

Optimización del desempeño de redes móviles en un entorno multioperador

Andrés Camilo Reyes Nuñez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de Telecomunicaciones

Director

Elizabeth Gelves Gelves

Magister en Administración de Empresas con especialidad en calidad, seguridad y medio ambiente

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Ingeniería de Telecomunicaciones

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mi madre, Mary Nuñez, por su apoyo incondicional y los sacrificios realizados a lo largo de mi formación. A mis hermanas, por su guía y acompañamiento en cada paso de este camino, y a mis amigos, por su compañía, apoyo y los logros compartidos.

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a los ingenieros Mauricio Salgado y Gabriel Cabrera, por su acompañamiento y mentoría durante el desarrollo de mis prácticas profesionales. Sus enseñanzas, apoyo constante, paciencia y dedicación fueron fundamentales para el aprendizaje y fortalecimiento de las habilidades técnicas necesarias para el desarrollo de las actividades. De igual manera, agradezco a la Universidad Santo Tomás y, en especial, a las profesoras Elizabeth Gelves y Yuli Álvarez, por las enseñanzas brindadas tanto en el ámbito académico como humano. Su orientación, confianza y compromiso generaron un entorno que me permitió crecer como persona y adquirir conocimientos sólidos en el área de radiofrecuencia.

Contenido

Introducción	11
1. Optimización del desempeño de redes móviles en entornos multioperador	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
2. Marco referencial	15
2.1 Marco teórico	15
2.2 Marco conceptual	16
2.3 Marco legal.....	18
3. Método	20
3.1 Validación y justificación de reportes de Drive Test 5G	20
3.2 Análisis de desempeño de la red y procesamiento de datos.....	21
3.3 Elaboración de reportes y seguimiento con el cliente	22
3.4 Configuración avanzada y parametrización de la red	22
4. Resultados	23
4.1 Generación de informes 5G orientados al cliente	23
4.2 Resultados del análisis de KPIs.....	26
4.3 Resultados de configuración y automatización de la red	28
5. Conclusiones	30
Referencias.....	32

Lista de figuras

Figura 1. <i>Se generan y organizan archivos de soporte utilizados para la validación y justificación de los reportes de Drive Test 5G.</i>	24
Figura 2. <i>Análisis técnico para sitios con bajo addition por operador.</i>	24
Figura 3. <i>Análisis técnico para sitios con bajo throughput.</i>	25
Figura 4. <i>Reporte de recorrido DT 5G y análisis técnico para sitios con baja cobertura.</i>	25
Figura 5. <i>Consultas SQL mediante Python para procesamiento con librerías.</i>	26
Figura 6. <i>Sugerencia de expansiones de bandas a sitios por Azimuth para bajar alta congestión.</i>	27
Figura 7. <i>Análisis de usuarios en sitio según distancia de cobertura.</i>	27
Figura 8. <i>Segmento del código del Análisis de relaciones.</i>	29
Figura 9. <i>Verificación de usuarios 5G conectados por operador, luego de ejecución de baseline.</i>	29
Figura 10. <i>Parametrización de features – Generación de Scripts.</i>	30

Resumen

Durante mi experiencia práctica en Huawei Technologies Co., Ltd., me desempeñé en el área de Radio Frecuencia (RF), específicamente con el equipo de Optimización de Redes Móviles (RNO). La práctica tuvo como objetivo apoyar el análisis y la optimización del desempeño de la red móvil en tecnologías 3G, 4G y 5G de los operadores Tigo y Telefónica, en el contexto de la unificación de la red de acceso por radio y el núcleo de red en Colombia. Entre las principales actividades realizadas se incluyó la trazabilidad del desempeño de la red mediante el uso de herramientas de seguimiento con el cliente, orientadas al análisis de tendencias y al control de sitios escalados, dicho proceso permitió establecer un canal de comunicación continuo, facilitando su revisión en reuniones periódicas a través del análisis de indicadores clave de desempeño (KPIs). De igual forma se llevaron a cabo tareas de optimización de las redes 3G, 4G y 5G mediante el análisis técnico de cada sitio y la aplicación de ajustes de parametrización, con el fin de mejorar el desempeño de la red en las diferentes regiones. Adicionalmente, se desarrollaron scripts en Python para la automatización de tareas, lo que permitió la obtención y ejecución masiva de parametrizaciones, contribuyendo a mejorar la eficiencia de los procesos de optimización, así como el análisis de grandes volúmenes de datos asociados a diferentes procesos operativos. A través de estas actividades, se adquirió conocimiento técnico sobre tecnologías tradicionales como 3G y 4G, así como sobre tecnologías emergentes como 5G, las cuales se encuentran en creciente implementación en Colombia. De igual manera, se fortalecieron habilidades prácticas en el análisis de datos y en la evaluación del desempeño de la red móvil.

Palabras clave: Radiofrecuencia, Optimización, Desempeño de la red, Parametrización

Abstract

During my internship at Huawei Technologies Co., Ltd., I worked in the radio frequency (RF) department, specifically with the mobile network optimization (RNO) team. The goal of the internship was to support the analysis and optimization of the performance of 3G, 4G, and 5G mobile networks for the operators Tigo and Telefónica in Colombia, in the context of unifying the radio access and core networks. My main activities included using customer tracking tools to trace network performance and focus on trend analysis and monitoring escalated sites. This process established a continuous communication channel and facilitated case review during periodic meetings by analyzing key performance indicators (KPIs). Optimization tasks were also carried out for 3G, 4G, and 5G networks through technical site analysis and parameter adjustments to improve network performance in different regions. Furthermore, I developed Python scripts to automate operational tasks and enable the large-scale extraction and execution of network parameter configurations. This improved the efficiency of optimization processes and the analysis of large volumes of operational data. Through these activities, technical knowledge was acquired in traditional technologies, such as UMTS (3G) and LTE (4G), as well as in emerging technologies, such as NR (5G), which are being increasingly deployed in Colombia. Practical skills in data analysis and mobile network performance evaluation were also strengthened.

Keywords: Radio Frequency, Network Optimization, Network Performance, Parameterization

Glosario

Addition: proceso mediante el cual una celda 5G es agregada a una sesión activa del usuario, permitiendo el uso simultáneo de recursos de diferentes tecnologías para mejorar el desempeño de la conexión; las razones de rechazo de *addition* permiten identificar limitaciones asociadas a interfaces o a la capa de transporte [1], [2].

Ancla (Anchor Cell): celda base, generalmente LTE (4G), que actúa como punto de control y soporte para la conexión de celdas 5G en arquitecturas no independientes, facilitando la señalización y la movilidad del usuario [1].

Core Network (Núcleo de Red): parte central de la red móvil responsable de funciones de control y soporte de servicios, tales como el registro y autenticación de usuarios, la gestión de sesiones de datos, la movilidad y la aplicación de políticas de red, garantizando una operación segura y continua [1], [3].

Drive Test: metodología de medición de campo utilizada para evaluar el desempeño real de la red móvil mediante recorridos físicos, recolectando información sobre cobertura, calidad de señal, throughput y experiencia del usuario [4].

Espectro Radioeléctrico: recurso físico limitado utilizado para la transmisión inalámbrica de señales entre la red móvil y los dispositivos de los usuarios, cuya gestión eficiente es fundamental para garantizar la capacidad y calidad del servicio [4], [5].

Indicadores Clave de Desempeño (KPIs): métricas cuantitativas empleadas para evaluar el comportamiento y desempeño de la red móvil, incluyendo accesibilidad, capacidad, movilidad, retención y calidad del servicio, esenciales para los procesos de análisis y optimización [6].

Interfaz X2: interfaz de comunicación entre estaciones base que permite el intercambio de información necesaria para la movilidad, la coordinación de recursos y la gestión de interferencias; fallas en esta interfaz pueden afectar procesos como el addition y la continuidad del servicio [1].

MOCN (Multi-Operator Core Network): modelo de compartición de red en el que varios operadores comparten la infraestructura de acceso por radio y los recursos de espectro radioeléctrico, manteniendo núcleos de red independientes para la gestión de usuarios y servicios [2], [7].

MORAN (Multi-Operator Radio Access Network): modelo de compartición en el que múltiples operadores comparten la infraestructura activa de la RAN, conservando el uso exclusivo de su propio espectro radioeléctrico y manteniendo independencia operativa [2], [7].

Multioperador: escenario de operación en el cual dos o más operadores prestan servicios de telecomunicaciones sobre infraestructura compartida, manteniendo la identificación lógica y el control de sus respectivos usuarios y servicios [7].

Network Sharing: estrategia de operación de red que permite a varios operadores compartir infraestructura y/o recursos de red con el fin de optimizar costos, acelerar despliegues y mejorar la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico [2], [7].

Parametrización: proceso de configuración y ajuste de parámetros técnicos en los elementos de red, orientado a optimizar el desempeño, la estabilidad y la calidad del servicio de la red móvil [6].

PRB (Physical Resource Block): unidad básica de asignación de recursos en sistemas LTE y 5G, utilizada para medir la ocupación y capacidad de la red en el dominio del tiempo y la frecuencia [1].

Radio Access Network (RAN): conjunto de elementos de la red móvil responsables de establecer y mantener la comunicación inalámbrica con los dispositivos del usuario mediante enlaces de radio, incluyendo estaciones base, antenas y funciones asociadas [1].

Throughput: indicador que representa la tasa efectiva de transferencia de datos en la red móvil, utilizado para evaluar el rendimiento del servicio percibido por el usuario final [5].

Introducción

Las redes móviles se han convertido en un componente fundamental para el desarrollo de la sociedad actual, al soportar servicios de comunicación y acceso a internet, utilizadas de forma cotidiana por usuarios y empresas. El aumento constante en la demanda de calidad y cobertura de servicios móviles, junto con la incorporación de nuevas tecnologías, ha incrementado la complejidad de la operación y el mantenimiento de las redes, haciendo necesario el uso de estrategias de optimización que permitan garantizar un adecuado desempeño y calidad del servicio.

En este contexto, la optimización de redes móviles juega un papel clave en la mejora de indicadores relacionados con la cobertura, la capacidad y la experiencia del usuario. El análisis de indicadores clave de desempeño (KPIs) permite evaluar el comportamiento de la red, identificar degradaciones en el desempeño y definir acciones de mejora sobre sus distintos componentes. Empresas proveedoras de tecnología como Huawei Technologies Co., Ltd. desempeñan un rol importante en el soporte y la optimización de las redes móviles de los operadores, aportando conocimiento técnico, herramientas especializadas y metodologías enfocadas en la mejora del desempeño de la red, importante en procesos especializados como la unificación de operadores en la red.

El presente trabajo tiene como propósito describir y analizar la experiencia práctica desarrollada en el área de Optimización de Redes Móviles, enfocada en el análisis de KPIs, la optimización del desempeño de redes 3G, 4G y 5G, y la automatización de tareas mediante el uso de herramientas de programación. A través de este documento, se busca evidenciar los aportes técnicos realizados, así como los conocimientos y habilidades adquiridas durante la práctica profesional en un entorno real de operación de redes móviles en Colombia.

1. Optimización del desempeño de redes móviles en entornos multioperador

1.1 Planteamiento del problema

La creciente demanda de servicios móviles y la coexistencia de múltiples tecnologías como 3G, 4G y 5G han incrementado la complejidad en la operación y el mantenimiento de las redes móviles. En este contexto, los operadores enfrentan el desafío de garantizar un desempeño adecuado de la red, manteniendo niveles aceptables de cobertura, capacidad y calidad del servicio, aun cuando la infraestructura es compartida entre distintos operadores y gestionada de forma conjunta.

Uno de los principales retos en estos escenarios es el análisis eficiente de grandes volúmenes de información generada por la red, así como la correcta interpretación de los indicadores clave de desempeño (KPIs) para la identificación de degradaciones y la toma de decisiones orientadas a la optimización. Ante esta situación donde se unen dos operadores en la misma red, muchos procesos tienden a realizarse de forma manual o semiautomática al no tener tanta experiencia en estas situaciones, lo que puede generar demoras en el análisis y dificultades en el seguimiento de alta cantidad de casos.

Adicionalmente, en entornos multioperador se vuelve necesario establecer mecanismos claros de trazabilidad y comunicación entre los equipos técnicos y los clientes, que permitan dar seguimiento a los sitios con desempeño degradado y evaluar el impacto de las acciones de optimización implementadas. Sin embargo, estos procesos no siempre se encuentran estandarizados ni apoyados por herramientas de automatización que faciliten el análisis continuo de tendencias y la ejecución eficiente de parametrizaciones en la red.

En este sentido, surge la necesidad de analizar y aplicar procedimientos que integren el uso de KPIs, la automatización de tareas y el análisis de datos como apoyo a los procesos de optimización de redes móviles. La implementación de estas prácticas permite mejorar la eficiencia, fortalecer el seguimiento del desempeño de la red y apoyar la toma de decisiones técnicas en escenarios reales, como los presentados en redes móviles multioperador en Colombia.

1.2 Justificación

La optimización del desempeño de las redes móviles es un aspecto clave para garantizar la continuidad y calidad de los servicios de telecomunicaciones, en un entorno caracterizado por el crecimiento constante del tráfico y extensión de nuevas tecnologías. En Colombia, la existencia de redes 3G, 4G y 5G, junto con esquemas de operación multioperador (Tigo y Telefónica), plantea retos técnicos que requieren procesos de análisis y optimización cada vez más eficientes. En este contexto, resulta necesario fortalecer las estrategias que permitan evaluar el comportamiento de la red en un caso particular como lo es compartir operador para el núcleo y acceso de la red.

Desde una perspectiva académica y formativa, el desarrollo de este trabajo permite consolidar conocimientos en el área de Radio Frecuencia y optimización de redes móviles, integrando conceptos teóricos con su aplicación en un entorno real de operación. La experiencia adquirida contribuye al fortalecimiento de competencias en análisis de datos, evaluación del desempeño de la red y soporte a la toma de decisiones técnicas, aspectos fundamentales en la formación de un ingeniero de telecomunicaciones.

Finalmente, los procedimientos y experiencias descritos en este documento pueden servir como referencia para futuros trabajos académicos o prácticas profesionales relacionadas con la optimización de redes móviles en entornos multioperador.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Analizar y optimizar el desempeño de redes móviles en tecnologías 3G, 4G y 5G en un entorno multioperador, mediante el uso de indicadores clave de desempeño (KPIs) y herramientas de análisis de red.

1.3.2 *Objetivos específicos*

1. Analizar los indicadores clave de desempeño (KPIs) de estaciones móviles con tecnologías UMTS, LTE y NR, mediante herramientas de análisis de red, con el fin de identificar degradaciones y oportunidades de optimización en la red de acceso por radio.
2. Realizar el seguimiento y la trazabilidad de sitios escalados por el cliente, utilizando herramientas de control y *trackers*, para evaluar la evolución de su desempeño y el impacto de las acciones de optimización implementadas.
3. Elaborar y validar reportes técnicos de optimización para sitios 5G, a partir del análisis de KPIs y resultados de Drive Test, con el fin de apoyar la presentación de resultados y la toma de decisiones técnicas.
4. Aplicar herramientas de automatización y análisis de datos, tales como scripts en Python y consultas a bases de datos, como apoyo a los procesos operativos de optimización de redes móviles y a la gestión de grandes volúmenes de información.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

Las redes móviles actuales deben operar de forma simultánea con distintas generaciones (3G, 4G y 5G) para asegurar continuidad del servicio, soporte a diferentes tipos de dispositivos y casos de uso (rural, urbano, sitios especiales). En la práctica, esta situación de coexistencia tecnológica en la red lleva mucho tiempo siendo experimentada, con un monitoreo constante del desempeño, análisis de indicadores y toma de decisiones para mantener niveles adecuados de calidad de servicio en condiciones variables de tráfico, tipo de servicio, cobertura y movilidad. En este caso se suma el concepto de operadores en una infraestructura común, lo cual añade más complejidad a la red y es necesario comprender conceptos como Red de Acceso por Radio (RAN), *Core Network* y espectro radioeléctrico.

La Red de Acceso por Radio (RAN) es el componente que conecta al usuario con la red móvil a través del enlace radio, incluyendo estaciones base, antenas y funciones asociadas. Esta interfaz radio es la responsable de establecer la comunicación directa con los dispositivos móviles, utilizando recursos de espectro radioeléctrico asignados y gestionados de acuerdo con la tecnología de acceso empleada. El *Core Network* (núcleo de red) tiene las funciones de control y soporte de servicios, como el registro y autenticación de usuarios, la gestión de sesiones de datos, la movilidad y la aplicación de políticas de red, permitiendo que el usuario acceda a los servicios del operador de manera segura y continua [1]. Por su parte, el espectro radioeléctrico constituye un recurso limitado y fundamental, ya que es el medio a través del cual se transmiten las señales entre la RAN y los dispositivos móviles.

En el contexto de operación multioperador, la compartición de infraestructura y recursos se conoce como *Network Sharing*, un enfoque que permite a dos o más operadores coordinar y

gestionar de manera conjunta elementos de la red móvil para optimizar costos, acelerar despliegues y ampliar cobertura, sin que cada operador tenga que desplegar infraestructura duplicada. Dentro de este marco existen distintos modelos, como el *RAN Sharing*, que se refiere a la compartición de componentes activos de la RAN entre operadores, y configuraciones más específicas como *Multi-Operator RAN (MORAN)* y *Multi-Operator Core Network (MOCN)*, [2], [7].

En el esquema MORAN, los operadores comparten la infraestructura de la RAN, pero mantienen sus propias frecuencias de espectro y un control individual de los parámetros de radio. En contraste, en MOCN los operadores comparten no solo la infraestructura de acceso por radio, sino también los recursos de espectro, permitiendo una utilización más eficiente del espectro disponible [2], [7].

Desde la perspectiva del usuario final, estos mecanismos permiten que el dispositivo móvil se registre y opere como parte de una red individual, identificada por su operador correspondiente, aun cuando la infraestructura física y los recursos de acceso por radio sean compartidos. Esto posibilita una utilización más eficiente del espectro y de la infraestructura, a la vez que introduce retos adicionales en la planificación, monitoreo y optimización de la red, especialmente en lo relacionado con la gestión de interferencias, la asignación de recursos radio y el mantenimiento de niveles adecuados de calidad del servicio [4].

2.2 Marco conceptual

Red de Acceso por Radio (RAN): componente de la red móvil que establece y mantiene la comunicación inalámbrica entre los dispositivos del usuario y la red, mediante enlaces de radio y recursos de espectro, incluyendo estaciones base y equipos asociados [1].

Core Network (Núcleo de Red): parte central de la red móvil responsable de funciones como registro y autenticación de usuarios, gestión de sesiones de datos, y movilidad, que facilita la entrega de servicios de forma segura y eficiente [1], [3].

Espectro Radioeléctrico: Recurso físico limitado utilizado para la transmisión inalámbrica de señales entre la RAN y los dispositivos móviles, cuya administración y eficiencia son determinantes para la capacidad y calidad del servicio [4], [5].

Network Sharing: Esquema de operación en el cual dos o más operadores comparten infraestructura y/o recursos de red para optimizar costos, ampliar cobertura y mejorar la eficiencia del uso del espectro [2], [7].

RAN Sharing: modalidad de network sharing en la que los operadores comparten componentes de la Red de Acceso por Radio, manteniendo independencia operativa, lo que puede disminuir costos y tiempos de despliegue [2], [7].

MORAN (Multi-Operator Radio Access Network): modelo en el cual varios operadores comparten la infraestructura activa de la RAN pero mantienen el uso exclusivo de su propio espectro, permitiendo control individualizado de la red [2], [7].

MOCN (Multi-Operator Core Network): modelo de compartición en el que los operadores comparten tanto la infraestructura de la RAN como los recursos de espectro radioeléctrico, manteniendo núcleos de red independientes [2], [7].

Indicadores Clave de Desempeño (KPIs): métricas que cuantifican aspectos de desempeño de la red móvil, como accesibilidad, capacidad y calidad, que son esenciales para el análisis de tendencias y la optimización de redes [6].

Optimización de Redes Móviles (RNO): conjunto de procesos técnicos para analizar el comportamiento de la red mediante KPIs y aplicar acciones de mejora, con el objetivo de maximizar la eficiencia, calidad del servicio y la experiencia del usuario [6], [3].

Multioperador: escenario en el que dos o más operadores prestan servicios sobre infraestructura compartida, manteniendo el control lógico de sus respectivos servicios y usuarios [7].

Parametrización: proceso de configuración de parámetros técnicos en los elementos de red, que posibilita ajustar el comportamiento de la red para mejorar su desempeño [6].

2.3 Marco legal

El desarrollo, operación y optimización de redes móviles en Colombia se realiza en un marco normativo que regula aspectos como el uso del espectro radioeléctrico, la prestación de servicios de telecomunicaciones y la gestión de la infraestructura necesaria para garantizar calidad y cobertura. Este marco legal constituye un soporte fundamental para las actividades analizadas en este trabajo, sostenidas en la normatividad nacional e internacional que regula el sector de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC).

La Ley 1341 de 2009 establece los principios generales para la organización del sector de las TIC en Colombia y define el espectro radioeléctrico como un recurso limitado, administrado por el Estado, cuyo uso eficiente es necesario para asegurar la prestación de servicios de telecomunicaciones, la competencia, la protección al usuario y la calidad del servicio. Esta ley contempla la planeación, gestión, administración, regulación, control y vigilancia del espectro radioeléctrico y de las redes que lo utilizan, orientado al acceso universal sin discriminación ni barreras injustificadas para los usuarios [8].

Como parte del mandato de la Ley 1341 de 2009, el uso del espectro radioeléctrico requiere de un permiso previo, expreso y otorgado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) para su explotación por parte de proveedores de redes y servicios de telecomunicaciones, lo cual está regulado por actos administrativos específicos basados en los procedimientos establecidos en esta norma [8].

La Ley 1978 de 2019 introduce modificaciones a la Ley 1341 de 2009 con el propósito de modernizar el marco institucional del sector TIC, simplificar su regulación, incentivar la inversión en infraestructura y aumentar la certidumbre jurídica de los agentes del sector. Esta ley consolida competencias del Estado y de las entidades reguladoras y promueve la eficiencia y transparencia en la gestión del espectro, así como la igualdad de oportunidades para el acceso a los recursos radioeléctricos, lo cual incide directamente en la operación de redes móviles y en las condiciones para optimización y compartición de infraestructura [9].

La Agencia Nacional del Espectro (ANE), creada en desarrollo de la Ley 1341 y sus decretos reglamentarios, es la entidad encargada de la gestión técnica y administrativa del espectro radioeléctrico en Colombia, con competencias que incluyen la planeación, atribución, control, vigilancia y administración del espectro, así como la elaboración y actualización del Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF), instrumento técnico que define la distribución y uso de las bandas de frecuencia del espectro en el país [8].

La Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) complementa este marco como la entidad responsable de regular los mercados de comunicaciones y establecer condiciones equitativas para el despliegue y operación de redes de telecomunicaciones, en concordancia con los principios de competencia y protección al usuario determinados en las leyes TIC. La CRC emite normas relacionadas con el despliegue de infraestructura y servicios, aunque la competencia

sobre aspectos técnicos como la atribución del espectro sigue siendo asignada a ANE y MinTIC conforme a la ley [8], [9].

En el ámbito internacional, Colombia armoniza su legislación con recomendaciones de organismos como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), que establece lineamientos técnicos y políticas para el uso eficiente y equitativo del espectro radioeléctrico y promueve estándares globales en materia de redes de telecomunicaciones. Estas recomendaciones son consideradas en la definición de políticas y regulaciones nacionales para asegurar compatibilidad técnica con tendencias internacionales y facilitar el desarrollo tecnológico del país [4].

3. Método

3.1 Validación y justificación de reportes de Drive Test 5G

- *Entrenamiento inicial:* se realizó una inducción técnica orientada a la comprensión de los procesos de validación y análisis de reportes de Drive Test en sitios 5G, así como al uso de las herramientas empleadas para el seguimiento del desempeño de la red.
- *Recolección de información:* se recopiló la información asociada a los reportes de Drive Test de sitios 5G cuyos trabajos de implementación habían sido finalizados por el equipo de despliegue, incluyendo resultados de pruebas y datos provenientes de diferentes fuentes internas.
- *Validación de reportes:* se validaron los reportes de Drive Test verificando el cumplimiento de los umbrales definidos y el comportamiento esperado de la red 5G.

- *Clasificación y análisis de incidencias:* los hallazgos fueron clasificados según su naturaleza (throughput, ruta y addition). Se realizó el análisis de la tendencia de usuarios y throughput considerando el tipo de antena, la evaluación de conectividad a lo largo de las rutas de Drive Test y el análisis de interfaces X2 y de la capa de transporte (TX), identificando razones de rechazo y posibles afectaciones con herramientas especializadas de Huawei Technologies Co., Ltd.
- *Actualización de trackers y documentación:* con base en los análisis realizados, se actualizaron los trackers de estado de los sitios 5G y se consolidaron reportes técnicos orientados al cliente, incluyendo información gráfica y mapas de apoyo.

3.2 Análisis de desempeño de la red y procesamiento de datos

- *Análisis de KPIs:* se realizó el análisis de indicadores clave de desempeño (KPIs) en tecnologías UMTS, LTE y NR, evaluando el funcionamiento de las estaciones en términos de cobertura, accesibilidad, tráfico, movilidad, retención e integridad de la red.
- *Consultas y procesamiento de datos:* para apoyar el análisis del desempeño de la red, se realizaron consultas a bases de datos mediante lenguaje SQL, permitiendo la obtención de grandes volúmenes de información asociados a KPIs y eventos de red. Posteriormente, los datos fueron procesados y analizados utilizando Python, facilitando el manejo, filtrado y análisis de información de manera eficiente.
- *Seguimiento y coordinación técnica:* se efectuó el seguimiento de sitios reportados con fallas, trabajando de manera conjunta con otros equipos técnicos para apoyar la identificación de causas y la definición de acciones correctivas.

- *Propuestas de optimización y expansión:* con base en los análisis realizados, se formularon propuestas de optimización de cobertura para sitios con condiciones de overshooting mediante ajustes de tilt eléctrico, así como propuestas de expansión de capacidad para sitios con alto uso de recursos de radio (PRB), considerando el balance entre bandas existentes.

3.3 Elaboración de reportes y seguimiento con el cliente

- *Consolidación de información:* se centralizó la información del estado de los sitios a partir de diferentes fuentes internas, integrando reportes de implementación, análisis del equipo local y aportes del equipo de soporte.
- *Generación de reportes periódicos:* se elaboraron reportes semanales que incluían el estado de los proyectos, avances relevantes y gráficos de resumen general, tanto de carácter semanal como histórico.
- *Seguimiento y actualización con el cliente:* se realizó la actualización periódica del estado de los sitios con el cliente, incorporando gráficas e información relevante de acuerdo con los requerimientos y las actividades en curso.

3.4 Configuración avanzada y parametrización de la red

- *Creación de baselines para sitios 5G:* se llevó a cabo la creación de baselines para sitios 5G, validando que la configuración inicial cumpliera con los parámetros técnicos definidos para su correcta operación. Estos baselines permitieron establecer un punto de referencia para el análisis posterior del desempeño de la red.
- *Parametrización especial en red 3G por implementación MOCN:* se participó en la generación de tickets de mejora para la red 3G asociados a la implementación

del esquema MOCN, trabajando sobre diferentes parámetros técnicos con el fin de adaptar la red a la operación multioperador y asegurar su correcto funcionamiento.

- *Creación de relaciones 5G–4G mediante automatización:* se desarrollaron procesos de automatización utilizando Python para la creación de relaciones entre celdas 5G y 4G, con el objetivo de garantizar la continuidad de la cobertura y una adecuada experiencia de usuario mediante anclajes eficientes entre tecnologías.

4. Resultados

4.1 Generación de informes 5G orientados al cliente

A partir del proceso de validación de los reportes de Drive Test en sitios 5G, se obtuvieron resultados que permitieron identificar y caracterizar diferentes afectaciones en el desempeño de la red, tanto a nivel radioeléctrico como en la capa de transporte. El análisis se apoyó en la revisión de archivos técnicos, reportes de desempeño y visualizaciones gráficas, los cuales se encuentran ilustrados en las Figuras 1 a 4.

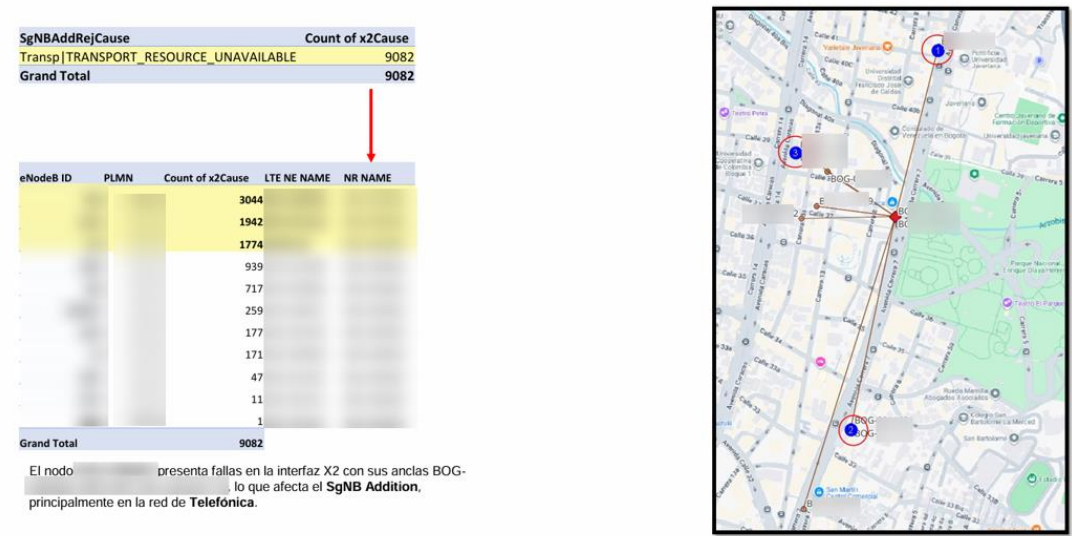
Durante la validación se identificaron sitios que cumplían con los umbrales definidos y que pudieron ser considerados aptos para su entrega al cliente. Sin embargo, también se detectaron escenarios con degradaciones en valores de throughput, *addition* y cobertura, los cuales requirieron un análisis técnico detallado para su justificación. En estos casos, el análisis permitió identificar problemas asociados a interfaces X2 y a la capa de transporte (TX), así como dependencias de anclas 4G y distribución de celdas vecinas, elementos que explicaron el comportamiento observado durante los recorridos de Drive Test.

Figura 1. Se generan y organizan archivos de soporte utilizados para la validación y justificación de los reportes de Drive Test 5G.

	Acceptance_Delivery_...	11/6/2025 5:06 PM	Microsoft Edge PD...	1,629 KB
	SgNBAddRejectAnaly...	11/6/2025 3:12 PM	Microsoft Excel Co...	3,775 KB
	5G_RAWDATA	10/27/2025 5:40 PM	Microsoft Excel Co...	15,670 KB
	Cluster Report_NRBO...	10/27/2025 11:44 AM	Microsoft Excel W...	9,850 KB
	Cluster Report_NRBO...	10/27/2025 8:56 AM	Microsoft Excel W...	9,589 KB

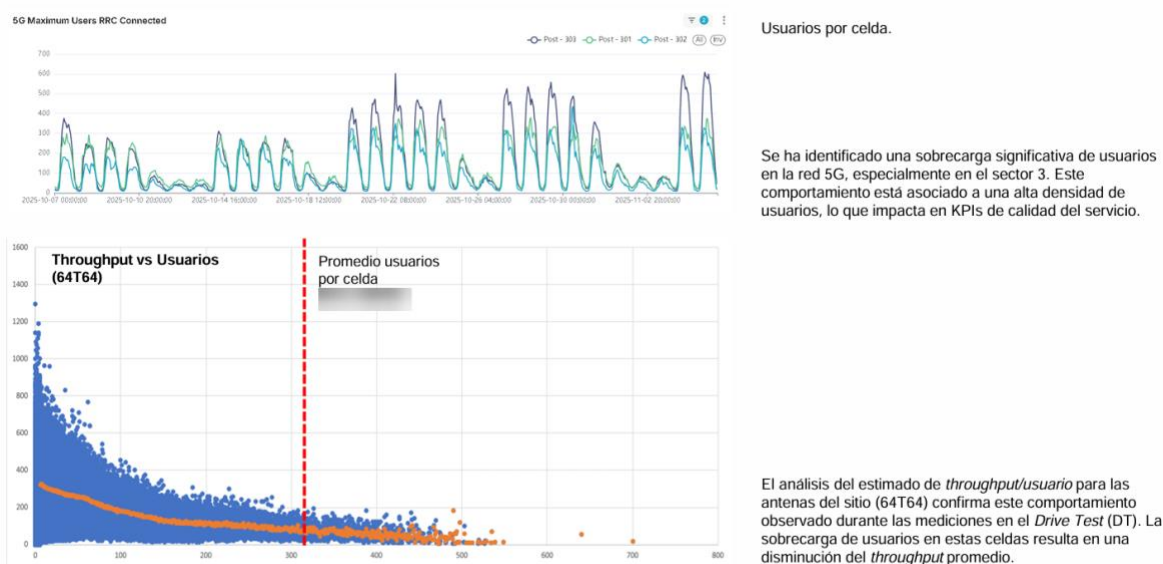
Nota: para el envío de cada reporte se obtenían cuatro documentos principales, los *Drive Test* por cada operador (dos en total), el reporte con el resumen de KPIs orientado al cliente y la *RAW Data* usada para la creación del reporte.

Figura 2. Análisis técnico para sitios con bajo addition por operador.



Nota: análisis técnico realizado para sitios con *SgNB Addition* por debajo del umbral y con fallas persistentes en interfaces X2. El análisis se llevó a cabo por operador, permitiendo identificar información relevante de las estaciones base asociada a las fallas presentadas. Para la elaboración del informe se emplearon herramientas de análisis y visualización de red. Elaboración propia.

Figura 3. Análisis técnico para sitios con bajo throughput.



Nota: análisis técnico realizado para sitios con *throughput* por debajo del umbral establecido según el tipo de antena 5G implementada. El análisis se llevó a cabo por operador, evaluando la relación entre la cantidad de usuarios por sector y el *throughput* esperado. Elaboración propia.

Figura 4. Reporte de recorrido DT 5G y análisis técnico para sitios con baja cobertura.



Nota: análisis técnico realizado para sitios con baja cantidad de muestras en los resultados de Drive Test por PCI. El análisis se llevó a cabo por operador, evaluando las muestras de conexión 4G en zonas sin registros 5G, debido a que el sitio no cuenta con señal GPS y, por lo tanto, no puede prestar cobertura 5G de forma directa. En este escenario, la prestación del servicio 5G depende del establecimiento de relaciones con sitios 4G configurados como anclas, mediante interfaces entre estaciones, permitiendo la habilitación del servicio 5G. Elaboración propia.

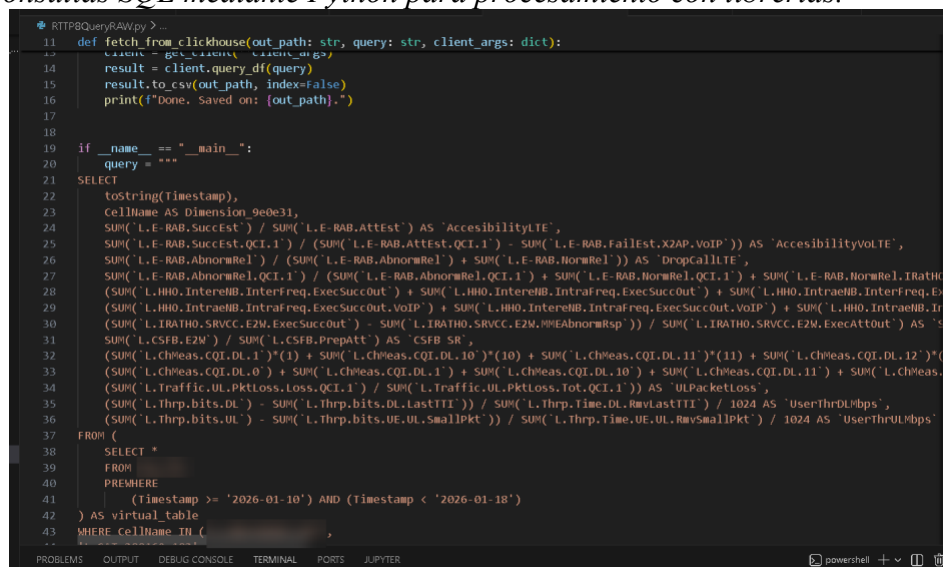
4.2 Resultados del análisis de KPIs

El análisis de indicadores clave de desempeño (KPIs) en tecnologías UMTS, LTE y NR permitió evaluar el comportamiento de la red móvil en diferentes escenarios operativos y regionales. Este análisis se realizó a partir de grandes volúmenes de información obtenidos de bases de datos mediante consultas SQL y procesados posteriormente con Python, lo cual facilitó el tratamiento, filtrado y agrupación de los datos.

En particular, el análisis permitió detectar sitios con alto uso de recursos de radio, reflejado en indicadores como la ocupación de PRB, lo cual evidenció escenarios de congestión y la necesidad de acciones de balanceo o expansión de capacidad. Asimismo, se identificaron degradaciones en indicadores de accesibilidad y retención en determinados sitios, asociadas a condiciones de cobertura, interferencia o configuración.

Los resultados obtenidos fueron consolidados en tablas y representaciones gráficas, utilizadas como insumo para la elaboración de reportes técnicos y para el seguimiento del estado de la red con los equipos internos y el cliente.

Figura 5. Consultas SQL mediante Python para procesamiento con librerías.



```

RTTPBQueryRAW.py > ...
11 def fetch_from_clickhouse(out_path: str, query: str, client_args: dict):
12     client = get_clickhouse_client(client_args)
13     result = client.query_df(query)
14     result.to_csv(out_path, index=False)
15     print(f'Done. Saved on: {out_path}.')
16
17
18
19 if __name__ == "__main__":
20     query = """
21     SELECT
22         toString(Timestamp),
23         CellName AS Dimension_9e0e31,
24         SUM('L.E-RAB,SuccEst') / SUM('L.E-RAB,Attest') AS 'AccessabilityLTE',
25         SUM('L.E-RAB,SuccEst,QCI,1') / (SUM('L.E-RAB,Attest,QCI,1') - SUM('L.E-RAB,FailEst,XZAP,VoIP')) AS 'AccessabilityVoLTE',
26         SUM('L.E-RAB,AbnormRel') / (SUM('L.E-RAB,AbnormRel') + SUM('L.E-RAB,NormalRel')) AS 'DropCallLTE',
27         SUM('L.E-RAB,AbnormRel,QCI,1') / (SUM('L.E-RAB,AbnormRel,QCI,1') + SUM('L.E-RAB,NormalRel,QCI,1')) + SUM('L.E-RAB,NormalRel,IRATHC')
28         (SUM('L.HHO,InterNB,InterFreq,ExecSuccOut') + SUM('L.HHO,InterNB,InterFreq,ExecSuccOut') + SUM('L.HHO,InterNB,InterFreq,ExecSuccOut,VoIP'))
29         (SUM('L.HHO,InterNB,InterFreq,ExecSuccOut,VoIP') + SUM('L.HHO,InterNB,InterFreq,ExecSuccOut,VoIP')) + SUM('L.HHO,InterNB,InterFreq,ExecSuccOut,VoIP')
30         (SUM('L.IRATHO,SRVCC,E2M,ExecSuccOut') - SUM('L.IRATHO,SRVCC,E2M,MMEAbnormRsp')) / SUM('L.IRATHO,SRVCC,E2M,ExecAttOut') AS 'S
31         SUM('L.CSFB,E2M') / SUM('L.CSFB,PrepAtt') AS 'CSFB SR',
32         (SUM('L.ChMeas,CQI,DL,1')*(1) + SUM('L.ChMeas,CQI,DL,10')*(10) + SUM('L.ChMeas,CQI,DL,11')*(11) + SUM('L.ChMeas,CQI,DL,12')*(12) +
33         SUM('L.ChMeas,CQI,DL,0') + SUM('L.ChMeas,CQI,DL,1') + SUM('L.ChMeas,CQI,DL,10') + SUM('L.ChMeas,CQI,DL,11') + SUM('L.ChMeas,CQI,DL,12'))
34         (SUM('L.Traffic,UL,PktLoss,Loss,QCI,1') / SUM('L.Traffic,UL,PktLoss,Tot,QCI,1')) AS 'ULPacketLoss',
35         (SUM('L.Thrp,Bits,DL') - SUM('L.Thrp,Bits,DL,LastTTI')) / SUM('L.Thrp,Time,DL,RmvLastTTI') / 1024 AS 'UserThrdLMbps',
36         (SUM('L.Thrp,Bits,UL') - SUM('L.Thrp,Bits,UL,SmallPkt')) / SUM('L.Thrp,Time,UL,RmvSmallPkt') / 1024 AS 'UserThrdUMbps'
37     FROM (
38         SELECT *
39         FROM
40         PREWHERE
41         (Timestamp >= '2026-01-10') AND (Timestamp < '2026-01-15')
42     ) AS virtual_table
43     WHERE CellName IN (

```

Figura 6. *Sugerencia de expansiones de bandas a sitios por Azimuth para bajar alta congestión.*

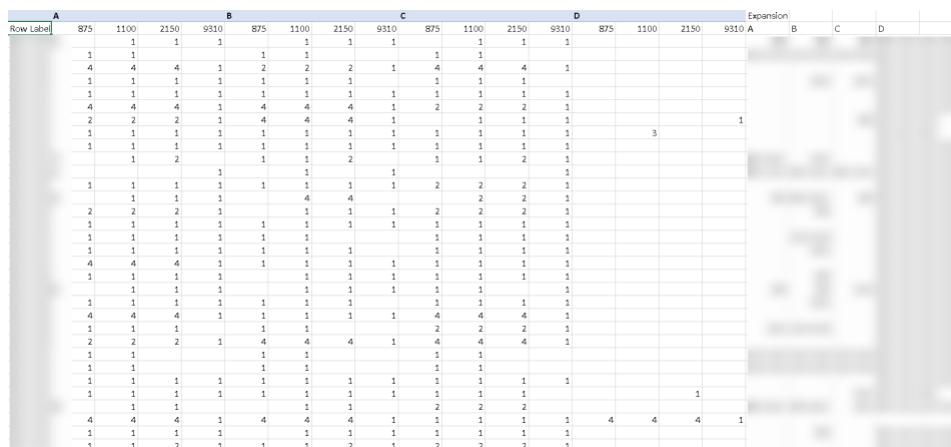
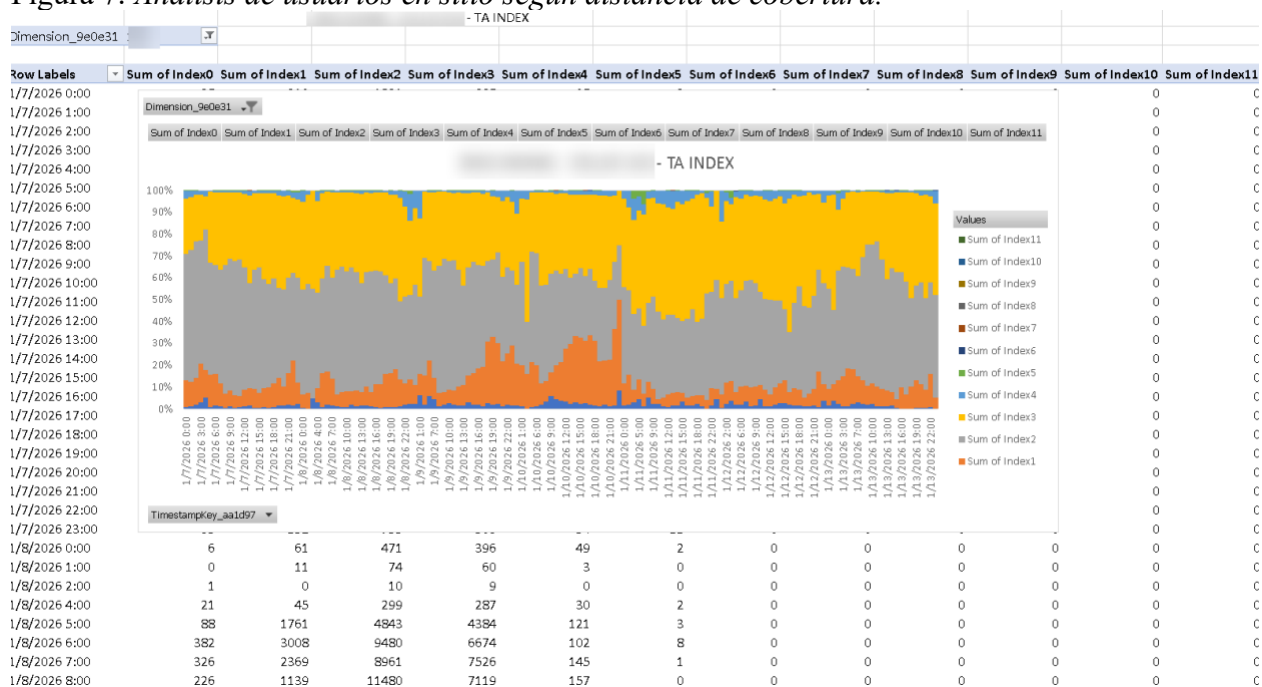


Figura 7. *Análisis de usuarios en sitio según distancia de cobertura.*



Nota: análisis técnico del porcentaje de usuarios por celda según índices de cobertura, con el fin de identificar aquellas celdas que concentran un alto porcentaje de usuarios ubicados a mayor

distancia (índice 5 en adelante), los cuales pueden generar degradaciones en los indicadores clave de desempeño (KPIs). Elaboración propia.

4.3 Resultados de configuración y automatización de la red

Las actividades de configuración avanzada y automatización realizadas durante la práctica permitieron apoyar la implementación y optimización de la red móvil. Los resultados obtenidos evidencian el impacto del uso de herramientas de automatización y estandarización en la gestión de la red.

En relación con la creación de interfaces entre celdas 4G a 5G, se logró automatizar las relaciones en dos situaciones, cuando faltaba la relación consigo mismo y cuando faltaba relación con celdas vecinas, esto bajo el enfoque MOCN aplicado a 5G que une a los dos operadores en dicha red. En el caso de relaciones entre celdas 4G y 5G pertenecientes al mismo sitio, se generaron 272 relaciones, a partir de la ejecución de 1.360 scripts. Adicionalmente, se establecieron 5.854 relaciones entre celdas 4G ancla y celdas 5G de vecindades, mediante la ejecución de 29.270 scripts, lo cual permitió cubrir escenarios más amplios de movilidad y acceso a la red 5G.

Por otra parte, se realizó la creación de baselines para sitios 5G, obteniendo un total de 84 baselines, los cuales sirvieron como referencia para validar la correcta configuración inicial de los sitios y facilitar el análisis posterior de su desempeño. Estos baselines contribuyeron a estandarizar la configuración de la red y a detectar posibles desviaciones de manera más eficiente.

Adicionalmente, se participó en el apoyo a la implementación de mejoras en la red 3G asociadas a la operación bajo esquema MOCN, mediante la gestión de solicitudes de cambio (*Request for Change – RFC*) relacionadas con la activación de funcionalidades específicas (*features*). En este contexto, se brindó soporte directo a dos regionales, en las cuales se aplicaron

ocho funcionalidades orientadas a mejorar el comportamiento y la estabilidad de la red 3G en un entorno de operación compartida.

Figura 8. *Segmento del código del Análisis de relaciones.*

```
cell=pd.concat(
    [cargar_y_preparar(archivo,hojas[0]) for archivo in archivos], ignore_index=True
)
nrnext=pd.concat(
    [cargar_y_preparar(archivo,hojas[1]) for archivo in archivos], ignore_index=True
)
nrnrel=pd.concat(
    [cargar_y_preparar(archivo,hojas[2]) for archivo in archivos], ignore_index=True
)
nrnfreq=pd.concat(
    [cargar_y_preparar(archivo,hojas[3]) for archivo in archivos], ignore_index=True
)

datos_5g = pd.read_csv(os.path.join(carpeta,'./5g/NRRReport.csv'))

datos_5gfilt = datos_5g[datos_5g.iloc[:,3].isin(nrnrel.iloc[:,4])]
nrnrelfil= nrnrel[nrnrel.iloc[:,4].isin(datos_5gfilt.iloc[:,3])]
cellfil = cell[cell.iloc[:,0].isin(nrnrelfil.iloc[:,0])]
mask= datos_5g.iloc[:,4].apply(lambda x: cellfil.iloc[:,3].str.contains(x,na=False).any())
rell=datos_5gfilt[mask]
cellfil = cell[cellfil.iloc[:,0].isin(nrnrelfil.iloc[:,0])]
id2_esperados = [301, 302, 303]

combinaciones = cellfil.assign(key=1).merge(
    pd.DataFrame({"ID2": id2_esperados, "key": 1}),
    on="key"
```

Nota: segmento de código desarrollado en Python para la identificación de relaciones faltantes entre celdas 4G y 5G en la red. El código implementa estructuras y reglas lógicas para detectar dichas relaciones y generar scripts de configuración de forma masiva, orientados a su posterior ejecución en la red. Elaboración propia.

Figura 9. *Verificación de usuarios 5G conectados por operador, luego de ejecución de baseline.*

Display NR Cell UE Access Statistics									
NR Cell ID	Cell Name	MO-Signal RRC Number	MO-Data RRC Number	MT-Access RRC Number	Other RRC Number	Total RRC Number	VoNR UE Number	CA UE Number	
301	N_	0	0	0	74	74	0	0	
302	N_	0	0	0	56	56	0	0	
303	N_	0	0	0	52	52	0	0	
(Number of results = 3)									
Display NR Cell Operator UE Access Statistics									
NR Cell ID	Operator ID	Cell Name	Operator Name	MO-Signal RRC Number	MO-Data RRC Number	MT-Access RRC Number	Other RRC Number	Total RRC Number	Vo
301	0	N_	301 Tigo	0	0	0	34	34	0
301	1	N_	301 Telefonica	0	0	0	40	40	0
302	0	N_	302 Tigo	0	0	0	26	26	0
302	1	N_	302 Telefonica	0	0	0	30	30	0
303	0	N_	303 Tigo	0	0	0	27	27	0
303	1	N_	303 Telefonica	0	0	0	25	25	0
(Number of results = 6)									
--- END									

Nota: verificación en el gestor de red de usuarios 5G conectados por operador, realizada posterior a la ejecución del *baseline*. La validación confirma la correcta aplicación de los scripts de configuración necesarios para habilitar la cobertura 5G en el sitio. Elaboración propia.

Figura 10. *Parametrización de features – Generación de Scripts.*

Level	MO	Condition	Parameter	Principle
RNC	URRCTRLSWITCH	PROCESSSWITCH4	RRC_CONN_SETUP_OPT_SWITCH	This switch is used for opti
RNC	USTATETIMER		RrcUeRapTmr	The timer for waiting for U
RNC	USTATETIMER		RrcUeRapTmrOffset	Offset of the timer for wai
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch2	RRC_CON_REQ_TIMES_COMPATIBLE_SWITCH	Whether the RNC keeps th
RNC	URNCIMEPARA		INTERINCRRCOPTCNOHLD	During the RRC connection
RNC	URRCTRLSWITCH	PROCESSSWITCH6	RRC_SETUP_DSCR_OPT_SWITCH	This parameter controls w
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch1	CELL_RRC_REPEAT_REQ_CNT_CORRECT_SW	Condition:Scenario 1:The
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch8	F2D_RBSETUP_CU_OVERLAP_OPT_SWITCH	When the switch for opti
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch1	SIG_SECU_CU_CROSS_SWITCH	This switch is used to dete
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch1	L3_ENHANCE_RECFG_OPT_SWITCH	Whether the RNC can corr
RNC	URRCTRLSWITCH	PROCESSSWITCH2	CU_OVERLAP_DSCR_SWITCH	1: This switch is turned on
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch2	RB_CU_CROSS_COMPATIBLE_SWITCH	in the CELL_FACH state, if
RNC	UULTRAFASTCSACCESS		SecModParallelSwitch	WRRD-171202 Ultra-Fast
RNC	UULTRAFASTCSACCESS		AlertingParallelSwitch	WRRD-171202 Ultra-Fast
RNC	UULTRAFASTCSACCESS		IntPagingParallelSwitch	This parameter is used to
RNC	UULTRAFASTCSACCESS	OptimizationSwitch	PAGING_PARALLEL_OPT_SWITCH	This parameter specifies w
RNC	USBRATECOVSEL		SrbRateForUENoEcNo	Meaning: This parameter i
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch7	RAB_SETUP_ATT_R99_CNT_CORRECT_SWITCH	When the RAB setup and
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch8	RLREEST_RAB_SETUPFAIL_CNT_FIX_SWITCH	This switch is used to contr
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch5	RAB_MOD_IUPS_ADMINIFAIL_GTPU_REEST_SWIT	Whether to perform GTP-U
RNC	URRCTRLSWITCH	PROCESSSWITCH5	WBAMR_HHO_FAIL_ROLLBACK_SWITCH	WBAMR_HHO_FAIL_ROLLB
RNC	URRCTRLSWITCH	PROCESSSWITCH3	CUIC_CMP_NO_ACTIVE_CFN_SWITCH	Cell Update Confirmation
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch6	CMP_NO_ACTIVE_CFN_OPT_SWITCH	Whether garbled voice det
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch4	AMRC_ON_122_AMR_HHO_ROLL_BACK_SWITCH	AMRC_ON_122_AMR_HHO
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch6	CODE_CONFLICT_RL_REEST_SWITCH	When the NodeB detects t
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch1	N302_PROCESS_OPT_SWITCH	When this switch is turned
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch3	DZF_PROCEDURE_OPTIMIZATION_SWITCH	This switch is used to contr
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch3	DZF_AM_PROCEDURE_OPTIMIZATION_SWITCH	This parameter controls w
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch5	D2P_TWO_SIDE_RLC_REEST_SWITCH	Indicates whether to enabl
RNC	URRCTRLSWITCH	PROCESSSWITCH2	RNC_FD_SCRIP_FORCE_REL_SWITCH	1: This switch is turned on
RNC	URRCTRLSWITCH	OptimizationSwitch6	PS_DSCR_IU_REL_COMPATIBLE_SWITCH	This parameter controls w

Nota: parametrización de *features* para la optimización de la red 3G, mediante la generación de scripts de configuración para su ejecución por regional, de acuerdo con los parámetros técnicos solicitados. Elaboración propia.

5. Conclusiones

En conclusión, mis prácticas profesionales en Huawei Technologies Co., Ltd. Han sido una experiencia fundamental que permitió apoyar de manera efectiva los procesos de análisis y optimización del desempeño de la red móvil en tecnologías UMTS (3G), LTE (4G) y NR (5G), en un entorno real de operación multioperador.

La validación y justificación de reportes de Drive Test 5G permitió identificar afectaciones relacionadas con throughput, cobertura y procesos de *addition*, así como problemas asociados a interfaces X2 y a la capa de transporte (TX). El análisis técnico realizado, apoyado en visualizaciones gráficas y mapas (Figuras 1 a 4), facilitó la sustentación de los resultados presentados al cliente y el seguimiento de los sitios analizados. El análisis de indicadores clave de desempeño (KPIs) en las diferentes tecnologías permitió identificar patrones de comportamiento, tendencias de tráfico, evidenciando escenarios de congestión, degradaciones en accesibilidad y

oportunidades de optimización. El uso de consultas SQL y procesamiento de datos con Python facilitó el manejo de grandes volúmenes de información y permitió realizar acciones de optimización. La aplicación de procesos de automatización y configuración avanzada contribuyó a la estandarización y eficiencia de la red.

Los resultados obtenidos demuestran que la integración de análisis técnico, automatización y seguimiento continuo permite mejorar la consistencia de la operación de la red y fortalecer la toma de decisiones técnicas en proyectos de optimización. Estas contribuciones son relevantes en el contexto nacional, al apoyar la operación y modernización de redes móviles en Colombia.

Referencias

[1] 3GPP, “*TS 23.501: System Architecture for the 5G System (5GS)*,” Release 17, 2025. [Online].

Available:

https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.501/

[2] 3GPP, “*TS 23.251: Network Sharing; Architecture and Functional Description*,” Release 6,

2025.

[Online].

Available:

https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.251/

[3] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M. K. Marina, “Network slicing in 5G: Survey and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 94–100, May 2017. [Online].

Available:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7931566>

[4] ITU-R, *Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface(s)*, Report ITU-R M.2410-0, Nov. 2017. [Online]. Available:

<https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410>

[5] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. Zhang, “What will 5G be?,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–

1082,

Jun.

2014.

[Online].

Available:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/6824752>

[6] A. Khan, M. Shafiq, and S. Baharun, "Performance analysis and optimization of mobile networks using key performance indicators," *IEEE Access*, vol. 9, 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/>

[7] GSMA, *Infrastructure Sharing: Background and Insights on Mobile Network Infrastructure Sharing*, 2019. [Online]. Available: https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/gsma_resources/infrastructure-sharing-an-overview/

[8] Congreso de la República de Colombia, *Ley 1341 de 2009: Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC)*, 2009. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=36913>

[9] Congreso de la República de Colombia, *Ley 1978 de 2019: Por la cual se moderniza el sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC)*, 2019. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=98210>