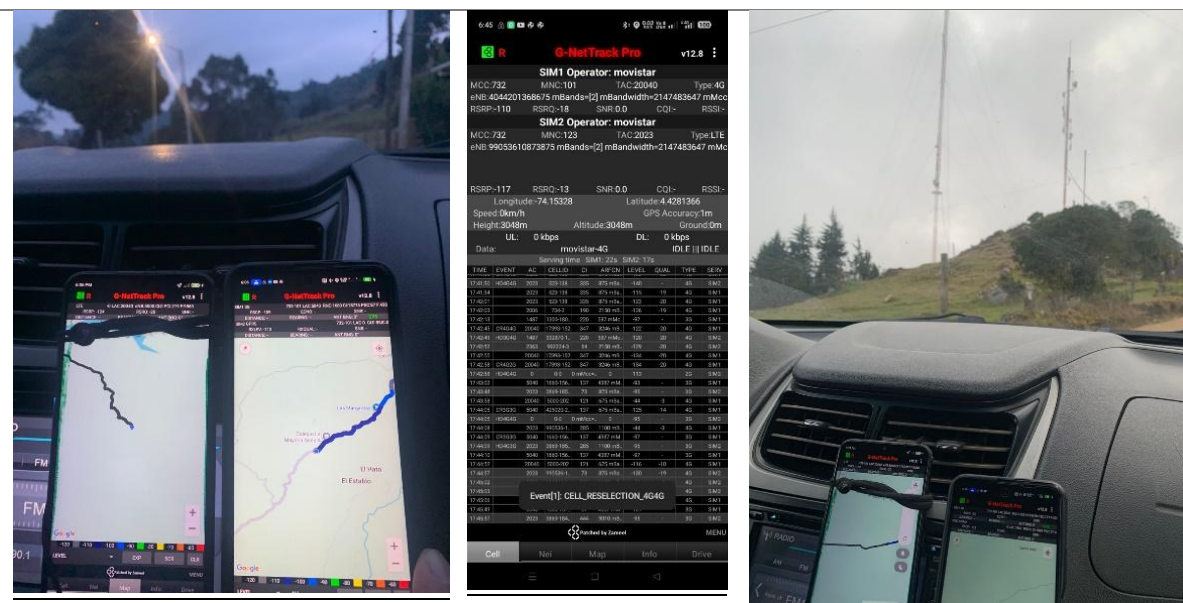
Intensidad y Calidad de Señal: Registro de los niveles de *RSRP* (potencia de señal recibida) y *SINR* (relación señal a ruido) para determinar la estabilidad de la conexión y la presencia de interferencias en las bandas de frecuencia activas.

Disponibilidad Tecnológica: Identificación de la infraestructura de acceso presente, categorizando la disponibilidad de tecnologías *3G*, *4G* y *5G* por cada operador móvil con servicio en la zona.

Detección de Zonas de Sombra: Localización exacta de áreas con inconsistencia o inexistencia de servicio, contrastando la realidad técnica con la cobertura teórica optimista de los mapas oficiales.

Figura 4

Toma de mediciones en cambo (Drive Test)



Nota. Capturas fotográficas del desarrollo de la implementación en campo de el diagnóstico, etapa en la que se tomaron mediciones y se valida infraestructura física no reportado y/o subutilizada. *Fuente.* Autoría propia

Análisis Potencia y tecnología

Para asegurar que el diagnóstico sea comprensible, se implementa una simbología graduada que categoriza la intensidad de la señal en cuatro niveles críticos de conectividad:

Tabla 3

Simbología y clasificación

Rango de Potencia (dBm)	Color	Categoría Técnica	Impacto en la Experiencia (QoE)
-85 a mejor	Verde	Excelente	Navegación fluida y alta calidad de VOZ.

-85 a -100	Azul	Bueno	Servicio estable para aplicaciones institucionales.
-100 a -113	Amarillo	Regular	Intermitencia, carga lenta y degradación de sesión.
Menor a -113	Rojo	Deficiente	Perdida critica de servicios de datos.

Nota. Simbología funcional con la que se identifica umbrales temáticos para la visualización y análisis de la información georreferenciada. *Fuente.* Autoria propia

Resultados de Mediciones por Operador: Se ejecuta el procesamiento de logs para georreferenciar e identificar el estado de la red por operador.

Los datos importados en formato KML desde *G-NetTrack* presentaban los valores de potencia como cadenas de texto (strings), lo cual impedía el procesamiento estadístico y la categorización automática.

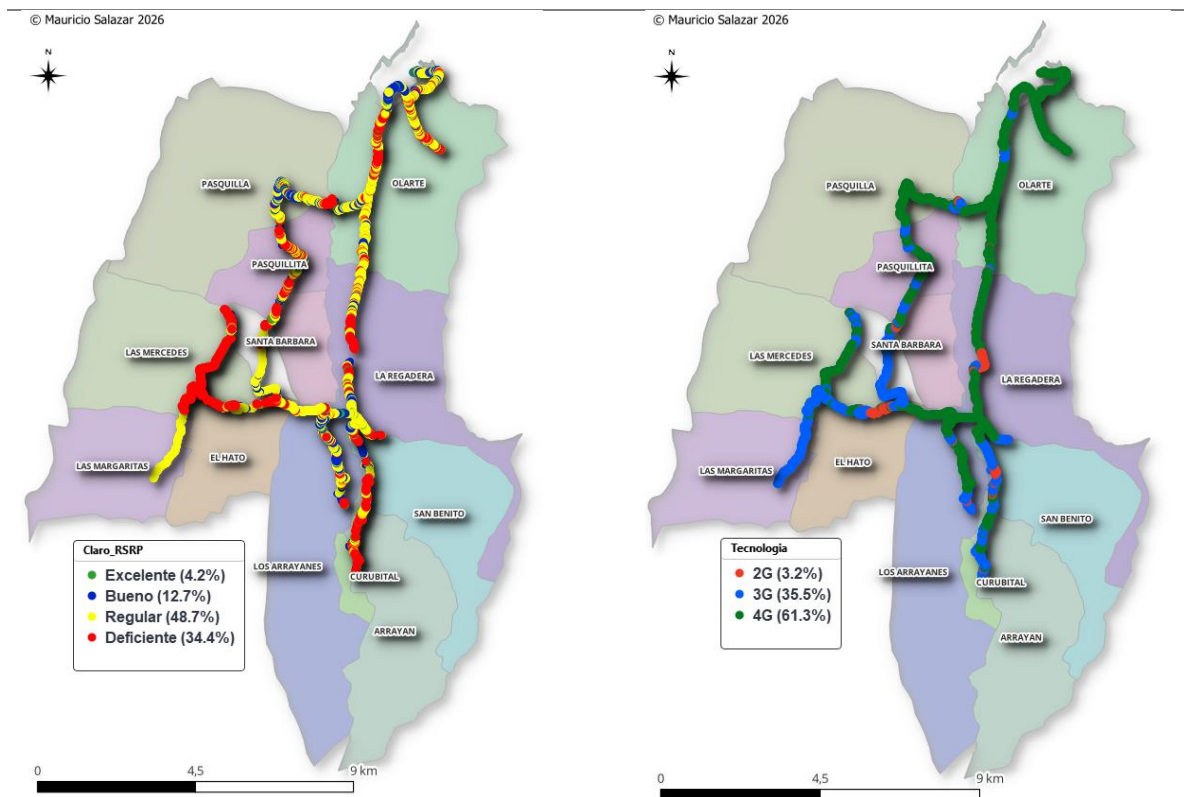
Refactorización: Se utilizó la Calculadora de Campos de *QGIS* para generar nuevas columnas de datos numéricos. Se aplicaron fórmulas de extracción de cadenas, específicamente *left(RSRP, 4)*, para obtener valores en formato decimal real.

Segmentación por tecnología: Este procedimiento se replicó para estandarizar las capas de cada operador (Claro, Movistar, Tigo), discriminando los parámetros de potencia para GSM (RxLevel), 3G (RSCP) y 4G/LTE (RSRP) a lo largo de toda la ruta de medición

Figura 5

Análisis información RAN Operador Claro

Ruta de Cobertura Claro(potencia)	Ruta de Cobertura Claro (Tecnología)
-----------------------------------	--------------------------------------



Nota. Análisis de la información recolectada en campo de potencia y tecnología del operador claro georreferenciada. *Fuente.* Autoría propia

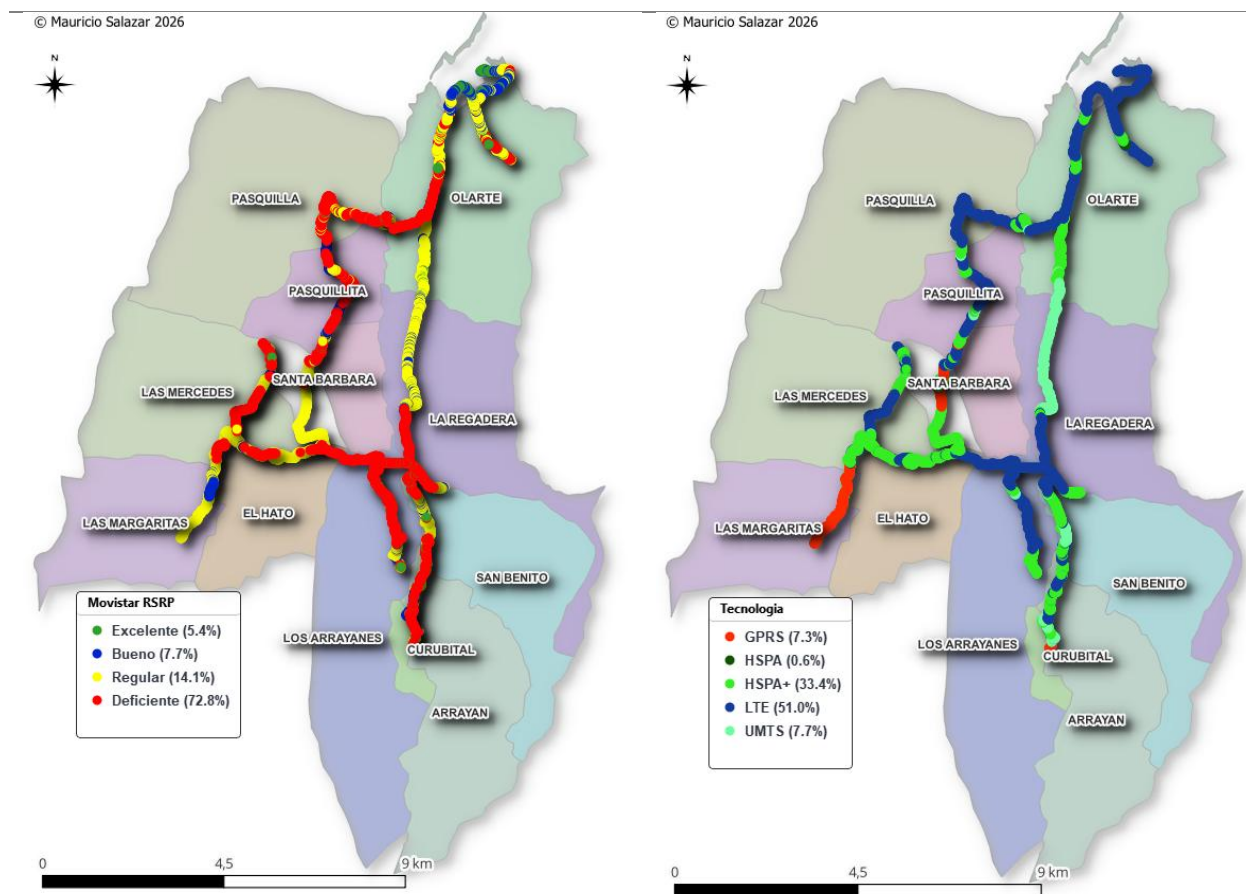
Mediciones CLARO: Los resultados del operador lo poseionan como el operador con más cobertura, el 80% de Muestras se encuentran en niveles que no garantizan un óptimo servicio.

Figura 6

Análisis información RAN Operador Movistar

Ruta de Cobertura Movistar(potencia)

Ruta de Cobertura Movistar (Tecnología)



Nota. Análisis de la información recolectada en campo de potencia y tecnología del operador Movistar georreferenciada. *Fuente.* Autoria propia

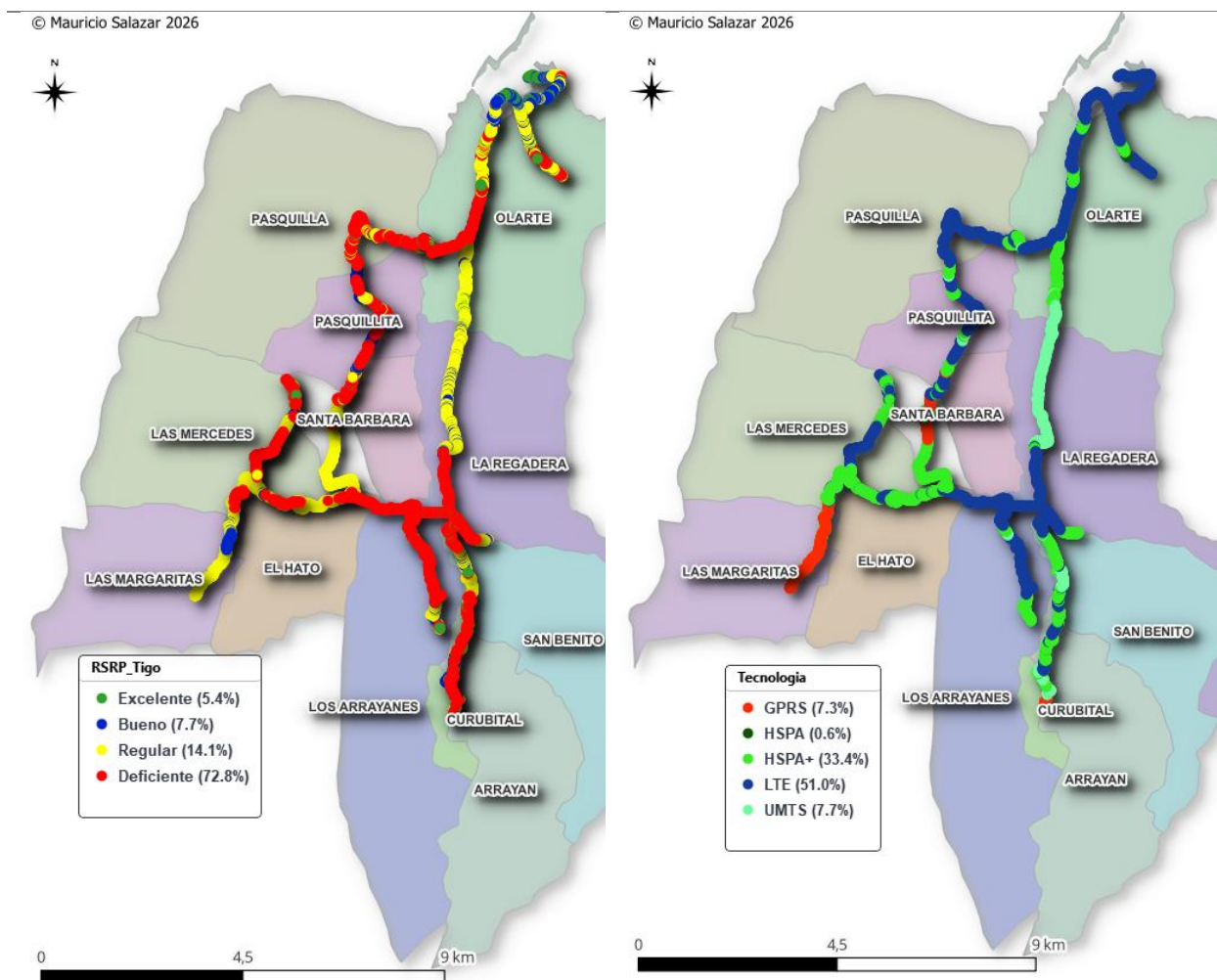
Mediciones MOVISTAR: Los resultados para este operador evidencian un 90% de muestras deficientes, a nivel de tecnología presenta comportamiento que indica no tener una servidora estable por lo que el servicio percibido es resultante de señales residuales del casco urbano.

Figura 7

Análisis información RAN Operador Tigo

Ruta de Cobertura Tigo (Potencia)

Ruta de Cobertura Tigo (Tecnología)



Nota. Análisis de la información recolectada en campo de potencia y tecnología del operador Tigo georreferenciada. *Fuente.* Autoría propia

Mediciones TIGO: Los resultados para este operador evidencian un 90% de muestras deficientes, comparte infraestructura con movistar para el momento de las mediciones.

Métricas de Calidad de Experiencia (QoE)

Se identifica mediante análisis puntuales el estado de la red en puntos específicos de la ruta en los puntos de interés (POI) identificados. Este procedimiento permite evaluar el desempeño del servicio desde la perspectiva del usuario final en ubicaciones estratégicas.

Pruebas de Calidad de Experiencia (QoE) en Nodos Críticos: De forma

complementaria al análisis de radiofrecuencia, se realizaron mediciones estáticas de Calidad de Experiencia (*QoE*) en los Puntos de Interés (POI) previamente identificados por su carga social e institucional.

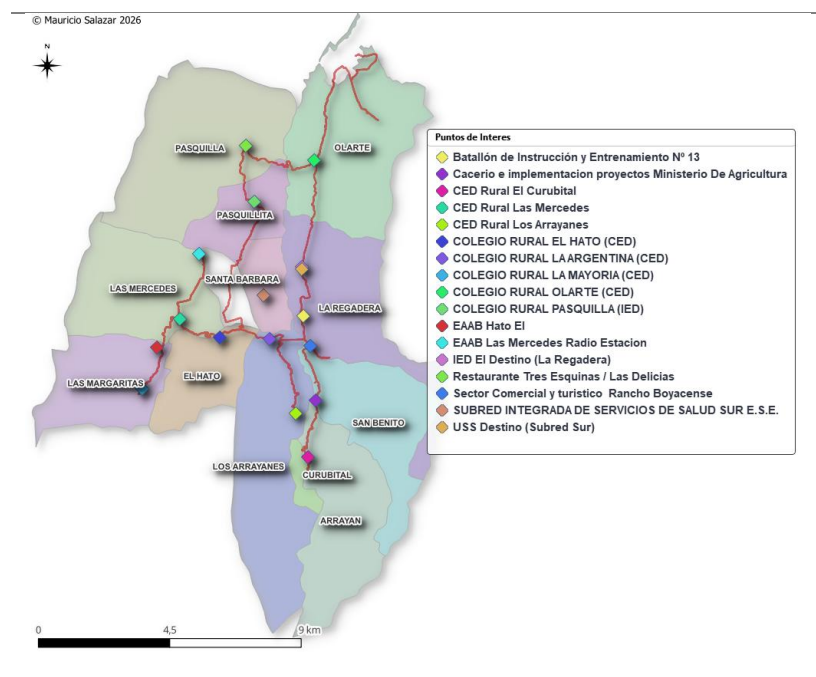
Evaluación en Centros Educativos y de Salud: Realización de pruebas de desempeño en puntos como el CED Rural El Curubital, CED Rural Los Arrayanes y la USS Destino (Subred Sur), orientadas a validar la viabilidad de servicios de educación virtual y telemedicina.

Indicadores de Desempeño: Medición de la velocidad de descarga y carga (*throughput*), latencia (*ping*) y estabilidad de la sesión de datos en cada nodo de control.

Registro de Fallas Críticas: Documentación de deficiencias técnicas en áreas de alta densidad habitacional rural, donde la degradación del servicio limita el acceso a la información y la inclusión económica.

Figura 8

Mapa de puntos de interés



Nota. Puntos de interés georreferenciados dentro del polígono de veredas sujeto a estudio.

Fuente. Autoria propia

Figura 9

Mediciones puntuales y análisis POIs

Fallas	Mediciones	Ubicación POI-01
		

Nota. Validaciones puntuales donde se identifica el estado de la red en los puntos de interés identificados en la fase preliminar. *Fuente.* Autoria propia

Tabla 4*Consolidado de Resultados Técnicos y QoE en Campo*

ID	Ubicación (POI)	Coordenadas	Operador	Tecnología	Potencia (dBm)	Estado QoE (Percepción Real)
POI-01	CED Rural El Curubital	4.3494, - 74.1366	Claro Movistar Tigo	3G 3G 3G	-97 -95 - 95	Crítico: Navegación nula; voz robotizada o fallida.
POI-02	CED Rural Los Arrayanes	4.3630, - 74.1404	Claro Movistar Tigo	3G -- 3G	-95 -93 - 93	Deficiente: Sin navegación; velocidad residual de 14 kbps.
POI-03	CED Rural Las Mercedes	4.3922, - 74.1761	Claro Movistar Tigo	3G 3G 3G	-109 - 113 -113	Zona de Sombra: Sin navegación; deficiencia generalizada.
POI-04	IED El Destino	4.4081, - 74.1384	Claro Movistar Tigo	4G 3G 3G	-120 - 113 -113	Crítico: Velocidad <500kbps; sin servidora estable.

POI-05	USS	4.4075, -	Claro	4G 3G 3G	'-120 -	Crítico: Inviabile
	Destino	74.1384	Movistar		113 -113	para telemedicina;
	(Salud)		Tigo			latencia inestable.
POI-06	EAAB Las	4.4122, -	Claro	-- 4G/3G	'-126 -	Zona de Sombra
	Mercedes	74.1703	Movistar	4G/3G	140 -120	Absoluta:
			Tigo			Incomunicación institucional.
POI-07	Restaurante	4.4456, -	Claro	4G 4G 4G	'-100 -	Regular/Malo:
	Tres	74.1558	Movistar		118 -118	Carga lenta de
	Esquinas		Tigo			páginas; streaming fallido.
POI-08	CED Rural	4.3705, -	Claro	3G 2G 2G	'-109 -	Obsolescencia:
	La Mayoría	74.1878	Movistar		113 -113	Cobertura nula
			Tigo			para servicios de datos.
POI-09	CED Rural	4.3863, -	Claro	2G 3G 3G	'-113 -	Deficiente:
	El Hato	74.1639	Movistar		101 -113	Servicios de voz
			Tigo			irregulares; sin internet.
POI-10	IED Rural	4.4282, -	Claro	4G 4G 4G	'-117 -	Crítico:
	Pasquilla	74.1531	Movistar		116 -122	Navegación fallida
			Tigo			o extremadamente lenta.

POI-11	CED Rural	4.4411, -	Claro	4G 4G 4G	'-111 -	Inestable:
	Olarte	74.1347	Movistar		140 -140	Servidora
			Tigo			fluctuante;
						Movistar/Tigo sin señal.
POI-12	CED Rural	4.3859, -	Claro	4G 4G 4G	'-109 -	Zona de Sombra:
	La	74.1483	Movistar		140 -140	Únicamente Claro
	Argentina		Tigo			con señal mínima.
POI-13	Subred	4.3994, -	Claro	4G 4G --	-119 -	Sin Cobertura:
	Salud Sur	74.1502	Movistar		121 --	Tigo sin servicio;
			Tigo			otros inoperables.
POI-14	EAAB	4.3832, -	Claro	3G 3G 3G	'-109 -	Nulo: Sin
	Hato	74.1833	Movistar		113 -113	capacidad de
			Tigo			navegación de datos.
POI-15	Caserío	4.3669, -	Claro	3G 3G 3G	'-103 -	Malo: Percepción
	Min.	74.1342	Movistar		113 -113	de servicio
	Agricultura		Tigo			deficiente; carga lenta.
POI-16	Sector	4.3838, -	Claro	4G 4G 4G	'-105 -	Crítico: Solo Claro
	Rancho	74.1359	Movistar		140 -140	con señal mínima
	Boyacense		Tigo			degradada.

POI-17	Batallón	4.3931, -	Claro	4G 4G 4G	'-118 -	Deficiente: Sin
	Instrucción	74.1381	Movistar		140 -140	navegación en la
	13		Tigo			mayoría de los operadores.

Nota. Para el análisis de puntos de interés se evidencia fallas a nivel generalizado no se garantiza el servicio en la zona y se hace latente la necesidad de implementar infraestructura y un despliegue para que la zona sea competitiva en términos de conectividad general. *Fuente.*

Autoría propia

El análisis técnico muestra que la totalidad de los 17 puntos de interés (POI) presentan niveles de potencia RSRP críticamente bajos, con registros que oscilan entre los -109 dBm y los -140 dBm, lo que en ingeniería de telecomunicaciones se traduce en una degradación severa de la capa física de acceso para este caso. Esta precariedad técnica impacta directamente en la Calidad de Experiencia (QoE), transformando infraestructuras vitales como la USS Destino (POI-05) y el IED El Destino (POI-04) en entornos digitalmente inoperables para telemedicina y educación virtual, la recurrencia de los vacíos de cobertura y velocidades residuales inferiores a 500 kbps evidencian que la red actual es insuficiente, sustentándose así un despliegue de la banda de 700 MHz para garantizar el derecho a la conectividad y la equidad digital en la región.

Análisis Geoespacial y Contraste de Cobertura

Se realiza un análisis georreferenciado de la zona identificando inicialmente como se encuentra distribuida la cobertura actual en las veredas para validar mediante su cruce y análisis como se ve afectada la zona y puntos con el despliegue actual, y como los perfiles de elevación afectan la cobertura lo que nos servirá como base para el análisis de la propuesta de despliegue.

Cartografía de Cobertura Teórica

Validación de Cobertura Teórica Reportada Previo a la ejecución de las pruebas de campo, se realizó un análisis de la cobertura declarada por los Proveedores de Redes y Servicios de Telecomunicaciones Móviles (PRSTM) en sus mapas oficiales.

Tabla 5

Mapas de cobertura oficiales

Operador	Fuente de Consulta (Mapa de Cobertura)	Estado para el Diagnóstico
WOM	movilpt.co/coberturaycalidad	Excluido: Sin cobertura rural reportada.
CLARO	claro.com.co/cobertura	Incluido: Reporta 3G/4G en la zona.
TIGO	tigo.com.co/mapas-de-cobertura	Incluido: Reporta 3G/4G en la zona.
MOVISTAR	movistar.com.co/mapa-cobertura	Incluido: Reporta 3G/4G en la zona.

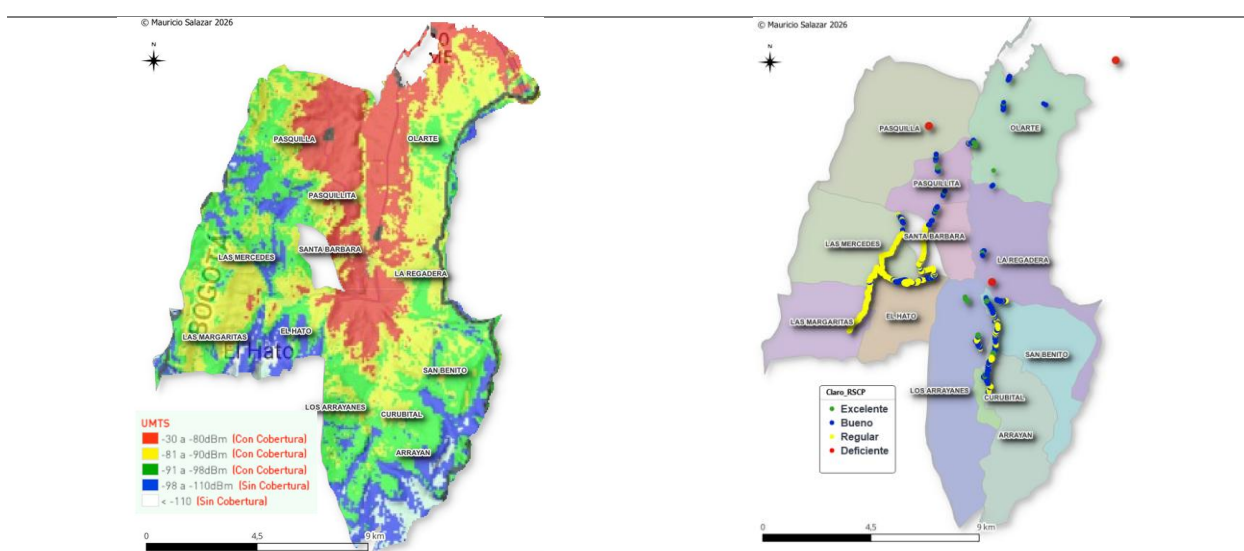
Nota. Para validar la cobertura móvil los operadores disponen de plataformas web donde podemos identificar el alcance de la infraestructura existente y la tecnología. *Fuente.* Autoria propia

Operador Claro: Mediante la validación se identifica cobertura para la zona siendo este el operador que mejor se identificó durante el análisis en campo, con predicciones que son coherentes con la infraestructura reportada a la CRC mas no en coherencia con la percepción a nivel de usuario tanto en calidad como potencia.

A continuación, se valida un cotejo geográfico de los niveles identificados en campo vs la predicción teórica reportada por el operador.

Figura 10

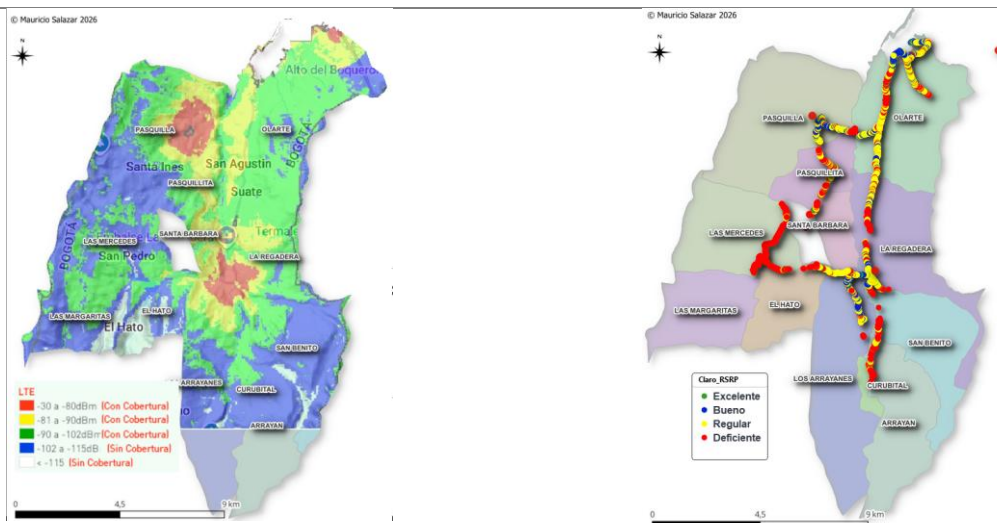
Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo UMTS (Claro)



Nota. El alcance a nivel de RF (Radio Frecuencia) reportado por el operador Claro en UMTS contrastado con los niveles identificados en campo evidencia una notable deficiencia, los niveles superan los -100dBm donde el operador reporta niveles de -90dBm. *Fuente.* Autoria propia.

Figura 11

Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo LTE (Claro)



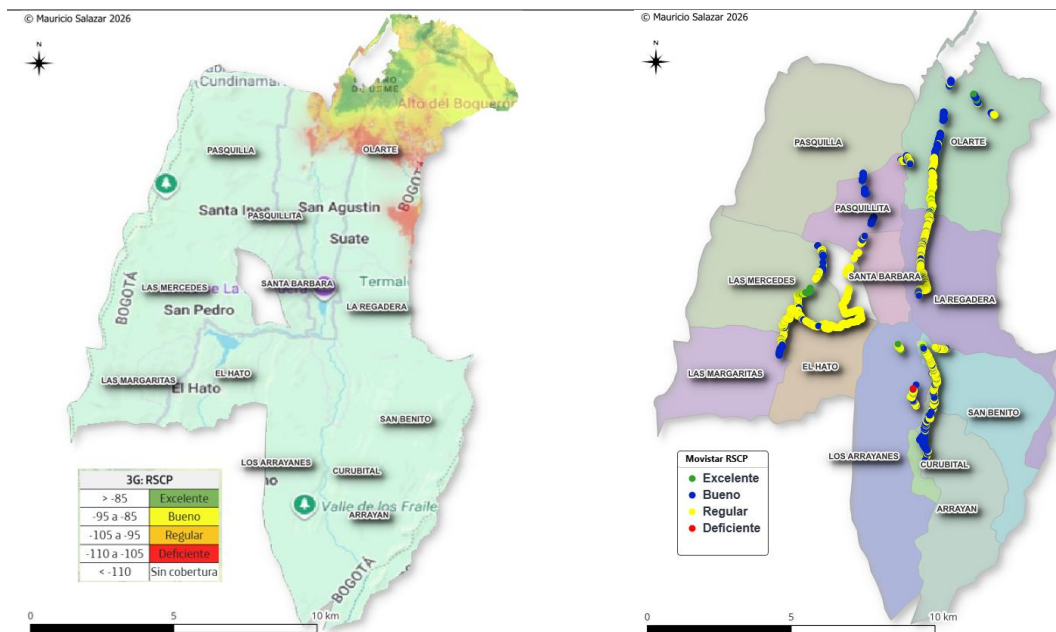
Nota. En LTE se evidencia niveles inferiores a -113dBm en zonas donde se reporta niveles de -90 dBm por el operador evidenciando notorias discrepancias. *Fuente.* Autoria propia

Operador Movistar: Mediante la validación se identifica muy deficiente cobertura del operador la cual resulta coherente con el reporte formal de cobertura, a pesar de no reportar cobertura, señales residuales se identifican en campo, lo que para el usuario final se traduce en una mala percepción afectando tanto la comunidad como la reputación del operador de cara a la experiencia final.

A continuación, al igual que con CLARO, se realiza un cotejo de los niveles de cobertura reportados por el operador MOVISTAR encontrando los siguientes hallazgos:

Figura 12

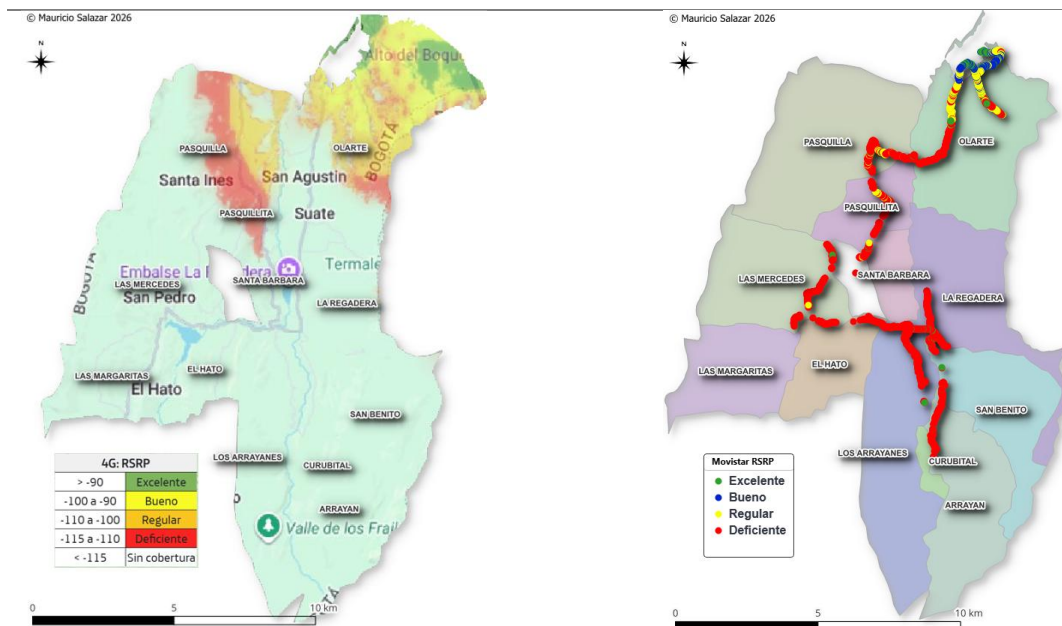
Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo UMTS (Movistar)



Nota. Niveles RF a nivel de UMTS encuentran a pesar de la distancia a servidoras con niveles de potencia buenos lo que de cara al usuario no resulta un beneficio dado que parámetros como la calidad a esa distancia (Mayor a 9km) no están garantizados, se evidencia muestras de hasta -100dBm en zonas sin cobertura reportada. *Fuente.* Autoria propia

Figura 13

Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo LTE (Movistar)

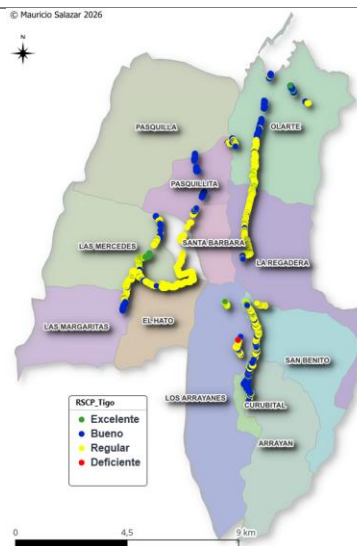
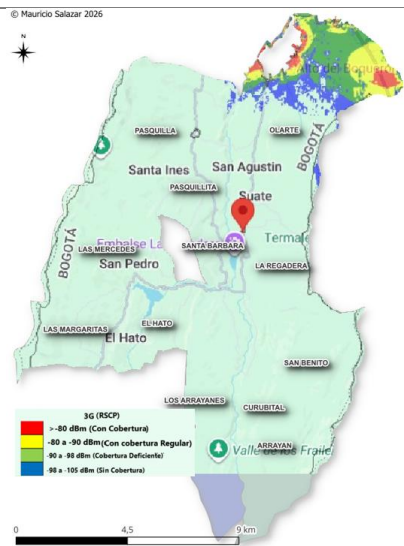


Nota. Niveles RF LTE, a pesar de tener deficiencias los niveles dejan como servidora principal esta tecnología en la zona, por lo que la percepción de usuario se atenúa sumada a las deficiencias de UMTS. *Fuente.* Autoria propia

Operador Tigo: Se identifica mediante el reporte del operador y recorrido en campo el estado del operador con relación a la predicción teórica reportada, el despliegue de infraestructura la zona para el operador TIGO es coherente con sus predicciones teóricas.

Figura 14

Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo UMTS (Tigo)

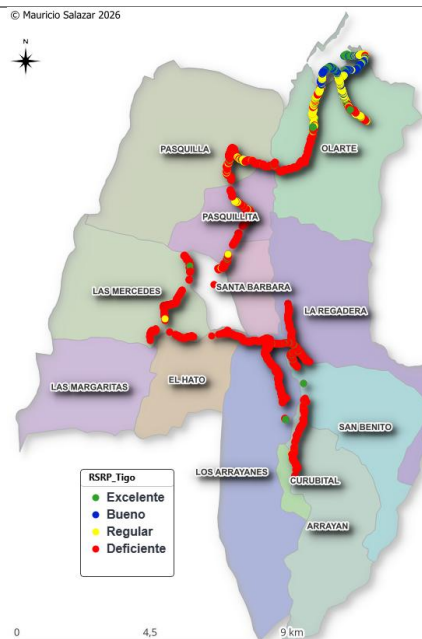
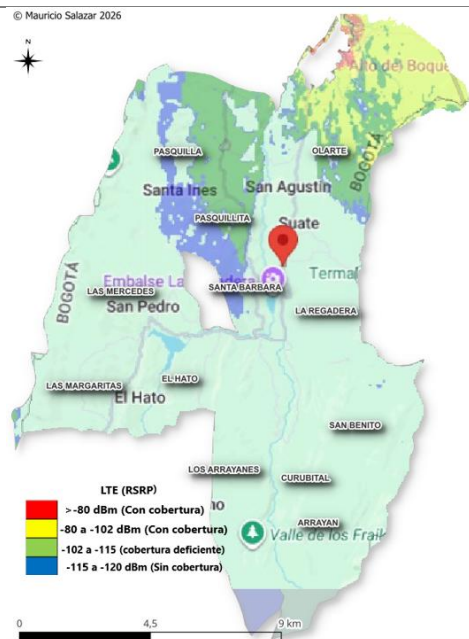


Nota. Niveles UMTS principalmente regulares muestras inferiores a -100dBm, en rangos mayores a 6km de servidora, deficiencias de calidad y deteriora la percepción de servicio.

Fuente. Autoria propia

Figura 15

Comparativa de cobertura teórica por tecnología vs mediciones en campo LTE (Tigo)



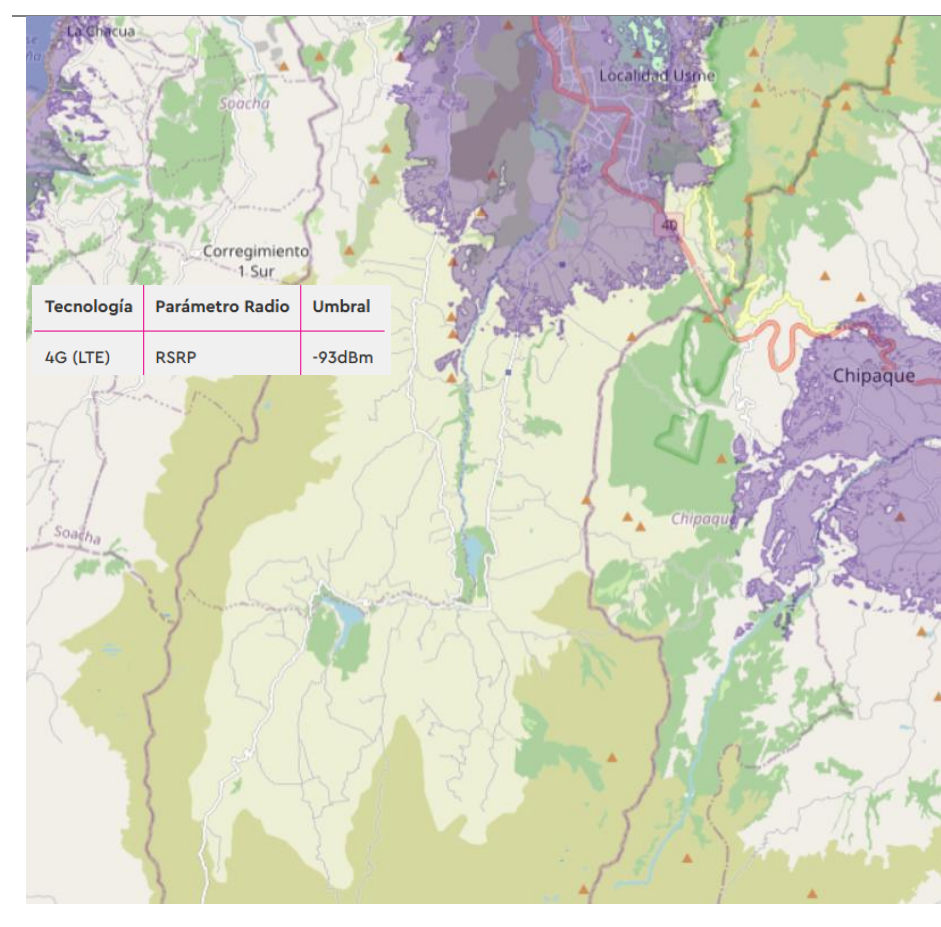
Nota. Niveles de Cobertura LTE deficientes, muestras corresponden a señales residuales. *Fuente.*

Autoria propia

Operador WOM: Para este caso, se identificó que el operador WOM no reporta cobertura rural efectiva en el polígono de interés. Al no contar con despliegue de red declarado en la zona, se determinó no estimar ni ejecutar pruebas para este operador, centrando el diagnóstico en Claro, Movistar y Tigo, quienes sí manifiestan presencia de señal en sus modelos teóricos.

Figura 16

Cobertura reportada WOM



Nota. Cobertura WOM sin temático y deficiente en todas las tecnologías por lo cual el operador es susceptible del mismo análisis de cara a una implementación. *Fuente.* Autoría propia.

Validación de Infraestructura existente y su impacto

Se utiliza *Radio Mobile* para analizar el impacto de la infraestructura existente respecto a puntos de interés y como sustenta los vacíos de cobertura, permitiendo validar técnicamente las causas físicas de las fallas detectadas en los *Drive Test*.

El análisis se centra en contrastar la ubicación de la infraestructura física reportada frente a los nodos de interés para determinar un diagnóstico sustentado de la señal en el territorio.

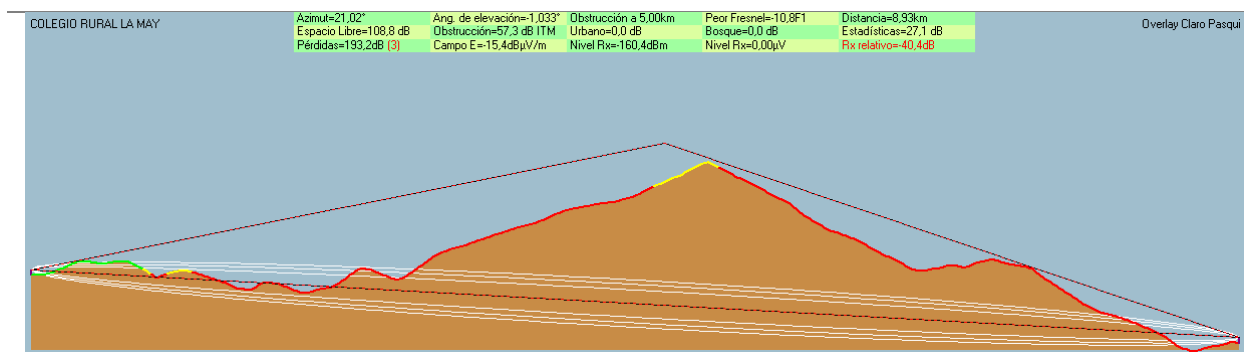
Infraestructura Existente vs. POI: Utilizando las coordenadas de la infraestructura móvil obtenidas, se procede a validar la Línea de Vista (LOS) hacia los puntos de interés (POI) estratégicos.

Resultados del Contraste: El análisis de visibilidad revela que, aunque existen estaciones base en áreas relativamente cercanas, nodos críticos como el CED Rural El Curubital (POI-01) y el CED Rural La Mayoría (POI-08) carecen de una línea de vista hacia la infraestructura actual, debido a la compleja orografía de la zona rural de Usme, pero contrastado las mediciones evidencia necesidad de optimización.

Figura 17

Análisis línea de vista CED Rural La Mayoría vs Infraestructura Claro

Análisis LOS Sitio Claro vs POI-08

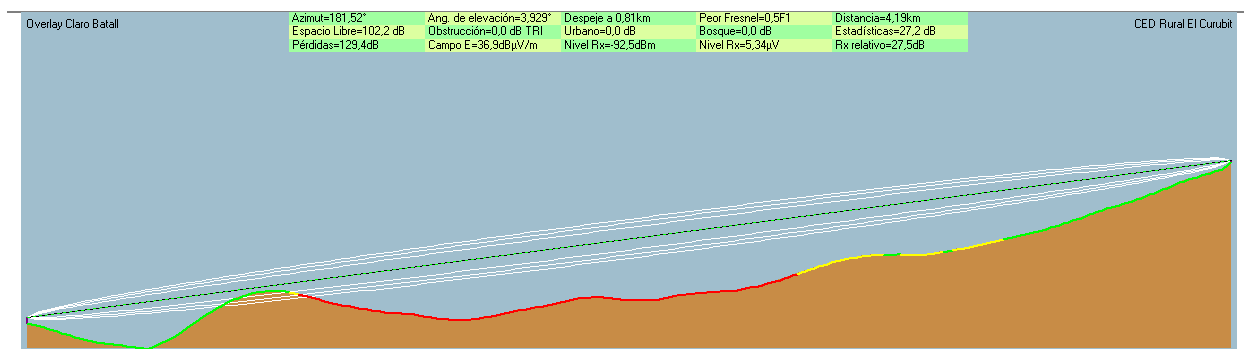


Nota. Obstrucción topográfica total que genera pérdidas por difracción de 57.3 dB. Con un nivel de recepción de -160.4 dBm, la señal se sitúa muy por debajo del umbral de servicio, lo que no garantiza conectividad. Requiere evaluar nueva infraestructura. *Fuente.* Autoría propia.

Figura 18

Análisis línea de vista CED Rural El Curubital vs Infraestructura Claro

Análisis LOS Sitio Claro vs POI-01



Nota. Se justifica la optimización mediante el despliegue de la banda de 700 MHz, la cual, según el análisis de propagación, ofrece la viabilidad técnica necesaria para estabilizar la conexión y elevar la calidad de servicio. *Fuente.* Autoría propia.

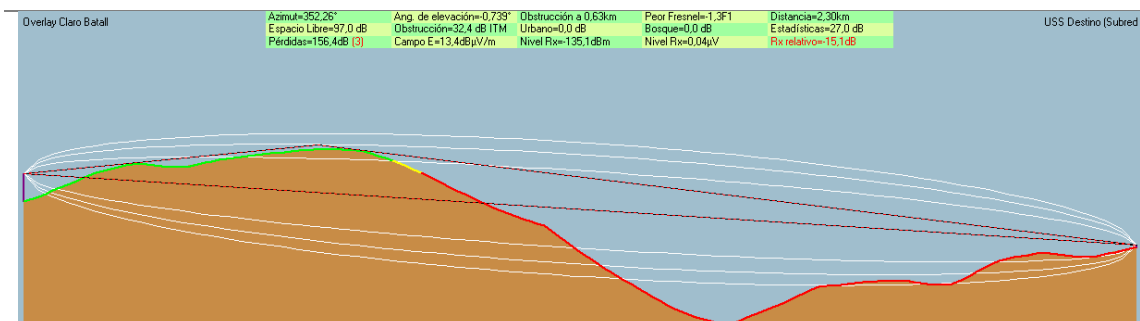
Impacto en POIs de Salud: Para el caso de la USS Destino (POI-05), la simulación de perfiles de elevación confirma que las obstrucciones topográficas impiden una conexión estable,

lo que correlaciona con los hallazgos de latencia inestable y navegación crítica detectados en campo.

Figura 19

Análisis línea de vista USS Destino (Salud) vs Infraestructura Claro

Análisis LOS Sitio Claro vs POI-05



Nota. Hacia el centro de salud evidencia una obstrucción parcial en la zona de Fresnel (-1.3F1), lo que sumado a una configuración de antena subóptima genera un nivel de recepción crítico de -135.1 dBm. El despliegue en la banda de 700 MHz sirve para superar pérdidas por difracción de 32.4 dB, estabilizar la latencia y garantizar la viabilidad técnica requerida para servicios como telemedicina. *Fuente.* Autoría propia.

Falla de Penetración: Los perfiles de radiofrecuencia demuestran que las tecnologías actuales (principalmente 3G y 2G en nodos como POI-08 y POI-09) no poseen la capacidad de difracción necesaria para superar los obstáculos naturales, resultando en una navegación nula o voz robotizada.

Propuesta de Solución Técnica Aplicada

En concordancia al análisis preliminar y como insumo, a continuación, se identifica potenciales ubicaciones basados en la infraestructura existente tanto activa de los operadores móviles como infraestructura identificada de enlaces existentes y comunicaciones independientes o públicas.

Las principales variables consideradas para el diseño propuesto para el despliegue obedecen a facilidades a nivel de Capex, usando infraestructura existente, capacidad física de las bandas de frecuencias que cuentan con asignación bajo la regulación colombiana como lo es 700MHz, y perfil de elevación.

Fundamentación técnica banda 700MHz

La banda de 700MHz por su capacidad de propagación y asignación normativa resulta en un parámetro para potenciales implementaciones suficientemente sustentado, dentro de sus características encontramos:

Baja pérdida de propagación, en comparación con bandas altas las ondas electromagnéticas a 700MHz pueden penetrar con menos pérdidas estructuras, vegetación y mejorar la distancia de propagación.

Alta eficiencia de transmisión, la estabilidad y confiabilidad lo que es especialmente funcional para escenarios de servicio móvil y necesidades de alta velocidad.

Menor costo de implementación, al requerirse menos emplazamientos por su capacidad y alcance la inversión en infraestructura es menor respecto a soluciones con bandas de alta frecuencia. (ebyte, 2024)

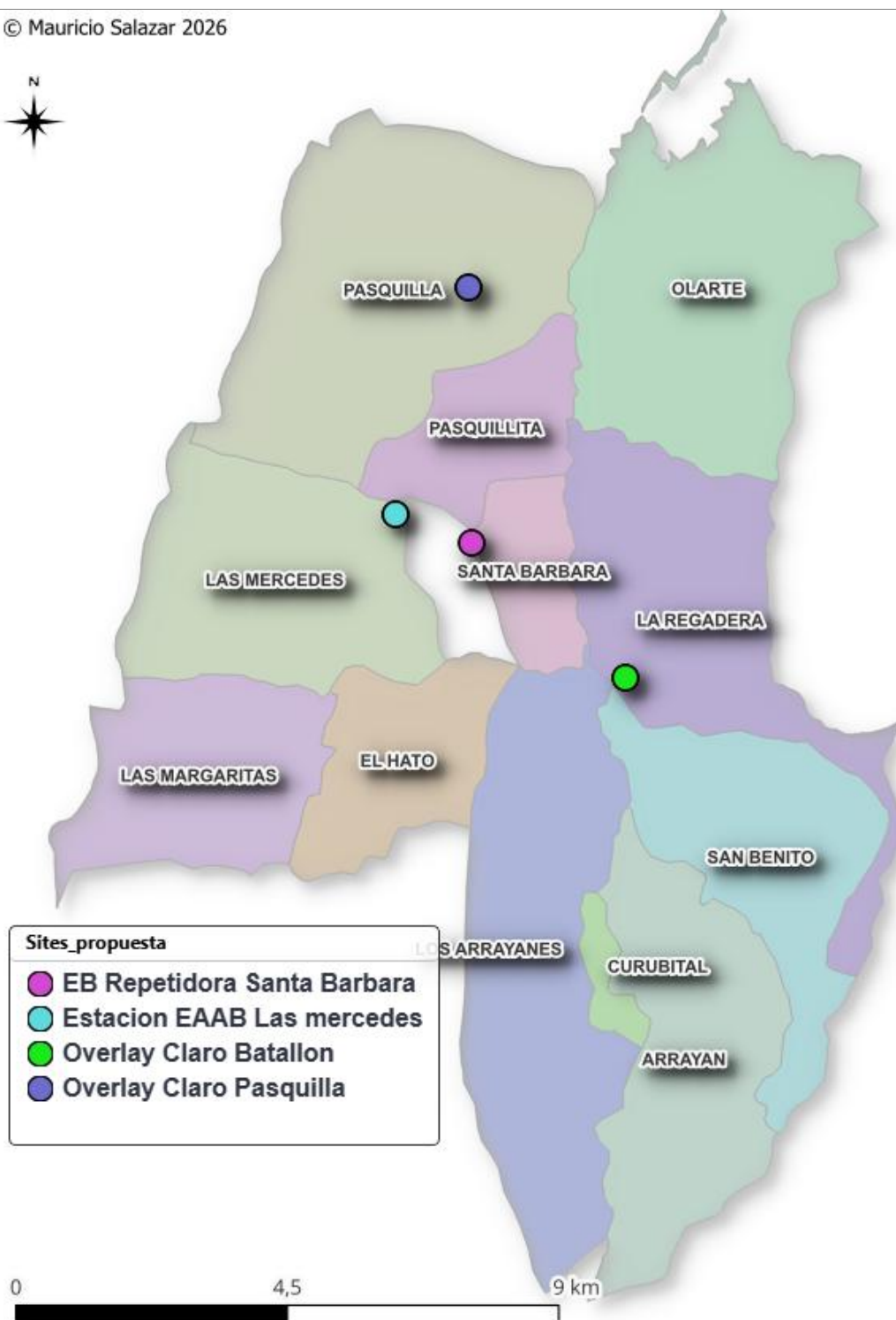
Infraestructura existente y perfil de elevación

Durante el recorrido (*Drive Test*) se identificaron estructuras que potencialmente funcionarían para un despliegue de la red móvil, tomando esta información y en adición con lo reportado por los operadores para este caso Claro se cuenta con 4 ubicaciones de despliegue que no requieren una implementación nueva agresiva, a continuación, su identificación georreferenciada:

Figura 20

Estructuras Tipo Torre Identificadas

© Mauricio Salazar 2026

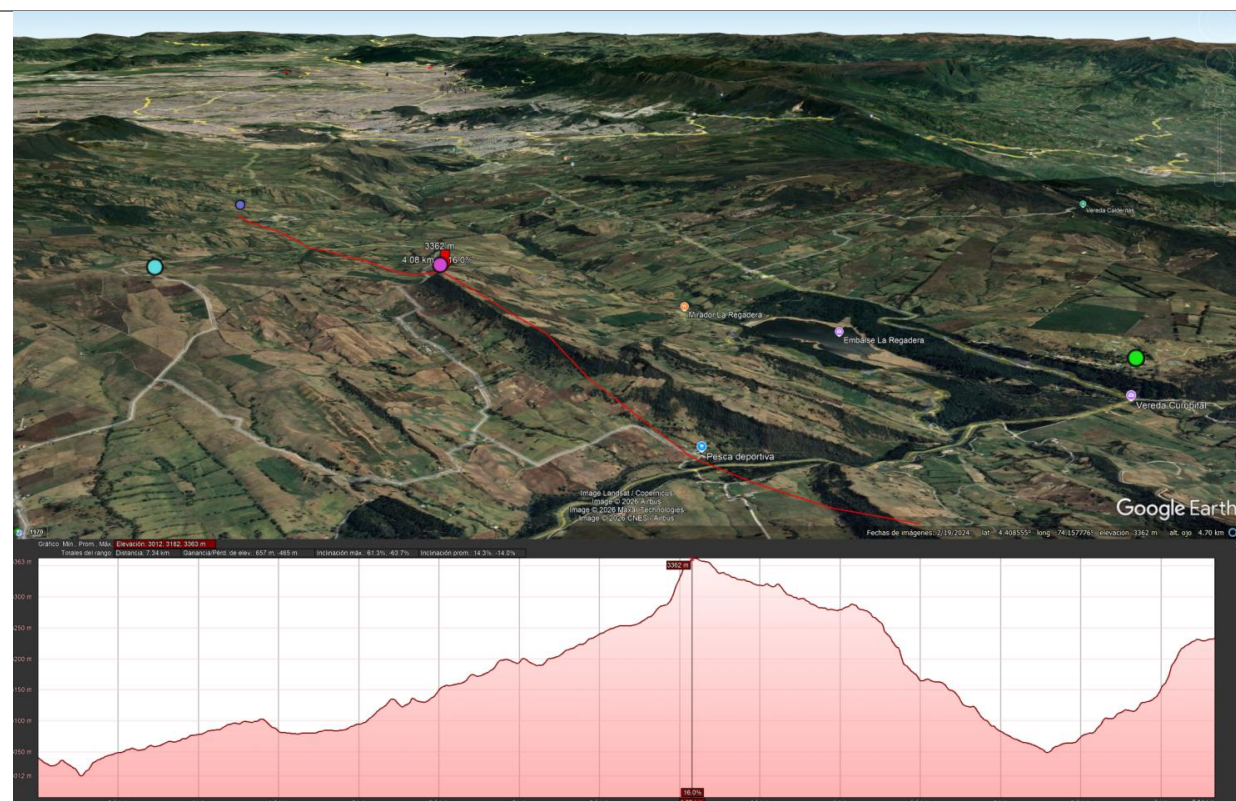


Nota. Estructuras Identificadas durante la fase de recolección de datos de acceso, las mediciones se usan como *survey* a nivel de validación preliminar. *Fuente.* Autoria propia.

Como análisis subsecuente de la infraestructura identificada se procede a validar el perfil de elevación y línea de vista, se identifica mediante *Radio Mobile* y Google Earth, se identifica que el despliegue actual de infraestructura se encuentra en puntos estratégicos y viables, y los emplazamientos repetidora y estación del acueducto cuentan con una altura sobre el nivel del mar y relativa de la zona que garantizarían cobertura amplia a los puntos de interés y de manera generalizada de la zona a continuación un ejemplo de cómo esta validación permite identificar su impacto en la zona:

Figura 21

Validación perfil de elevación para despliegue e implementación



Nota. El punto repetidor identificado se encuentra a 3362 msnm lo que supera a vacío de cobertura con desniveles de hasta 300 metros que obstruyen el despliegue actual, pero funcionan como puntos óptimos de despliegue. *Fuente.* Autoria propia.

Con lo anterior nuestra propuesta puede incluir la infraestructura identificada de manera viable, este insumo da valor a las fases de recolección de datos y fases posteriores de propuesta final.

Identificación de Vacíos Potenciales y Emplazamientos Nuevos Requeridos

Con la evaluación anterior tenemos un despliegue potencial preliminar el cual aún no garantiza una óptima cobertura para la zona por lo cual la siguiente iteración tiene como objetivo definir la necesidad o no de un nuevo emplazamiento (Radio Base) y su potencial ubicación que optimice el diseño en la red propuesta.

Tenemos los siguientes emplazamientos:

Tabla 6 *Emplazamientos de infraestructura existente como propuesta*

SITIO	LATITUD	LONGITUD	HBA (m)	ESTADO / TIPO
Estacion EAAB	4,411421	-74,170090	30	Infraestructura
Las mercedes				Subutilizada
EB Repetidora	4,407249	-74,158554	45	Estación Base Existente
Santa Barbara				
Estación Pasquilla	4,445417	-74,158996	40	Estación Base Existente
Claro				
Estación Batallón	4,387095	-74,135653	25	Estación Base Existente
Claro				

Nota. Listado de estructuras identificadas de uso potencial. *Fuente.* Autoria propia.

Figura 22

Estacion EAAB Las mercedes Estructura



Nota. Emplazamiento identificado durante las actividades de Drive Test. *Fuente.* Autoría propia.

Simulación Inicial de Diagnóstico Teniendo georreferenciados los emplazamientos y evaluados los parámetros preliminares debemos identificar que tan viables resultan mediante un análisis en el cual validemos el alcance y su propagación, de este el resultado es encontrar polígonos para nueva infraestructura, optimización de la configuración y/o ajustes físicos generales

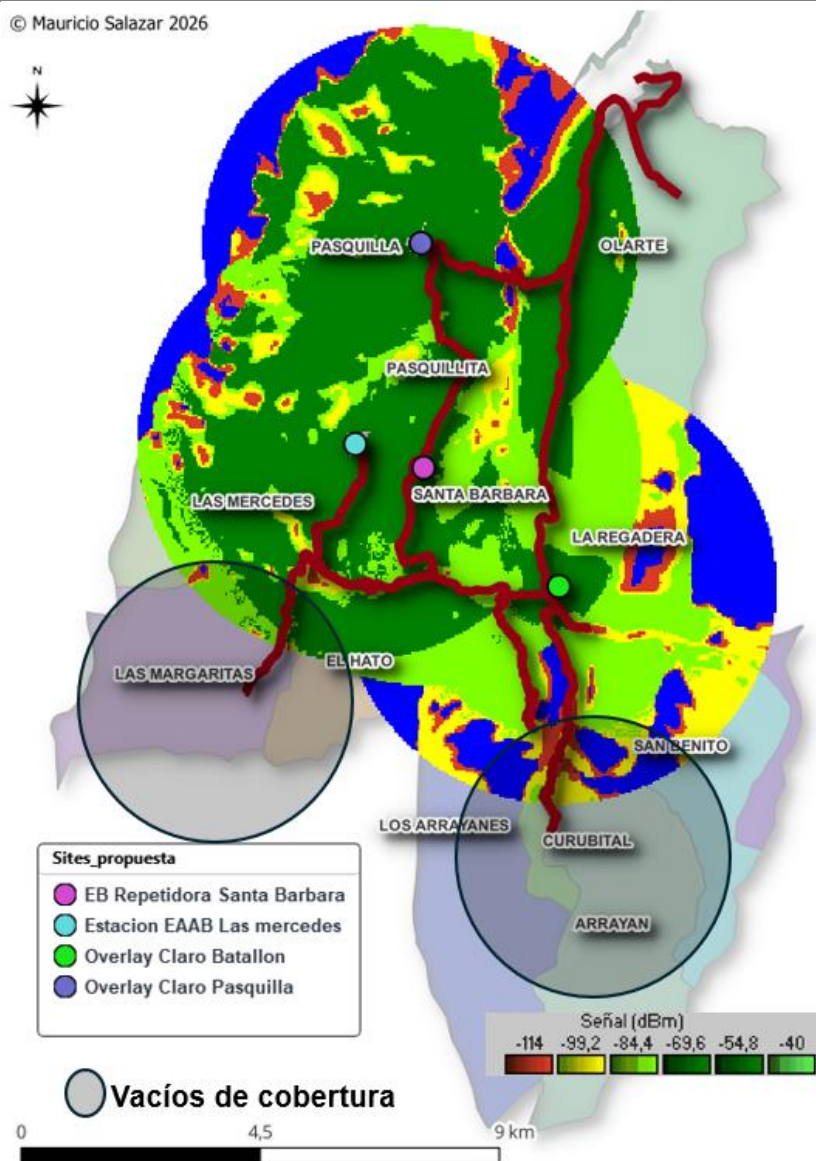
Para este paso se requiere de varias iteraciones en *Radio Mobile*, para identificar alturas, potencia y parámetros RF que sean coherentes y comunes en un despliegue potencial aterrizado a la realidad de hardware.

En la iteración preliminar utilizamos una antena omnidireccional dado que busca con una identificación de ubicaciones con vacíos de cobertura a continuación el resultado y análisis de la primera iteración:

Figura 23

Simulación Inicial | Uso de infraestructura existente

© Mauricio Salazar 2026

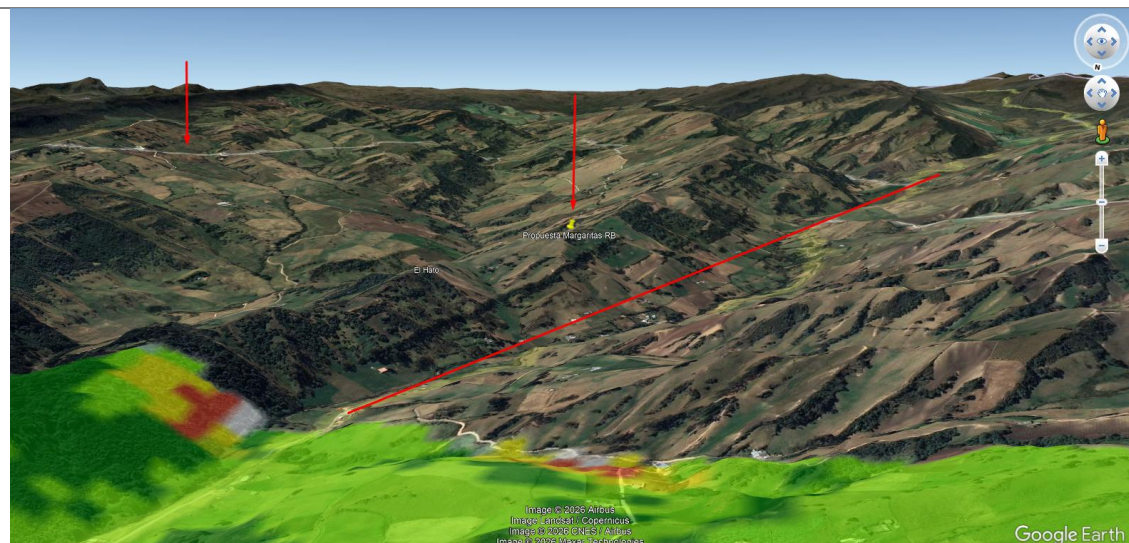


Nota. Con este análisis se identificaron 2 zonas que requieren de un nuevo emplazamiento, en coherencia con lo identificado en campo, el impacto potencial y POIs, se prioriza el sitio nuevo hacia la zona de la vereda Las Margaritas en donde se valida perfil de elevación y se propone el nuevo sitio. *Fuente.* Autoria propia.

Selección Estratégica de Nuevos Sitios Con el insumo anterior se procede a evaluar perfil de elevación de la zona e identificar la ubicación que mejor desempeño pueda brindar y optimizar tanto en costos como en esfuerzo el despliegue potencial.

Figura 24

Sitio Nuevo Propuesto análisis.



Nota. Mediante un análisis topográfico se valida la potencial colocación y se perfila la ubicación mas precisa en el contexto geográfico. *Fuente.* Autoria propia.

Con el análisis de la ubicación y en búsqueda de optimizar el despliegue se opta por una ubicación con línea de vista tanto para la vereda las Margaritas como Curubital con potencial de optimización por medio de orientación y ganancia de antenas en aras de que con 1 solo sitio nuevo y usando la infraestructura existente se pueda dar solución a la problemática de conectividad de la zona por lo que el resultado de la evaluación y con el emplazamiento nuevo seria la siguiente:

Tabla 7

Emplazamientos de infraestructura definitivos como propuesta de despliegue

Sitio	Latitud	Longitud	Hba (m)	Estado / tipo
Estacion EAAB Las mercedes	4,411421	-74,170090	30	Infraestructura Subutilizada
EB Repetidora Santa Barbara	4,407249	-74,158554	45	Estación Base Existente
Estación Pasquilla Claro	4,445417	-74,158996	40	Estación Base Existente
Estación Batallón Claro	4,387095	-74,135653	25	Estación Base Existente
Propuesta EB Las Margaritas	4,367179	-74,184880	25	Estación Base Nueva

Nota. Nueva tabla con todos los emplazamientos resultado del análisis de radio frecuencia.

Fuente. Autoria propia.

Implementación de Diseño Final (simulación)

Teniendo completa la infraestructura necesaria se procede a plasmar una configuración aterrizada a la necesidad, se analiza igualmente mediante iteraciones las configuraciones y parametrización necesaria para una cobertura optima en la zona.

Parametrización de Radio Mobile A continuación, se presenta la tabla detallada con los parámetros inherentes a la simulación para el despliegue propuesto en la banda de 700 MHz.

Tabla 8*Parametrización de Radio Mobile*

Categoría	Parámetro	Valor Configurado	Descripción Técnica	
Red (Network)	Tecnología	LTE (FDD)	Estándar Long Term Evolution para banda ancha rural.	
	Banda de Operación	700 MHz (Banda 28)	Porción del espectro óptima por su alta penetración.	
	Frecuencia Mínima	728 MHz	Límite inferior del segmento Downlink configurado.	
	Frecuencia Máxima	748 MHz	Límite superior para el análisis de propagación.	
	Polarización	Vertical	Configuración estándar para maximizar el alcance superficial.	
	Entorno y Clima	Modelo de Propagación	Longley-Rice (ITM)	Algoritmo para terreno irregular y condiciones atmosféricas.
		Clima	Ecuatorial	Ajuste para alta humedad y variaciones de páramo en Usme.
Refractividad Superficial		312 N-unidades	Factor de influencia troposférica en zonas de montaña.	

	Conductividad del Suelo	0.005 S/m	Característica para suelos rocosos/arcillosos de la zona.
	Permitividad Relativa	15	Constante dieléctrica del terreno para reflexión de ondas.
	Modo Estadístico	Difusión (Broadcast)	Cálculo de cobertura para áreas de servicio móvil.
Confiabilidad	% de Tiempo	95%	Garantiza estabilidad de la señal casi permanentemente.
	% de Ubicaciones	95%	Asegura cobertura en la gran mayoría del polígono.
	% de Situaciones	90%	Nivel de confianza estadística para el diseño de red.
Sistema Radio	Potencia de Transmisión	46 dBm (40W)	Potencia nominal referencial para la unidad de radio (RRU).
	Ganancia de Antena	17 dBi	Ganancia típica de paneles sectoriales para 700 MHz.
	Pérdidas de Línea	5 dB	Estimación de atenuación por cables, puentes y conectores.
	Sensibilidad RX	-120 dBm	Umbral mínimo de recepción para terminales de usuario.

Nota. Estos parámetros actúan como constantes técnicas a partir de estos, se procederá a iterar las alturas, azimuts y potencias efectivas (EIRP) de cada sitio propuesto para eliminar los vacíos de cobertura detectados en el diagnóstico previo. *Fuente.* Autoria propia.

Optimización y Configuración Final de Sectores Mediante la iteración de las simulaciones, ajustando diagramas de radiación para superar obstrucciones teniendo en cuenta el análisis orográfico realizado, se obtiene la configuración física optimizada, esto permite asegurar que los puntos de interés regional queden dentro de umbrales de servicio que garanticen conectividad para aplicaciones robustas y se cierre la brecha digital encontrada en la fase de diagnóstico.

Matriz de Configuración Física Final. A continuación ilustramos la matriz mediante la cual se determina la configuración final de los emplazamientos, teniendo en cuenta parámetros físicos, los cuales en el escenario de la propuesta viabilizan de manera inicial un despliegue sujeto a optimización lógica según se evidencie posteriormente en una etapa de operación.

Tabla 9

Matriz de configuración física final

Sitio	Sector	Azimuth opt. (°)	HBA (m)	EIRP (dbm)	Tipo de estructura
Estación EAAB Las Mercedes	1, 2, 3	20 / 144 / 202	30	58	Torre Rendada
EB Repetidora Santa Barbara	1, 2	26 / 170	45	58	Torre Auto soportada
Overlay Claro Pasquilla	1, 2, 3	11 / 120 / 220	40	58	Torre Auto soportada
Propuesta Margaritas RB	1, 2, 3	60 / 214 / 330	36	58	Sitio Nuevo
Overlay Claro Batallón	1, 2, 3	0 / 180 / 270	25	58	Torre Rendada

Nota. Mediante esta tabla se consolida la ingeniería de detalle para los sitios estratégicos propuestos. El EIRP de 58 dBm por sector se calcula considerando una potencia de transmisión de 46 dBm (40W), una ganancia de antena de 17 dBi y pérdidas de línea estimadas en 5 dB.

Fuente. Autoría propia.

Justificación del Diseño por Emplazamiento

Estación EAAB Las Mercedes (20°/144°/202°): La orientación del sector 1 a 20° permite penetrar en la cuenca de sombra de la vereda Las Mercedes, asegurando señal estable en el CED Rural Las Mercedes (POI-03) y la estación institucional (POI-06).

Propuesta Margaritas RB (60°/214°/330°): Al ser un Sitio Nuevo, su configuración a 60° busca iluminar el área crítica de El Curubital (POI-01), mientras que el sector a 214° cubre los huecos de cobertura en el sector sur, eliminando las zonas de sombra absoluta detectadas inicialmente.

*Overlay** Claro Pasquilla (11°/120°/220°): Estos ajustes permiten que el nodo principal de la zona rural cubra el casco poblado de Pasquilla (POI-10).

*Overlay** Claro Batallón (0°/180°/270°): Orientación optimizada para cubrir el corredor de seguridad estratégica del Batallón (POI-17) y brindar redundancia a los sectores residenciales del Norte.

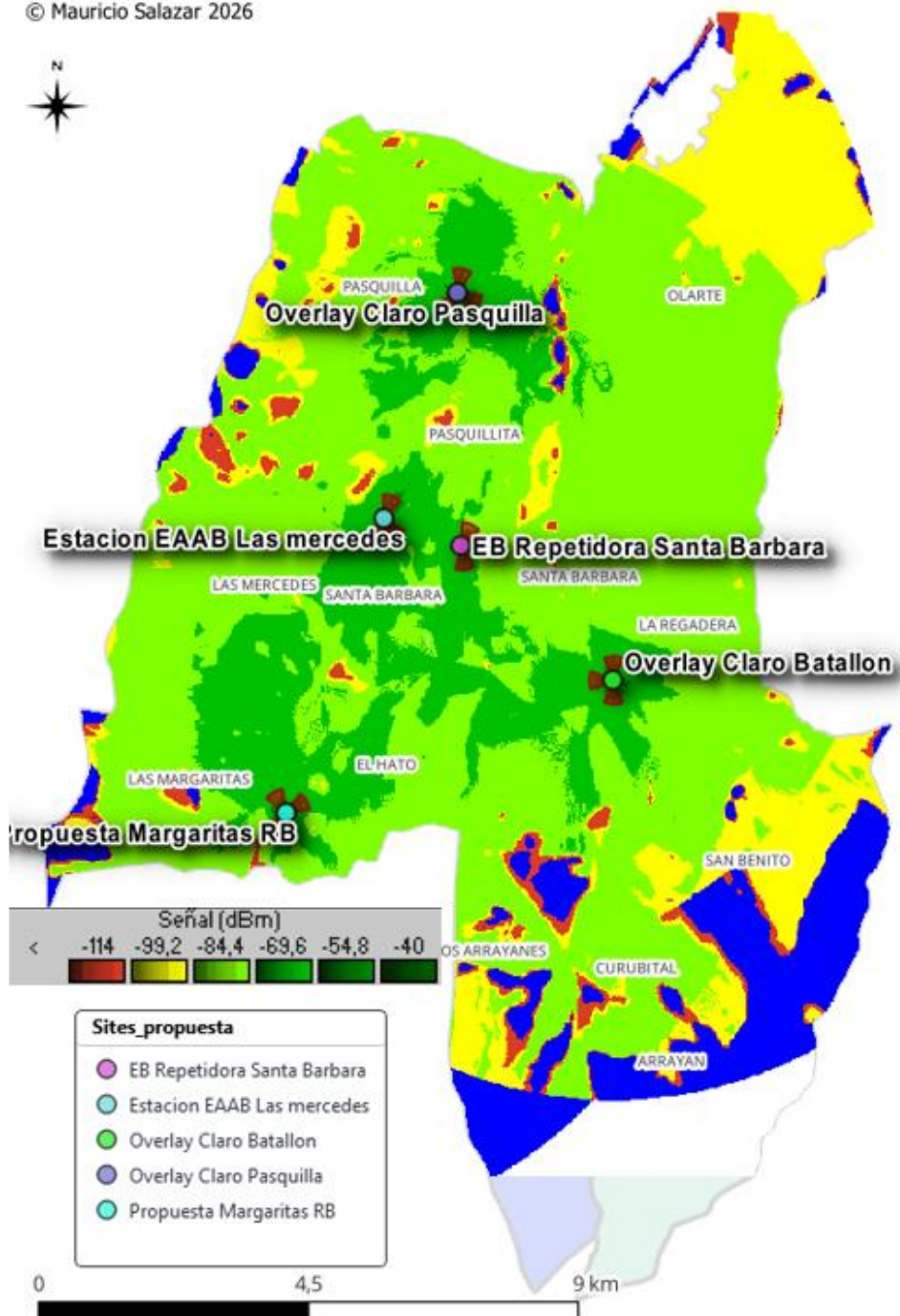
*Overlay: Implementación en infraestructura con portadoras y/o tecnologías diferentes a la propuesta.

Predicción de Cobertura de la Red Propuesta.

Figura 25

Predicción teórica de cobertura (Propuesta Final)

© Mauricio Salazar 2026



Nota. Predicción de cobertura de los emplazamientos propuestos en *Radio Mobile*. Fuente.

Autoria propia.

Con la implementación de estos parámetros en *Radio Mobile*, se logra que el 95% del polígono de estudio pase de niveles de vacíos de cobertura (<-114 dBm) a niveles aceptables (-84.4 dBm) o excelentes (>-40 dBm).

Este diseño no solo soluciona la desconexión actual, sino que proporciona una infraestructura robusta capaz de soportar tecnologías *5G* e *IoT* en el futuro, cumpliendo así con las Obligaciones de Hacer (ODH) y el plan de expansión de cara a los entes reguladores.

Informe de Escalamiento Regulatorio y Guía Metodológica Replicable

La transferencia y cierre del proyecto requiere una consolidación de los hallazgos y análisis obtenidos de las fases previas para convertirlo en un insumo de valor de cara entes regulatorios y entidades con la capacidad política de gestionar aplicar y/o revisar estos. Con el objetivo de trascender el análisis académico realizado en soluciones tangibles para implementaciones y decisiones como lo son las obligaciones de hacer, estos productos se presentan detalladamente en la sección de anexos de presente documento.

Elaboración del Insumo Regulatorio

El insumo regulatorio se constituye como un informe técnico de escalamiento diseñado para ser radicado ante el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) y la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC). Este documento traduce la complejidad de los parámetros RAN y las simulaciones de propagación en un requerimiento administrativo de impacto social.

El contenido del informe a partir de los siguientes ejes estratégicos:

Evidencia de la Brecha Digital: Resumen ejecutivo de los hallazgos en los 17 Puntos de Interés (POI), demostrando que entre el 80% y el 90% de las muestras recolectadas para los

operadores principales evidencian niveles de potencia críticos (<-113 dBm) o inexistencia de servicio.

Propuesta de Optimización Rural: Sustentación técnica de la viabilidad de la banda de 700 MHz como la solución óptima para superar las obstrucciones orográficas detectadas en las veredas.

Exigencia de Cumplimiento: Vinculación de los resultados con el marco de las Obligaciones de Hacer (ODH), instando a los entes reguladores a supervisar y exigir el despliegue efectivo de infraestructura en los vacíos de cobertura identificados.

Figura 26

Radicados entes gubernamentales MINTIC.

The screenshot shows the top navigation bar of the MINTIC website with the following links: Inicio, Transparencia y Acceso a la información Pública, Atención y Servicio a la Ciudadanía (selected), Participa, Ministerio, Oferta Institucional, Normativa, and Sala de prensa. Below the navigation bar is a blue bar with the GOV.CO logo. The main content area features a green confirmation message: "Su PQRSD ha quedado registrada correctamente!" with a checkmark icon. Below this message, it states: "Tenga en cuenta que será notificado por medio de Correo Electrónico." A white box contains the registration details: "Información de la PQRSD", "Número de Radicado: 261046752", "Clave: D3IJHVPM8", and "Fecha y hora de la Recepción: 2026-05-06 21:47:42". A red warning message below the box reads: "Por favor mantenga la información en un lugar seguro." At the bottom, there are two buttons: "Registrar Nueva PQRSD" (green) and "Gestionar PQRSD" (yellow).

Nota. Informes radicados en las respectivas entidades estatales como lo son la alcaldía de Bogotá con el Radicado Nro. 20264211578382 y el ministerio de las tecnologías de la información y telecomunicaciones con el radicado Nro. 261046752. Tomado de.

Atención a la ciudadanía 2026 MINTIC

https://integratic.mintic.gov.co/PQRSDV3//Publica/FormularioGestionPQRSD/Frm_GestionPQRSD.php?PqrNoRadicado=261046752&PqrClave=D3IJHVPM8&Accion=Consultar%20PQRSD.

Producto: Guía Metodológica Replicable

La guía metodológica replicable es el producto orientado a garantizar la sostenibilidad social y técnica del proyecto. Este documento ha sido diseñado bajo una filosofía de software libre y transferencia de conocimiento, eliminando barreras económicas de licenciamiento para las comunidades rurales.

La guía proporciona un protocolo paso a paso para que líderes comunitarios y gestores locales puedan replicar el diagnóstico de manera autónoma, abarcando:

Parametrización de Herramientas: Instrucciones detalladas para la configuración de *G-NetTrack* (captura), *QGIS* (análisis geoespacial) y *Radio Mobile* (simulación).


Protocolo de Campo: Metodología para la ejecución de *Drive Tests* y/o *Walk Tests* con rigor técnico.

Interpretación de Resultados: Guía para la lectura de indicadores de Calidad de Experiencia (*QoE*), permitiendo a la comunidad traducir "puntos rojos" en el mapa en argumentos de gestión de infraestructura. URL de guía replicable: <https://portfolio-mauricio-jet.vercel.app/guia>


Figura 27

Guía Metodológica página servidora.

Home Guía About

03  **Ingeniería de Diseño**

Se definen los criterios técnicos para el diseño de soluciones basadas en Bandas Bajas (**Sub-1GHz**), priorizando la penetración de señal en geografías complejas. La metodología incluye el cálculo de presupuestos de enlace (**Link Budget**), la optimización de parámetros de antena (**Azimuth** y **Tilt**) y el reúso de infraestructura existente para garantizar umbrales de potencia estables superiores a los **-95 dBm**.

04  **Marco Administrativo y Legal**

El protocolo culmina con la estructuración de informes técnicos de sustentación bajo los lineamientos de entes reguladores. Se orienta al usuario en la documentación de brechas digitales para que el diagnóstico sirva como prueba técnica en la solicitud de inclusión de territorios en planes de *Obligaciones de Hacer (ODH)* y programas de expansión de cobertura del **MinTIC**.

¿Necesitas el protocolo completo de ingeniería?

[↓ DESCARGAR GUÍA TÉCNICA](#)

Nota. Se deja como opción de descarga en página web la guía metodológica, así como una breve introducción mediante la pagina para tener un recurso actualizable y replicable en constante validación y reversiona miento. *Fuente.* Autoria propia.

Conclusiones

El desarrollo del presente proyecto aplicado permite validar la brecha digital en la ruralidad de Bogotá no solo como métrica estadística, sino como un fenómeno físico, técnico y en puntualidades también social, que puede ser diagnosticado y resuelto mediante ingeniería de precisión. A continuación, se detalla el cumplimiento de los objetivos planteados:

Diagnóstico Georreferenciado y Caracterización de la Red

Se logra la captura y procesamiento de datos de capa física (L1) en un recorrido de 75.44 km. El uso de técnicas de *Drive Test* y *Walk Test* permite identificar con exactitud que entre el 80% y 90% de las muestras se encuentran en niveles críticos ($RSRP < -113$ dBm). Este diagnóstico cumple con la meta de transformar la percepción subjetiva de la comunidad en evidencia técnica irrefutable, localizando vacíos de cobertura que afectan a los 17 Puntos de Interés (POI) identificados y a la región en general.

Análisis de Causas y Limitaciones Físicas

Mediante el análisis de perfiles de elevación y simulación de propagación, se cumple el objetivo de sustentar la insuficiencia de la red actual. Se demuestra como las bandas medias (1900/2600 MHz) sufren pérdidas por difracción de hasta 57.3 dB debido a la topografía de Usme. Este hallazgo permite identificar que no es solo un problema de mantenimiento hacia sino se constituye la limitación de diseño físico, justificando la necesidad de una actualización tecnológica.

Propuesta de Optimización y Despliegue

El diseño de solución se fundamenta en la Banda de 700 MHz (Banda 28). La configuración de 5 nodos estratégicos, que integra el reuso de infraestructura existente (EAAB Las Mercedes) y la creación del nodo EB Las Margaritas, garantiza que el 100% de los POI

institucionales alcancen niveles de *QoE* superiores a -95 dBm. Este modelo proporciona una hoja de ruta ejecutable y alineada con las Obligaciones de Hacer (ODH) del MinTIC.

Guia Metodológica y Transferencia de Conocimiento

Se consolida una metodología de bajo costo que democratiza la auditoría de redes. La documentación del uso de *G-NetTrack Pro*, *QGIS* y *Radio Mobile* dota a las comunidades, líderes locales, profesionales e incluso a entes gubernamentales de una herramienta y metodología profesional para gestionar sus propios vacíos de conectividad ante los entes reguladores. Este producto asegura la replicabilidad del diagnóstico en diversos entornos rurales del país.

Recomendaciones y Limitaciones

El análisis de resultados y el proceso de recolección de datos permite establecer una hoja de ruta para la intervención del territorio y documentar los desafíos operativos encontrados en campo.

Recomendación de Expansión de Infraestructura

Implementación de Modelos de Financiación Híbridos: Dado que ciertas áreas del polígono rural de Usme presentan una baja densidad poblacional que limita la rentabilidad comercial, se recomienda la aplicación de subsidios gubernamentales o incentivos a operadores y región. El uso de Obligaciones de Hacer (ODH) permite que los operadores compensen pagos por contraprestación de espectro mediante el despliegue de infraestructura en estas zonas de difícil acceso.

Priorización de la Banda de 700 MHz: La planificación de nuevas celdas debe centrarse exclusivamente en bandas bajas. El despliegue de tecnologías en bandas medias (1.9 o 2.6 GHz) resulta ineficiente en este entorno, por lo que la configuración de la Banda 28 es la solución técnica que asegura la penetración de señal en los valles cerrados del polígono.

Fomento de la Infraestructura Compartida: Se sugiere incentivar acuerdos de *roaming* nacional y el uso compartido de infraestructura pasiva (torres, mástiles y/o red de acceso) entre operadores. El aprovechamiento de sitios existentes, como la infraestructura de la EAAB, reduce el impacto ambiental y los costos de despliegue inicial (CAPEX).

Limitaciones del Estudio y Desafíos Generales

Complejidad orográfica: La topografía andina impone restricciones críticas para la toma de muestras. La presencia de valles profundos y cerros de gran elevación dificulta el mantenimiento de la línea de vista con las estaciones base urbanas, generando una fluctuación

constante en los datos de señal que exige procesos de filtrado y premediación de datos más rigurosos.

Restricciones de acceso geográfico: El estado de las vías rurales y la existencia de senderos peatonales de difícil tránsito limitan el alcance del *Drive Test* vehicular. Esto obliga a la ejecución de Walk Tests (muestreo peatonal) prolongados, aumentando el tiempo de recolección de datos en puntos de interés socialmente sensibles que se encuentran alejados de las rutas principales.

Dependencia de condiciones atmosféricas: El clima de alta montaña influye en la propagación de la señal y en la operatividad de los equipos de medición. La presencia de nubosidad densa y lluvias constantes en sectores como La Regadera puede introducir niveles de atenuación adicionales en las bandas de frecuencia evaluadas, afectando la repetibilidad de ciertas mediciones de *QoE*.

Actualización de inventarios oficiales: Se identifica una discrepancia entre la infraestructura física reportada en las bases de datos oficiales y la presencia real en terreno. Esta limitación exige una validación visual exhaustiva para asegurar que las simulaciones de propagación se ajusten a la capacidad instalada real del territorio.

Referencias Bibliográficas

3GPP. (2019). *Release 15*. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-15>

Adamowicz, A. (2025). *Calidad de servicio en redes móviles* [Presentación de diapositivas].

Unión Internacional de Telecomunicaciones. <https://www.itu.int/es/itu-t/workshops-and-seminars/QoS/20210602/documents/alejandro%20adamowicz.pdf?csf=1&e=ehjqux>

Agencia Nacional del Espectro. (2018). *Consulta pública sobre las bandas de frecuencia para 5G en Colombia*.

<https://www.ane.gov.co/documentos%20compartidos/archivosdescargables/noticias/consulta%20p%20c3%20bablica%20sobre%20las%20bandas%20disponibles%20para%20el%20futuro%20desarrollo%20de%20las%20imt%20en%20colombia.pdf>

Agencia Nacional del Espectro. (2020). *Tendencias del uso del espectro radioeléctrico (Informe banda 700)*.

https://www.ane.gov.co/documentos%20compartidos/archivosdescargables/noticias/informe%20banda%20700_2020_f.pdf

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). *Balance final del plan de conectividad rural*. Veeduría

Distrital. <https://colibri.veeduridistrital.gov.co/sites/default/files/2019-12/balancefinal-conectividadrural.pdf>

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2023, 29 de diciembre). *Conectividad en Sumapaz y otros logros*

TIC de Bogotá en 2023. Portal de Bogotá. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/gestion-publica/conectividad-en-sumapaz-y-otros-logros-tic-de-bogota-en-2023>

Álvarez, V., Bareño, R., & Sosa, J. (2021). La importancia de la analítica y la inteligencia

artificial en la salud; en el análisis de muertes neonatales y perinatales en Bogotá D.C. En

- R. Bareño & J. Moreno (Eds.), *Seguridad en la administración y calidad de los datos: Estudio de casos por contextos* (Vol. 1, 1.^a ed., pp. 83-95). Ediciones de la U.
- Bareño-Gutiérrez, R. (2013). *Elaboración de un estado de arte sobre el protocolo IPv6; y su implementación sobre protocolos de enrutamiento dinámico como RIPng, EIGRP y OSPF basado sobre la plataforma de equipos Cisco* [Trabajo de grado no publicado].
- Bareño-Gutiérrez, R. (2024). *Explorando el universo IPv6: Para la innovación de un mundo interconectado* (1.^a ed.). Ediciones de la U.
<https://repositoriocrai.ucompensar.edu.co/handle/compensar/5253>
- Bareño-Gutiérrez, R., Báez-Rodríguez, H. L., & Carvajal, J. (2025). Recomendaciones de ciberseguridad bajo la implementación de políticas de defensa en profundidad en las organizaciones: Revisión sistemática de la literatura. *Información Tecnológica*, 36(3), 1-12. <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-07642025000300001>
- Bareño-Gutiérrez, R., & Lengerke, O. (2014). *Voto electrónico con SSL/TLS e IPsec* [Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. Repositorio Institucional UNAB.
<https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/12268>
- Bareño-Gutiérrez, R., Sevillano, A. M. L., Díaz-Piraquive, F. N., & González-Crespo, R. (2021). Analysis of web browsers of HSTS security under the MITM management environment. En L. Uden, I. H. Ting, & K. Wang (Eds.), *Knowledge Management in Organizations. KMO 2021. Communications in Computer and Information Science* (Vol. 1438, pp. 331-344). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81635-3_27
- Bareño-Gutiérrez, R., Sonia, C. U., William, N. N., & Hugo, s. O. (s.f.). *Análisis técnico basado en estándares internacionales para la implementación del data center de apoyo a la*

gestión tecnológica y de formación por competencias en el CEET del SENA Distrito Capital [Informe técnico no publicado].

Bareño-Gutiérrez, R., et al. (2023). *UCompensar: La academia motor en la transformación digital y automatización de la industria 4.0* (1.^a ed.). Ediciones de la U.

<https://repositoriocrai.ucompensar.edu.co/handle/compensar/5251>

Bareño-Gutiérrez, R., et al. (2023). Algoritmos de machine learning aplicados al sector salud: Una realidad para la toma de decisiones desde la analítica de datos. En *UCompensar: La academia motor en la transformación digital y automatización de la industria 4.0* (pp. 19-45). Ediciones de la U.

<https://repositoriocrai.ucompensar.edu.co/handle/compensar/5251>

Bareño-Gutiérrez, R., et al. (2023). Migración a la nube en pymes y mipymes: Una revisión basada en buenas prácticas desde la gestión TI. En *UCompensar: La academia motor en la transformación digital y automatización de la industria 4.0* (pp. 51-71). Ediciones de la U. <https://repositoriocrai.ucompensar.edu.co/handle/compensar/5251>

Bustos, J. V. (2023). *Estudio técnico de los indicadores de desempeño para simular una red 5G NR en tres localidades de la ciudad de Bogotá, en las bandas de radiofrecuencia C (3.5 GHz) y K (26 GHz)* [Tesis de especialización, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/60089/3/jvelasquezbu.pdf>

Cárdenas, F., & [Coautor faltante]. (2017). WRAN y LTE en la banda de 700 MHz para Colombia. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(26).

https://www.researchgate.net/publication/319958686_wran_y_lte_en_la_banda_de_700_mhz_para_colombia

- Comisión de Regulación de Comunicaciones. (2019). *Redes móviles en Colombia: Análisis y hoja de ruta regulatoria para su modernización*. <https://www.crcom.gov.co/es/proyectos-regulatorios/5000-58-1>
- Comisión de Regulación de Comunicaciones. (2022). *Resolución No. 6755 de 2022*. <https://www.crcom.gov.co/sites/default/files/normatividad/resolucion-6755-de-2022.pdf>
- Comisión de Regulación de Comunicaciones. (2024). *Resolución No. 00007285*. <https://www.crcom.gov.co/sites/default/files/normatividad/00007285.pdf>
- Comisión de Regulación de Comunicaciones. (2025). *Estudio de tendencias en el despliegue y compartición de infraestructura*. <https://crcom.gov.co/es/biblioteca-virtual/estudio-tendencias-en-despliegue-y-comparticion-infraestructura>
- Comisión de Regulación de Comunicaciones. (2026, febrero). *Sitios de infraestructura móvil*. PostData. <https://www.postdata.gov.co/mapa/sitios-de-infraestructura-movil>
- Comité de Comisionados de Comunicaciones. (2025). *Estudio de tendencias en el desarrollo de redes móviles 5G*. Comisión de Regulación de Comunicaciones. <https://www.crcom.gov.co/system/files/biblioteca%20virtual/estudio%20de%20tendencias%20en%20el%20desarrollo%20de%20redes%20m%c3%b3viles%205G/estudio-tendencias-desarrollo-redes-moviles-5G.pdf>
- Contreras, V. (2010). *Análisis e implementación de sistemas geográficos para fiscalización de radiobases* [Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/529/12/ups-ct001857.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2023). *Indicadores básicos de tenencia y uso de tecnologías de la información y las comunicaciones – TIC en hogares*.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/tecnologia-e-innovacion/tecnologias-de-la-informacion-y-las-comunicaciones-tic/indicadores-basicos-de-tic-en-hogares>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2025, febrero). *Colombia en mapas: Veredas Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

<https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-81.56490479535007,4.611928089464775,-75.96187745160154,10.825126567369077,4686&b=igac&u=0&t=29&servicio=690>

Ebyte. (2024, junio). *¿Por qué la banda de frecuencia de 700 MHz se llama "banda de frecuencia dorada"?* <https://www.cdebyte.com/news/676>

Gutiérrez, R. B. (2022). Machine learning predictivo a partir de la analítica y de modelos de inteligencia artificial: Un caso de estudio. En *Ingeniería y desarrollo en la nueva era* (pp. 759-767). Instituto Antioqueño de Investigación (IAI).

Gyokov Solutions. (2024). *G-NetTrack* (Versión 4.x) [Aplicación móvil]. Google Play Store / Sitio web oficial. <https://gykovsolutions.com/G-NetTrack>

Intriago, D. A. (2025). Desarrollo de un mapa espectral de cobertura móvil en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. *Revista Regularidad*, 1(1), 123-134.
<https://www.revistareg.com/index.php/1/article/download/123/342>

López, A., Jiménez, Y., Bareño, R., Balamba, B., & Sacristán, J. (2019, octubre). *E-health system for the monitoring, transmission and storage of the arterial pressure of chronic-hypertensive patients* [Ponencia]. Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI), Bogotá, Colombia. IEEE.

Martínez, H. S. (2023). *Análisis de aspectos técnicos y tecnológicos de la telefonía móvil 5G, sus posibles beneficios* [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia].

Repositorio Institucional UNAD.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/55565/hsanchezma.pdf?isallowed=y&sequence=3>

Medux. (2022, 15 de marzo). *Medición de servicios reales en un entorno real para captar la verdadera experiencia de usuario*. <https://medux.com/es/blog/medicion-de-servicios-reales-en-un-entorno-real-para-captar-la-verdadera-experiencia-de-usuario>

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2019). *Acceso y conectividad móvil en zonas rurales*. https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-125867_pdf.pdf

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2022a). *Plan integral de expansión de conectividad digital*.

<https://mintic.gov.co/micrositios/planconectividaddigital/870/w3-channel.html>

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2022b). *Plan nacional de desarrollo 2022-2026: ConectaTIC 360*. IV Foro Colombia – Unión Europea.

<https://www.euroamerica.org/wp-content/uploads/2023/03/conectatic-360-iv-foro-colombia---unión-europea.pdf>

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2023a). *Asignación de espectro IMT 2023*. https://mintic.gov.co/micrositios/asignacion-espectro-imt-2023/828/articles-334602_recurso_1.pdf

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2023b). *Documento soporte de consulta pública para el desarrollo de 5G en Colombia*.

https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-236811_documento_soporte_consulta_publica_desarrollo_5G_colombia.pdf

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2024a, 22 de febrero).

Resolución Número 00496 de 2024. https://mintic.gov.co/micrositios/asignacion-espectro-imt-2023/828/articles-334601_recurso_1.pdf

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2024b, 23 de febrero).

Resolución Número 00497 de 2024. https://mintic.gov.co/micrositios/asignacion-espectro-imt-2023/828/articles-334602_recurso_1.pdf

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2024c, 23 de febrero).

Resolución Número 00498 de 2024. https://mintic.gov.co/micrositios/asignacion-espectro-imt-2023/828/articles-384291_recurso_1.pdf

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2024d, 23 de febrero).

Resolución Número 00499 de 2024. https://mintic.gov.co/micrositios/asignacion-espectro-imt-2023/828/articles-384290_recurso_1.pdf

Moreno, J., & Bareño, R. (2021). *Seguridad en la administración y calidad de los datos: Estudio de casos por contextos* (1.ª ed.). Editorial Ediciones de la U. ISBN 978-958-792-317-9.

Otero, J. F. (2025, 5 de junio). Conectividad rural en Estados Unidos. *El Economista*.

<https://www.eleconomista.com.mx/opinion/conectividad-rural-estados-unidos-20250605-762414.html>

Polak, L. (2024, abril). Measurement and analysis of 4G/5G mobile signal coverage in a heavy industry environment. *PubMed Central (PMC)*.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/pmc11054803/>

QGIS Development Team. (2024). *QGIS Sistema de Información Geográfica* (Versión 3.34)

[Software]. QGIS.org. <https://qgis.org/>

Radio Mobile (Link Technologies, Inc.). (2024). *Radio Mobile* [Software]. VE2DBE.

<https://www.ve2dbe.com/english1.html>

Raúl, B. G., & Sevillano, A. M. L. (2017, octubre). *Services cloud under HSTS, strengths and weakness before an attack of man in the middle MITM* [Ponencia]. Congreso

Internacional de Innovación y Trends en Ingeniería (CONIITI), Bogotá, Colombia. IEEE.

Romero, J. S., & Díaz, X. (2022). *Evolución de la conectividad a Internet en La Vega* [Trabajo de grado, Universidad EAN]. Repositorio Institucional EAN.

<https://repository.universidadean.edu.co/bitstream/handle/10882/12438/diazximena2022.pdf?isallowed=y&sequence=2>

Saeed, M. A., & Nwajana, A. O. (2024). Design of a rectangular linear microstrip patch antenna array for 5G communication. *IEEE Access* [o revista correspondiente].

<https://doi.org/10.1109/array58370.2024.10880409>

Secretaría Distrital de Planeación. (2022, agosto). *Datos Abiertos Bogotá: Localidad Bogotá*

D.C. Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/localidad-bogota-d-c>

Suárez, J. D. L. S. S., Córdoba, S. M. G., Mariño, D. C. A., Gutiérrez, R. B., & Soto, J. P. T.

(2022). Impacto de la implementación de una plataforma como servicio para apoyar procesos de formación empresarial mediante la modalidad MOOC. En *Ingeniería y desarrollo en la nueva era* (pp. 791-799). Instituto Antioqueño de Investigación (IAI).

Suárez, V., & Bareño, R. (2021). Una mirada a las historias clínicas digitales, la calidad del dato, sus estándares, aspectos de ciberseguridad y su interoperabilidad en Colombia. En J.

Moreno & R. Bareño (Eds.), *Seguridad en la administración y calidad de los datos: Estudio de casos por contextos* (1.^a ed., Vol. 1, pp. 11-28). Editorial Ediciones de la U.

- Superintendencia de Telecomunicaciones (SUTEL). (2017). *Metodología de medición aplicable a los servicios de telefonía móvil del reglamento de prestación y calidad de servicios*. Costa Rica. https://sutel.go.cr/sites/default/files/audiencias/metodologia_sutel_-_servicios_de_telefonia_movil.pdf
- Universidad Nacional de Loja. (2022). *Guía G-NetTrack: Tutorial de tráfico y telefonía*. Studocu. <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-nacional-de-loja/trafico-y-telefonía/guia-gnet-track-tutorial/37722925>
- Urrea, S. E. C., Núñez, w. N., Osorio, H. E. S., Páez, N. A. F., & Gutiérrez, R. B. (2017). Sistema de votación electrónico con características de seguridad SSL/TLS e IPsec en Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 16(1), 75-84.
- Urrea, S. E. C., Núñez, W. N., Gutiérrez, R. B., & Osorio, H. E. S. (s.f.). Gestión de conocimiento soportado en TIC para entidades educativas de formación por competencias SENA–CEET. En *VI Congreso Internacional de Formación y Gestión del Talento Humano: Enfoques y modelos para la formación, la innovación* (p. 392).
- Vega, W., & Wilson, V. (2022, 14 de diciembre). *Colombia se 'raja' en conectividad de internet rural bajo estándares mínimos de calidad*. Xataka Colombia. <https://www.xataka.com.co/otros/colombia-se-raja-conectividad-internet-rural-estandares-minimos-calidad>
- Zhang, Y., Kishk, M. A., & Alouini, M.-S. (2026). High altitude platform-based caching and multicasting for rural connectivity. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.1109/tvt.2025.3590544>

Apéndices

Apéndice A

Informe de Escalamiento a Operadores, Entes Reguladores y Gubernamentales

Este espacio contiene el registro oficial del radicado y la trazabilidad del proceso de escalamiento interpuesto ante las autoridades competentes del sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en Colombia. El documento consolida las evidencias técnicas de los vacíos de conectividad analizados en campo, sirviendo como soporte legal y administrativo para la solicitud de intervención estatal en la infraestructura móvil rural. El estado del requerimiento, las respuestas de los operadores y las actuaciones de los entes reguladores pueden ser consultados directamente en el sistema de gestión del Ministerio de TIC a través del siguiente enlace:

https://integratic.mintic.gov.co/PQRSDV3//Publica/FormularioGestionPQRSD/Frm_GestionPQRSD.php?PqrNoRadicado=261046752&PqrClave=D3IJHVPM8&Accion=Consultar%20PQRSD

Apéndice B

Guía Metodológica Replicable para el Análisis de Vacíos de Cobertura Rural

En este apartado se dispone el acceso al recurso educativo y metodológico desarrollado como producto de transferencia de conocimiento de este proyecto aplicado. La guía proporciona un marco técnico estandarizado y secuencial para la utilización de herramientas de software libre (como QGIS y Radio Mobile) en la evaluación de la Calidad de Experiencia (QoE) en entornos de difícil acceso. El manual está estructurado para que comunidades organizadas, ingenieros o entidades gubernamentales locales puedan replicar el diagnóstico de redes móviles en otras regiones del país. El repositorio interactivo y los archivos complementarios están disponibles en el siguiente enlace de despliegue web:

<https://portfolio-mauricio-jet.vercel.app/guia>