Análisis de los desafíos y consideraciones técnicas para la planificación del backhaul de redes móviles 5G en entornos patrimoniales, con énfasis en el Centro Histórico de Quito.

Ortiz Muñoz Marlon Jahir

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Telecomunicaciones

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de

Ingeniero en Telecomunicaciones

Ing. Pérez Herrera Nelson Santiago

24 de julio del 2026

Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

MarlonOrtiz_AvancesTesisvf
ID : e9ba1d6f2868bae001175ffa8acb92ac23a87e86

7%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : MarlonOrtiz_AvancesTesisvf.txt
Tamaño del archivo original : 18,66 MB
Número de palabras : 23.730

Depositante : NELSON SANTIAGO PEREZ HERRERA
Fecha de depósito : 24 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 24 de julio de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes 1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA 11%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos 6%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas 3%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

Fuentes de similitudes (sección 2/2)

Similitudes

1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.

Fuente principal detectada

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones
1	ITU-R WP5D: Guidelines for evaluation of radio interface... techblog.comsoc.org/2017/11/20/itu-r-wp5d-guidelines-for-evaluation-of-r...	<1%	
2	Desarrollo de un Simulador Parametrizable de 5G-New Radio basa... novasinergia.unach.edu.ec/index.php/novasinergia/article/view/343	<1%	
3	Documento de otro usuario #724c82 Viene de de otro grupo	<1%	
5	Documento de otro usuario #b30dad Viene de de otro grupo	<1%	
7	Edge Computing: Aplicaciones y desafíos actuales portal.amelica.org/ameli/journal/225/2252998009/html/	<1%	
8	A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G:... link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11276-015-0942-z.pdf	<1%	

Fuente mencionada (sin similitudes detectadas)

N°	Descripciones
1	https://editorial.ucsg.edu.ec/
2	https://www.3gpp.org/
3	https://ieeexplore.ieee.org/document/6824752
4	https://doi.org/10.18601/01234366.n40.03
5	https://ieeexplore.ieee.org/document/6897914
6	https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-...
7	https://ieeexplore.ieee.org/document/1622772
8	https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/r-rec-m.2083-0-201509-i!!pdf-e.pdf
9	https://www.mdpi.com/2571-9408/6/12/393

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
NELSON SANTIAGO PEREZ HERRERA

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Telecomunicaciones

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Análisis de los desafíos y consideraciones técnicas para la planificación del backhaul de redes móviles 5G en entornos patrimoniales, con énfasis en el Centro Histórico de Quito"** fue realizado por el señor **Ortiz Muñoz Marlon Jahir,** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; habiéndose efectuado una revisión integral de forma y de fondo conforme a los lineamientos y formatos institucionales vigentes. Además, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 24 de julio del 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
NELSON SANTIAGO PEREZ HERRERA

Ing. Pérez Herrera Nelson Santiago

Director/a

C.C.: 1720801529

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Telecomunicaciones

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Ortiz Muñoz Marlon Jahir**, con cédula de ciudadanía n° 1727261768, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular**: "Análisis de los desafíos y consideraciones técnicas para la planificación del backhaul de redes móviles 5G en entornos patrimoniales, con énfasis en el Centro Histórico de Quito"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 24 de julio del 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MARLON JAHIR ORTIZ MUÑOZ

Ortiz Muñoz Marlon Jahir

C.C.: 1727261768

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Telecomunicaciones

Autorización de Publicación

Yo **Ortiz Muñoz Marlon Jahir**, con cédula de ciudadanía n° 1727261768, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **"Análisis de los desafíos y consideraciones técnicas para la planificación del backhaul de redes móviles 5G en entornos patrimoniales, con énfasis en el Centro Histórico de Quito"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 24 de julio del 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MARLON JAHIR ORTIZ MUÑOZ

Ortiz Muñoz Marlon Jahir

C.C.: 1727261768

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para afrontar cada reto presentado a lo largo de esta etapa académica.

A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios y el apoyo constante que me han brindado durante toda mi formación. Gracias por creer en mí, motivarme a seguir adelante y enseñarme que el esfuerzo y la perseverancia son el camino para alcanzar las metas.

A mi familia, por estar presente en cada momento importante, por sus palabras de aliento y por convertirse en un pilar fundamental durante este proceso.

Con mucho cariño, dedico este trabajo a quienes han sido parte fundamental de mi vida y de mi crecimiento personal y profesional.

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y a la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, por brindarme la formación académica y profesional que hizo posible el desarrollo de este trabajo.

A mi director de tesis, por su orientación, paciencia y valiosos conocimientos compartidos durante el desarrollo de esta investigación. Sus observaciones y recomendaciones fueron fundamentales para fortalecer la calidad de este trabajo.

A mis padres y a mi familia, por su apoyo incondicional, confianza y motivación constante durante toda mi carrera universitaria.

A mis amigos y compañeros, por compartir conmigo esta etapa llena de retos, aprendizajes y experiencias inolvidables. Gracias por el compañerismo, las largas jornadas de estudio, las palabras de ánimo y por hacer que este camino fuera mucho más llevadero.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de este trabajo y al cumplimiento de una de las metas más importantes de mi vida.

Índice General

Dedicatoria 7
Agradecimiento 8
Índice General 9
Resumen 16
Abstract 17
Capítulo I 17
Introducción 17
Alcance 18
Objetivo general 18
Objetivos específicos 18
Justificación 19
Capítulo II 20
Estado del arte 20
Marco Teórico 24
Evolución de las redes móviles y fundamentos de 5G 24
Arquitectura de la red 5G 25
Red de acceso radioeléctrico (RAN) 26
Red de transporte 27
Red núcleo (Core Network) 28
Principales características de 5G 28
RAN 5G y su Relación con la Red de Transporte 30
Arquitectura de la RAN en 5G 30
Macroceldas y small cells 31
Densificación de la red de acceso 33
Red de Transporte en 5G 34

Definición y función del backhaul 35
Segmentos de una red en 5G 36
Requerimientos del transporte en redes 5G 38
Tecnologías de transporte 40
Normativa patrimonial y restricciones de despliegue en el marco legal 42
Restricciones de despliegue en el marco técnico 42
Tipología constructiva y densidad de edificios 43
Materiales de construcción patrimoniales y su impacto en la propagación 44
Fundamentos de la propagación radioeléctrica en entornos urbanos 46
Modelos empíricos de propagación 47
Modelo Close-In (CI) 49
Atenuación por materiales de construcción patrimoniales 51
Pérdidas equivalentes por fachada y penetración en edificios 53
Simulación a nivel de sistema 54
Capítulo III 55
Metodología de simulación 55
Descripción del escenario de estudio 55
Rasterización del entorno urbano 58
Representación 2.5D del entorno urbano 59
Modelado de Macrocelda 61
Modelo de propagación y bloqueo por edificaciones 62
Modelado de Small cell 64
Modelado de pérdidas por muros y fachadas 65
Justificación y calibración de los parámetros de pérdida equivalente 67
Modelado de interferencia y cálculo de SINR 68
Estimación de capacidad y throughput 69
Criterios para evaluación de requerimiento de backhaul 72

Capítulo IV 73
Simulación 73
Escenario base, cobertura y capacidad con macrocelda 73
Representación del entorno urbano 73
Mapa de potencia recibida (CI + bloqueo por edificaciones) 74
Selección de puntos estratégicos de evaluación 76
Validación en sitio del despliegue propuesto 84
Correspondencia entre modelo digital y entorno real 85
Mapa de potencia servidora 90
Mapa de SINR con interferencia real 92
Mapa de Throughput y métricas globales 93
Análisis comparativo en puntos estratégicos (Macro vs. Macro + SC) 95
Análisis de sensibilidad al número de small cells 97
Capítulo V 99
Análisis de Capacidad y Dimensionamiento del Backhaul 99
Área servida por cada small cell 99
Distribución de throughput por small cell 100
Estimación de requerimientos de backhaul 102
Discusión del dimensionamiento y viabilidad del backhaul 103
Fibra óptica 103
Enlaces de microondas 104
Enlaces en bandas milimétricas (mmWave) 105
Síntesis del análisis de backhaul para el escenario estudiado 106
Evidencia de infraestructura existente en el entorno de estudio 107
Capítulo V 111
Conclusiones y recomendaciones 111
Conclusiones 111

Recomendaciones para trabajos futuros 112

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación de los principales antecedentes revisados 20

Tabla 2 Valores típicos del exponente de pérdida. 49

Tabla 3 Parámetros para el modelamiento de la macrocelda 62

Tabla 4 Parámetros técnicos del modelamiento de small cell..... 65

Tabla 5 Descripción de puntos utilizados en el estudio. 76

Tabla 6 Valores de SINR en los puntos de estudio 78

Tabla 7 Valores de Throughput en los puntos de estudio 80

Tabla 8 Análisis y resumen de ubicaciones propuestas para las small cells. 89

Tabla 9 Valores de SINR con interferencia de servidor real en el escenario densificado. 93

Tabla 10 Valores de Throughput con interferencia de servidor real en el escenario densificado. 94

Tabla 11 Comparativa de indicadores de red en puntos estratégicos. 95

Tabla 12 Análisis del impacto del número de small cells sobre las métricas de desempeño. . 97

Tabla 13 Porcentaje de área atendida por cada small cell. 100

Tabla 14 Evaluación de métricas percentiles y capacidad espacial por small cell. 101

Índice de figuras

Figura 1 Arquitectura general de la red 5G. 26

Figura 2 Arquitectura funcional de la Red de Acceso Radio (RAN) en 5G. 31

Figura 3 Integración de Macroceldas y small cells para cobertura y capacidad. 33

Figura 4 Tipología constructiva Iglesia de San Francisco en Quito. 44

Figura 5 Construcción en adobe - Patología de la construcción en tierra cruda en el área andina ecuatoriana 44

Figura 6 Materiales de construcción tradicionales utilizados en infraestructura arquitectónica. 45

Figura 7 Descripción de la zona de estudio. 55

Figura 8 Descripción de la zona de estudio. 56

Figura 9 Zona de análisis desde Open Streat Map (OSM) 57

Figura 10 Representación de la zona de estudio en Matlab. 58

Figura 11 Representación dimensional aplicada en la simulación 61

Figura 12 Representación del modelado de pérdidas por muros o fachadas 67

Figura 13 Representación del entorno de estudio. 74

Figura 14 Mapa de potencia en el escenario de Macrocelda. 75

Figura 15 Ubicaciones seleccionadas para el estudio. 77

Figura 16 Mapa del escenario macro para SINR. 77

Figura 17 Mapa del escenario macro para throughput. 79

Figura 18 Ubicaciones seleccionadas para el estudio. 81

Figura 19 Ubicación de Small cell. 84

Figura 20 Representación de la ubicación de small cells en el entorno urbano real. 85

Figura 21 Ubicación de la macrocelda en el entorno urbano real. 86

Figura 22 Propuesta de implementación de la small cell SC1 en el entorno urbano. 87

Figura 23 Propuesta de implementación de la small cell SC2 en el entorno urbano. 87

Figura 24 Propuesta de implementación de la small cell SC3 en el entorno urbano. 88

Figura 25 Propuesta de implementación de la small cell SC4 en el entorno urbano. 89

Figura 26 Mapa de potencia servidora en el escenario densificado. 91

Figura 27 Mapa de SINR con interferencia de servidor real en el escenario densificado. 92

Figura 28 Mapa de throughput en el escenario densificado. 94

Figura 29 Evidencia de cableado existente para SC1. 107

Figura 30 Evidencia de cableado e infraestructura existente para SC2..... 108

Figura 31 Evidencia de cableado e infraestructura existente para SC3..... 109

Figura 32 Evidencia de cableado e infraestructura existente para SC4.....110

Resumen

Este trabajo de integración curricular analiza el desempeño de redes móviles 5G en entornos urbanos patrimoniales, tomando como caso de estudio la Plaza e Iglesia de San Francisco, en el Centro Histórico de Quito. El objetivo es analizar la influencia del entorno construido sobre la cobertura y capacidad de la red, además de estimar los requerimientos del backhaul. Para ello, se realiza una simulación a nivel de sistema que considera la interacción entre estaciones, la ubicación de los usuarios y las condiciones de propagación de un entorno urbano denso. Mediante información geográfica se construye una representación digital del área, aplicando modelos de pérdida por distancia y pérdidas equivalentes por bloqueo de edificaciones.

Primero se evaluó un escenario con una macrocelda operando en la banda de 3,5 GHz. Se obtuvo un throughput promedio de 14,72 Mbps y el 88,67 % del área presentó valores inferiores a 10 Mbps, evidenciando limitaciones de cobertura y capacidad. Posteriormente, se incorporaron cuatro small cells en ubicaciones estratégicas. El throughput promedio aumentó a 22,63 Mbps, equivalente a una mejora del 53,7 %. En las zonas con mayores problemas de servicio, el throughput pasó de valores cercanos a cero a un rango entre 61,44 y 300 Mbps.

Para estimar la capacidad del backhaul se analizaron los valores de throughput y los percentiles de mayor demanda de cada small cell. Los valores de p95 se ubicaron entre 261,32 y 300 Mbps, estableciendo como referencia una capacidad de 400 Mbps por nodo y aproximadamente 1,6 Gbps para las cuatro small cells. Los resultados muestran que la planificación de una red 5G en un entorno patrimonial debe considerar conjuntamente la propagación, interferencia, ubicación de los nodos y capacidad de la red de transporte..

Palabras clave: 5G, small cells, backhaul, propagación radioeléctrica, entorno patrimonial, Centro Histórico de Quito.

Abstract

This undergraduate thesis analyzes the performance of 5G mobile networks in urban heritage environments, using the Plaza and Church of San Francisco in the Historic Center of Quito as a case study. The objective is to evaluate the influence of the built environment on network coverage and capacity and estimate backhaul requirements. A system-level simulation was conducted considering multiple base stations, user distribution, and propagation conditions in a dense urban environment. A digital representation of the study area was developed using geographic information, applying distance-dependent path loss and equivalent building blockage losses.

First, a single macrocell operating in the 3.5 GHz band was evaluated. An average throughput of 14.72 Mbps was obtained, while 88.67% of the area showed values below 10 Mbps, indicating coverage and capacity limitations. Four small cells were then deployed at strategic locations. The average throughput increased to 22.63 Mbps, representing a 53.7% improvement. In the areas with the poorest initial service, throughput increased from values close to zero to between 61.44 and 300 Mbps.

Backhaul capacity was estimated using the throughput and peak demand percentiles of each small cell. The 95th percentile values ranged from 261.32 to 300 Mbps, leading to a reference capacity of 400 Mbps per node and approximately 1.6 Gbps for the four small cells. The results show that 5G network planning in heritage urban environments requires joint consideration of propagation, interference, node placement, and transport network capacity.

Keywords: 5G, small cells, backhaul, radio propagation, heritage environment, Historic Center of Quito.

Capítulo I

Introducción

En los últimos años, el crecimiento del tráfico de datos móviles ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías de comunicación, siendo las redes de quinta generación (5G) una de las principales respuestas a esta demanda. Este tipo de redes está orientado a ofrecer altas velocidades de transmisión, reducir los tiempos de latencia y aumentar la capacidad del sistema para atender una cantidad cada vez mayor de dispositivos conectados en escenarios urbanos con alta densidad de usuarios (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018).

Sin embargo, el despliegue de redes 5G no se desarrolla bajo las mismas condiciones en todos los escenarios. En el caso de los centros históricos, existen particularidades que complican la planificación, tanto a nivel técnico como normativo donde la presencia de edificaciones patrimoniales, la densidad urbana y las restricciones para la instalación de nueva infraestructura dificultan el despliegue de redes móviles en este tipo de entornos y afectan directamente el desempeño de cobertura y capacidad.

En el Centro Histórico de Quito, la actividad turística y comercial produce una alta demanda de conectividad móvil. Sin embargo, las características señaladas anteriormente afectan el desempeño de la red en esta zona. Ante esta situación, se analiza el comportamiento de las redes 5G y las alternativas orientadas a mantener un rendimiento adecuado. El presente trabajo evalúa una red 5G en el sector de la Plaza e Iglesia de San Francisco, considerando la red de acceso y la red de transporte asociada. El análisis se realiza mediante una simulación a nivel de sistema, con la cual se estudian la cobertura, la capacidad y los requerimientos de backhaul en escenarios con y sin densificación mediante small cells, de acuerdo con los enfoques de evaluación recomendados para estos sistemas (ITU-R, 2017).

Alcance

Como se mencionó, este trabajo analiza el desempeño de una red 5G en el entorno de la Plaza e Iglesia de San Francisco, mediante simulaciones a nivel de sistema. Para ello, se estudian dos escenarios de despliegue. El primero corresponde a una red servida únicamente por una macrocelda, mientras que el segundo incorpora small cells ubicadas en puntos estratégicos del entorno.

A partir de los resultados obtenidos se comparan métricas de cobertura, capacidad y throughput. Esto permite identificar las diferencias entre ambos escenarios y evaluar su efecto sobre los requerimientos de transporte asociados al tráfico de cada nodo.

El estudio se limita a un enfoque de simulación, por lo que no contempla modelos electromagnéticos detallados ni el diseño físico o económico de la red.

Objetivo general

- Evaluar el comportamiento de una red móvil 5G en un entorno urbano patrimonial mediante simulación a nivel de sistema, con el fin de identificar las limitaciones de cobertura y capacidad, y determinar su impacto en los requerimientos de la red de transporte.

Objetivos específicos

- Revisar los fundamentos de redes 5G, los modelos de propagación y las estrategias de densificación utilizadas para mejorar el desempeño de la red en entornos urbanos con características patrimoniales.
- Generar una representación digital del sector de la Plaza de San Francisco a partir de información geográfica y de la distribución de las edificaciones presentes en el área de estudio.

- Analizar mediante simulación el desempeño de una red 5G en un escenario con macrocelda y en otro con small cells, tomando en cuenta los efectos de propagación y bloqueo producidos por el entorno urbano.
- Analizar el throughput obtenido en el área de estudio y estimar los requerimientos de capacidad del backhaul a partir del tráfico asociado a cada nodo de acceso.

Justificación

El estudio se realiza debido a la necesidad de contar con criterios técnicos para evaluar redes 5G en sectores donde el despliegue de infraestructura presenta restricciones particulares. En este tipo de zonas, no es suficiente analizar únicamente la cobertura, ya que también deben considerarse la capacidad disponible y el tráfico que deberá transportar la red de backhaul.

La simulación permite estudiar estas condiciones sin intervenir físicamente en el área patrimonial y comparar distintas configuraciones de red antes de considerar un posible despliegue. A partir de los resultados se pueden reconocer las zonas con menor desempeño, determinar el efecto de la densificación y establecer valores de referencia para el dimensionamiento del transporte.

La principal contribución de este trabajo consiste en analizar de forma conjunta la propagación, la densificación y los requerimientos de backhaul en un entorno patrimonial. Para ello, se utiliza una representación dimensional del área de estudio, un modelo de propagación con pérdidas por bloqueo y fachadas, y un escenario densificado con small cells. A partir de los mapas de throughput y de las métricas obtenidas por cada nodo, se estiman los requerimientos de capacidad de la red de transporte. De esta manera, se relaciona el comportamiento de la red de acceso con las condiciones físicas del entorno y con la demanda que debe soportar el backhaul. El estudio es principalmente metodológico y aplicado, ya que propone una forma de evaluar estos elementos dentro de un mismo procedimiento de simulación. Sin embargo, los resultados no corresponden a una validación experimental del canal ni a un diseño definitivo de implementación, debido a que no se realizaron mediciones radioeléctricas en campo.

Capítulo II

Estado del arte

El análisis del desempeño de las redes móviles en zonas urbanas ha adquirido mayor importancia con la llegada de 5G, sobre todo en escenarios donde la demanda de capacidad y las características del entorno construido influyen directamente en la cobertura y en la calidad del servicio. Dentro de esta línea, diversos trabajos han abordado el análisis de la propagación, la densificación mediante *small cells* y los requerimientos de transporte en redes de nueva generación. A pesar del avance de las investigaciones relacionadas con redes 5G, la mayoría de los trabajos se desarrollan en escenarios urbanos convencionales. En comparación, existen menos estudios enfocados en entornos patrimoniales o centros históricos, donde las restricciones de infraestructura y la forma del entorno urbano generan condiciones diferentes para el despliegue y la propagación de la señal, con el fin de resumir los principales antecedentes revisados, en la Tabla 1 se presentan los enfoques utilizados, sus principales aportes y la relación que mantienen con el presente trabajo.

Tabla 1

Comparación de los principales antecedentes revisados

Fuente	Escenario analizado	Enfoque o modelo	Principal aporte	Relación con el presente trabajo	Limitación frente al presente estudio
(ITU-R, 2017)	Evaluación de tecnologías IMT-2020	Simulación a nivel de sistema	Establece criterios para evaluar cobertura, capacidad y	Sirve como referencia para definir las métricas	Presenta lineamientos generales y no analiza un entorno

			throughput en redes móviles.	utilizadas en la simulación.	patrimonial específico.
(3GPP, 2020)	Propagación en redes 5G entre 0,5 y 100 GHz	Modelos de canal para condiciones LOS y NLOS	Permite representar pérdidas por distancia, bloqueo y penetración en distintos escenarios.	Sustenta el tratamiento de las condiciones de propagación y de las obstrucciones presentes en el área de estudio.	No representa de manera particular la geometría ni los materiales del Centro Histórico de Quito.
(Andrews J. , y otros, 2014)	Redes 5G densificadas	Incorporación de small cells	Señala que la densificación puede mejorar la capacidad y la reutilización del espectro, aunque aumenta la interferencia y	Sustenta el uso de small cells y el análisis de su efecto sobre el throughput	No estudia un entorno patrimonial ni considera restricciones físicas de instalación.

			las exigencias de transporte.	y el backhaul.	
(Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018)	Arquitectura y funcionamiento de 5G NR	Análisis de la RAN, densificación y transporte	Explica la relación entre la red de acceso, la arquitectura 5G y la red de transporte.	Permite relacionar el tráfico generado por la macrocelda y las small cells con la capacidad requerida en el backhaul.	Presenta un análisis general de 5G y no desarrolla una simulación aplicada a un entorno histórico.
(Rappaport, Jr, Daniels, & Murdock, 2017)	Propagación en sistemas inalámbricos de nueva generación	Análisis de pérdida de trayectoria y obstrucciones	Destaca la influencia de las edificaciones y de la morfología urbana sobre la calidad del enlace.	Sustenta el análisis del bloqueo y de las condiciones NLOS presentes en el Centro Histórico de Quito.	No considera de forma específica construcciones patrimoniales ni el dimensionamiento del backhaul.

(Sawad, Nilavalan, & Al-Raweshidy, 2023)	Tecnologías de backhaul para redes 5G	Revisión de arquitecturas y alternativas de transporte	Señala que la capacidad de la red de acceso debe acompañarse de un dimensionamiento adecuado del backhaul.	Sirve como base para estimar la capacidad de transporte requerida por cada small cell.	No calcula la demanda de backhaul a partir de mapas espaciales de throughput en un escenario específico.
(Pérez Herrera, Villamarín, & Altamirano, 2024)	Implementación de redes 5G en ciudades patrimoniales	Análisis técnico y de restricciones urbanísticas	Identifica limitaciones relacionadas con la conservación patrimonial y la instalación de infraestructura.	Aporta el contexto local y justifica la necesidad de considerar restricciones patrimoniales en la ubicación de los nodos.	No desarrolla una simulación conjunta de propagación, densificación, capacidad y backhaul por nodo.

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes revisadas.

A pesar de estos avances, la literatura revisada indica una integración limitada entre tres aspectos que, en esta investigación, se abordan de forma conjunta: la caracterización radioeléctrica de un entorno patrimonial, la evaluación de estrategias de densificación mediante small cells y la estimación de los requerimientos de capacidad de la red de transporte. En particular, se observa que pocos estudios analizan simultáneamente el impacto del entorno construido sobre la cobertura y la capacidad, y su efecto posterior sobre el dimensionamiento del *backhaul* en escenarios urbanos históricos.

En este contexto, el presente trabajo busca aportar a esa línea de investigación mediante un análisis a nivel de sistema aplicado al entorno de la Plaza e Iglesia de San Francisco, en el Centro Histórico de Quito. La propuesta integra la representación geográfica del escenario, la evaluación de cobertura y capacidad con macrocelda y *small cells*, y la estimación de requerimientos de transporte derivados del tráfico generado por la red de acceso. De esta manera, se busca aportar una visión más completa del despliegue de redes 5G en entornos patrimoniales.

Marco Teórico

En el Capítulo II se presentan los fundamentos conceptuales y técnicos que sustentan el desarrollo de la investigación, abordando los principales componentes de las redes 5G, su arquitectura, los modelos de propagación y los elementos asociados a la red de transporte. Estos aspectos permiten establecer el marco teórico necesario para el análisis de cobertura, capacidad y dimensionamiento del backhaul en el entorno urbano patrimonial considerado.

Evolución de las redes móviles y fundamentos de 5G

La evolución de las redes móviles ha estado orientada a satisfacer el incremento progresivo en la demanda de servicios de comunicación inalámbrica. Desde la primera

generación (1G), centrada en servicios de voz analógica, hasta la cuarta generación (4G), que consolidó la transmisión de datos de alta velocidad mediante arquitecturas completamente basadas en IP, cada generación ha introducido mejoras significativas en capacidad, eficiencia espectral y calidad de servicio (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018).

La tecnología 5G aparece ante el aumento del tráfico móvil, la expansión de dispositivos conectados y la necesidad de soportar servicios con mayores exigencias de capacidad y latencia. Dentro de los objetivos definidos para IMT-2020 se incluyen velocidades superiores a 1 Gbps, reducción de latencia y soporte para una mayor densidad de usuarios y dispositivos (ITU-R, 2015).

A diferencia de generaciones anteriores, 5G integra distintos escenarios de uso, como enhanced Mobile Broadband (eMBB), comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC) y comunicación masiva tipo máquina (mMTC) (3GPP, 2017). En entornos urbanos densos, eMBB es importante debido a la concentración de usuarios en espacios reducidos y al alto tráfico que se genera. Para responder a esta demanda no basta con mejorar las técnicas de transmisión, sino que también es necesario adaptar el diseño de la red. Esto incluye el uso de bandas de frecuencia medias y altas, además del despliegue de small cells en las zonas con mayor congestión.

Arquitectura de la red 5G

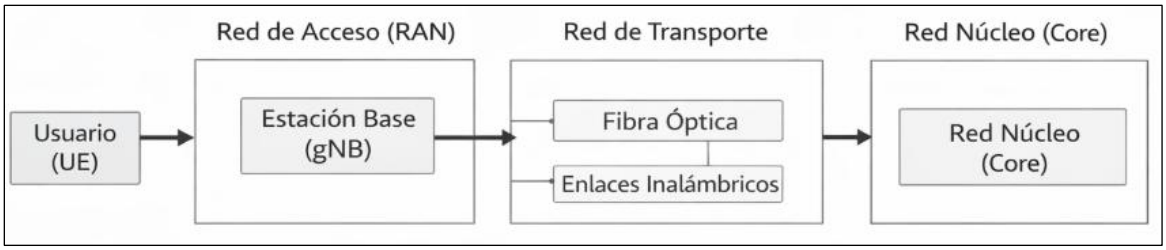
Una red móvil puede entenderse como un sistema compuesto por varios segmentos interconectados que permiten la comunicación entre los usuarios y los servicios ubicados en la red del operador o en Internet. En 5G, la arquitectura conserva la lógica general de las generaciones anteriores, aunque introduce cambios importantes asociados a la virtualización de funciones y a una mayor flexibilidad en la provisión de servicios, necesarios para soportar distintos tipos de tráfico (ITU-R, 2015). En términos generales, una red 5G puede describirse a partir de tres bloques funcionales. La RAN proporciona el acceso inalámbrico a los usuarios, la

red de transporte enlaza los distintos nodos de la infraestructura y la red núcleo ejecuta las funciones centrales del sistema.

Aunque trabajan de manera conjunta, cada bloque participa en una etapa diferente del procesamiento y transporte de la información. Esta división resulta relevante para la planificación de la red, ya que las decisiones tomadas en la RAN, como la incorporación de small cells, tienen efectos sobre la capacidad requerida en la red de transporte y sobre la gestión del tráfico dentro del núcleo. A partir de la información revisada, se establece la arquitectura de red utilizada como referencia en el estudio. Esta se encuentra compuesta por la red de acceso radioeléctrico, la red de transporte y el núcleo 5G.

Figura 1

Arquitectura general de la red 5G.



La arquitectura considerada se divide en los siguientes bloques:

Red de acceso radioeléctrico (RAN)

La red de acceso radioeléctrico (RAN) es el segmento encargado de establecer la comunicación inalámbrica entre los equipos de usuario (UE) y la infraestructura del operador. En sistemas 5G, esta función es realizada por estaciones base denominadas gNodeB (gNB), que operan utilizando la interfaz aérea New Radio (NR) definida por 3GPP (3GPP, 2022).

A diferencia de su antecesor, el gNB en 5G no funciona como un solo equipo, sino que se ha dividido en varias partes con el fin de optimizar su desempeño y adaptarse a las nuevas exigencias de la red, las cuales se mencionan a continuación:

- **Radio Unit (RU)**: Es la antena física que transmite y recibe las señales de radiofrecuencia (RF). Maneja tecnologías clave del 5G como *Massive MIMO* (múltiples antenas en un solo panel) y Beamforming (dirigir la señal directamente al usuario en lugar de radiarla en todas direcciones).
- **Distributed Unit (DU)**: Se ubica normalmente en las proximidades de la antena. Se encarga de procesar las funciones de radio que requieren una respuesta rápida, debido a su conexión directa con la red de acceso.
- **Centralized Unit (CU)**: Reúne funciones provenientes de varias DUs y se encarga de los procesos que no requieren una respuesta inmediata. Esta centralización facilita el uso compartido de recursos y la coordinación de distintos nodos de acceso.

La RAN administra los recursos radioeléctricos de la red, incluyendo aspectos como asignación de ancho de banda, control de potencia y calidad de servicio. En despliegues 5G es común combinar macroceldas para cobertura amplia con small cells orientadas a incrementar capacidad en zonas de mayor demanda.

Red de transporte

Por su parte, la red de transporte conecta la RAN con el núcleo de red y transporta el tráfico generado por los usuarios hacia los diferentes servicios y plataformas de la red. Este segmento puede implementarse mediante diferentes tecnologías, como fibra óptica, enlaces microondas o soluciones inalámbricas de alta capacidad.

En arquitecturas 5G, la red de transporte puede segmentarse funcionalmente en fronthaul, mid-haul y backhaul, dependiendo del punto donde se establezca la división entre funciones de la RAN (3GPP, 2022). No obstante, desde una perspectiva estructural general, puede considerarse como el sistema encargado de agregar y transportar el tráfico proveniente de múltiples estaciones base.

En escenarios donde se incrementa la densidad de celdas, los requerimientos de la red de transporte crecen proporcionalmente. Por esta razón, el análisis de cobertura y capacidad en la RAN debe complementarse con una evaluación de los recursos necesarios en el transporte**.**

Red núcleo (Core Network)

El núcleo de red en 5G, conocido como 5G Core (5GC), es el encargado de gestionar el control de sesiones, la autenticación de usuarios, la movilidad y el encaminamiento del tráfico hacia redes externas. El 5GC adopta una arquitectura basada en servicios que permite distribuir y virtualizar funciones de red de forma más flexible (3GPP, 2022). Esta característica facilita el manejo de diferentes tipos de tráfico y la adaptación de la red a distintos escenarios de uso.

En este trabajo no se analiza el núcleo de red de manera específica; sin embargo, el tráfico generado por la RAN termina siendo procesado y gestionado por este componente, manteniendo una relación indirecta con la red de transporte estudiada.

Principales características de 5G

La quinta generación de redes móviles fue diseñada para responder a una demanda creciente de conectividad, no solo en términos de velocidad, sino también de rendimiento, latencia y densidad de dispositivos conectados. A diferencia de generaciones anteriores, cuyo enfoque principal era aumentar la tasa de transmisión de datos, 5G introduce un conjunto más amplio de objetivos definidos dentro del marco IMT-2020 (ITU-R, 2015).

Entre las características más representativas de 5G se encuentran las altas tasas de datos, la reducción significativa de la latencia y la posibilidad de densificar la red mediante múltiples capas de acceso. Estas prestaciones permiten soportar nuevos escenarios de uso, desde aplicaciones de banda ancha móvil mejorado hasta servicios críticos con requisitos estrictos de tiempo de respuesta (3GPP, 2022).

Altas tasas de datos: Uno de los objetivos fundamentales de 5G es incrementar la velocidad de transmisión respecto a generaciones previas. Según la visión establecida por la UIT

para IMT-2020, las redes 5G deben ser capaces de alcanzar tasas pico del orden de 10 a 20 Gbit/s en condiciones ideales, así como proporcionar velocidades promedio significativamente mayores que LTE en escenarios reales (ITU-R, 2015).

Este aumento en la tasa de datos se logra mediante el uso de anchos de banda más amplios, técnicas avanzadas de modulación y esquemas de múltiples antenas (MIMO masivo). En la práctica, la capacidad disponible para el usuario está condicionada por la banda de frecuencia, la densidad de usuarios y las condiciones de propagación del entorno; en escenarios urbanos densos, la alta demanda puede saturar las macroceldas, lo que hace necesaria la incorporación de small cells para distribuir la carga de tráfico.

Baja latencia: Otra característica de 5G es la reducción de la latencia extremo a extremo. IMT-2020 establece como meta latencias del orden de 1 ms para ciertos casos de uso críticos, aunque en despliegues comerciales típicos los valores pueden ser mayores dependiendo de la arquitectura implementada (ITU-R, 2015).

La disminución de latencia es relevante para aplicaciones como control industrial, vehículos conectados o realidad aumentada. Desde el punto de vista de red, esta característica implica requisitos más exigentes en la infraestructura de transporte y en la proximidad de funciones de procesamiento.

Aunque el presente estudio no se centra en servicios ultra críticos, la latencia constituye un parámetro a considerar cuando se analizan alternativas tecnológicas de transporte.

Densificación de la red: La densificación es una de las estrategias más importantes en el despliegue de redes 5G. Consiste en aumentar el número de estaciones base en un área determinada con el objetivo de incrementar la capacidad y la eficiencia espectral. Esta estrategia se materializa mediante la combinación de macroceldas y small cells en un esquema multicapa (Andrews J. G., 2014)

En escenarios urbanos, especialmente en zonas con alta concentración de usuarios o limitaciones físicas en el despliegue, la densificación permite reducir la distancia promedio entre

transmisor y receptor, lo que mejora el SINR y las prestaciones de red. Sin embargo, esta mejora en la red de acceso conlleva un incremento en el tráfico agregado que debe ser transportado hacia el núcleo de red.

Por esta razón, la densificación no puede analizarse únicamente desde la perspectiva radioeléctrica; debe considerarse también su impacto en la red de transporte y en el dimensionamiento del backhaul.

RAN 5G y su Relación con la Red de Transporte

Como se explicó en el Capítulo 2, la red de acceso radioeléctrico (RAN) es el segmento encargado de establecer la comunicación entre los equipos de usuario y la infraestructura del operador. En redes 5G, este componente adquiere una mayor relevancia debido al incremento en la demanda de capacidad, la incorporación de nuevas bandas de frecuencia y la necesidad de soportar un número creciente de dispositivos conectados (ITU-R, 2015).

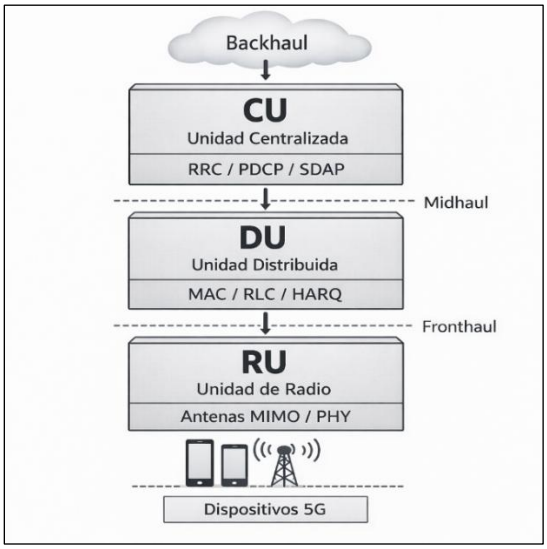
En este contexto, La arquitectura de la RAN no solo influye en la cobertura, sino también en la cantidad de tráfico que debe transportar la red. A medida que aumenta el ancho de banda y se incorporan small cells, crecen también las exigencias sobre el transporte hacia el núcleo de red, por ello en redes 5G la RAN no puede analizarse de forma aislada, ya que la densificación mediante small cells también incrementa las exigencias sobre la red de transporte.

Arquitectura de la RAN en 5G

En 5G, la estación base se denomina gNodeB (gNB) y puede desplegarse como un nodo completamente integrado o como una arquitectura funcionalmente dividida. En este caso, las funciones pueden dividirse en una Unidad Central (CU) y una Unidad Distribuida (DU), lo que permite distintos esquemas de centralización y uso de recursos (3GPP, 2022). Aunque esta separación no cambia el rol de la RAN, sí influye en la forma en que se transportan los datos y la señalización (3GPP, 2022).

Figura 2

Arquitectura funcional de la Red de Acceso Radio (RAN) en 5G.



La asignación de recursos radioeléctricos, el control de potencia, la programación de usuarios y la gestión de movilidad siguen formando parte de las funciones de la RAN. No obstante, al distribuir estas funciones entre diferentes unidades, aumenta la dependencia de los enlaces de transporte encargados de intercambiar información entre los elementos de acceso y la red núcleo (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018).

En el escenario planteado, donde la densificación mediante small cells es común, esta arquitectura distribuida puede facilitar el despliegue físico de nodos de acceso. No obstante, cada nuevo punto de acceso requiere conectividad hacia la red central, lo que refuerza la relación directa entre decisiones de diseño de la RAN y dimensionamiento del backhaul.

Macroceldas y small cells

Partiendo de la arquitectura de la RAN descrita anteriormente, las redes celulares modernas suelen implementarse mediante una estructura multicapa en la que diferentes tipos de estaciones base trabajan de manera complementaria para proporcionar cobertura y capacidad.

Sin embargo, con el crecimiento del tráfico móvil y la aparición de servicios que demandan mayores tasas de transmisión, el uso exclusivo de macroceldas resulta insuficiente para

garantizar niveles adecuados de capacidad en entornos urbanos densos. En este contexto, la incorporación de small cells permite reforzar la cobertura y distribuir de manera más eficiente la carga de usuarios dentro de la red (Andrews, y otros, 2014).

La combinación de macroceldas y small cells permite reducir la distancia promedio entre el transmisor y el receptor, lo que generalmente se traduce en mejores niveles de señal, mayor eficiencia espectral y mayor velocidad de transmisión. No obstante, este enfoque también incrementa la complejidad de la red, ya que el número de nodos de acceso crece y, con ello, la cantidad de enlaces necesarios hacia la red de transporte.

Características de las Macroceldas: Las macroceldas permiten proporcionar cobertura sobre áreas extensas mediante antenas instaladas a mayor altura y niveles de potencia superiores a los utilizados por otros nodos de acceso (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018). En redes 5G siguen desempeñando un papel importante dentro de la red de acceso, particularmente en entornos urbanos donde se requiere cobertura continua.

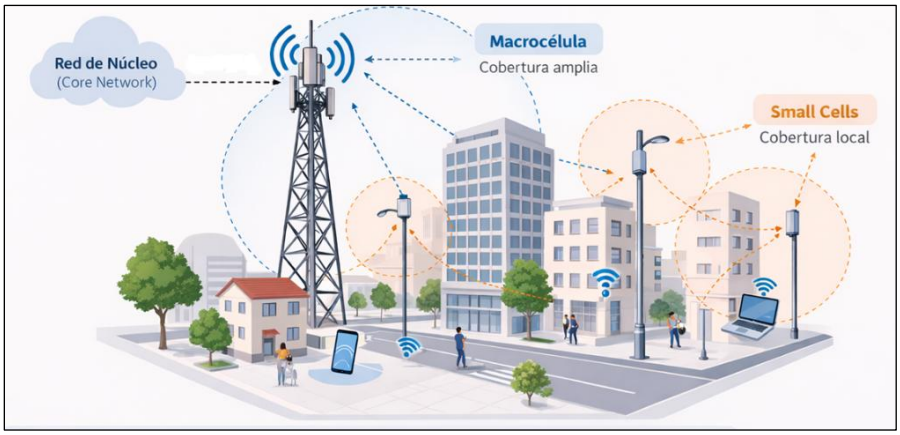
No obstante, la presencia de edificaciones, calles estrechas y otros obstáculos puede limitar las condiciones de propagación en determinadas zonas. Como consecuencia, existen zonas donde la calidad de la señal se reduce y el throughput disponible es menor que en sectores con mejores condiciones de propagación. Esta situación suele observarse en calles estrechas o áreas afectadas por bloqueo. Para compensar estas limitaciones, los operadores recurren al despliegue de small cells en puntos específicos donde la macrocelda no logra proporcionar suficiente capacidad.

Características de las Small cells: Las small cells complementan el servicio proporcionado por las macroceldas en sectores donde la capacidad disponible resulta insuficiente o donde las condiciones de propagación afectan el desempeño de la red (Andrews, y otros, 2014). Estos nodos operan con menor potencia y atienden áreas más reducidas. Al ubicarse cerca de los usuarios, disminuyen las pérdidas de propagación y contribuyen a mejorar la capacidad en sectores con alta demanda de tráfico (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018).

Además, su instalación puede adaptarse al entorno urbano, ya que pueden colocarse en postes, fachadas u otras estructuras existentes, sin necesidad de utilizar infraestructura de gran tamaño. No obstante, su despliegue implica una mayor dependencia de la infraestructura de transporte.

Figura 3

Integración de Macroceldas y small cells para cobertura y capacidad.



Densificación de la red de acceso

A partir de la coexistencia de macroceldas y small cells, surge el concepto de densificación de la red de acceso, una estrategia ampliamente utilizada para mejorar el desempeño de los sistemas celulares en escenarios con alta demanda de tráfico. La densificación consiste en incrementar el número de estaciones base dentro de un área determinada con el objetivo de aumentar la capacidad disponible para los usuarios (Andrews, y otros, 2014).

En redes 5G, la densificación cobra mayor relevancia debido al aumento del ancho de banda y al crecimiento del tráfico móvil. Al reducir la distancia entre transmisor y receptor, se logran mejores condiciones de señal y mayores tasas de transmisión, lo que contribuye a mejorar la experiencia del usuario (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018).

Sin embargo, como se mencionó previamente, el aumento en el número de estaciones base también incrementa los desafíos asociados con la gestión de interferencia, la densificación genera un mayor volumen de tráfico agregado que debe ser transportado hacia el núcleo de red. Por ello, su análisis no puede limitarse al dominio radioeléctrico.

Impacto de la densificación en los requerimientos de transporte: En redes basadas principalmente en macroceldas, la cantidad de estaciones era menor y el tráfico se concentraba en menos nodos, por lo que las exigencias sobre la red de transporte eran más reducidas. Sin embargo, en arquitecturas densificadas el número de nodos puede incrementarse considerablemente dentro de una misma área geográfica, lo que implica que el tráfico generado por múltiples celdas debe agregarse y transportarse de manera eficiente hacia la red central (Andrews, y otros, 2014).

Las small cells suelen instalarse en entornos urbanos donde no siempre existe infraestructura de transporte disponible en todos los puntos del despliegue. Debido a ello, la conexión de estos nodos puede requerir alternativas distintas a la fibra óptica, especialmente en sectores donde las condiciones físicas o las restricciones del entorno dificultan nuevas instalaciones, por esta razón, el análisis de una red 5G no se limita únicamente a la cobertura y la capacidad de acceso, sino que también requiere considerar la red de transporte encargada de interconectar los distintos nodos. Evaluar únicamente la cobertura radioeléctrica puede conducir a configuraciones que resulten difíciles de soportar desde el punto de vista del transporte por esta razón, el dimensionamiento del backhaul debe considerar tanto la cantidad de estaciones base desplegadas.

Red de Transporte en 5G

El incremento en el número de estaciones base dentro de la red de acceso implica también un aumento en el volumen de tráfico que debe ser transportado hacia el núcleo de red. En redes 5G, este fenómeno se vuelve particularmente relevante debido a la combinación de

mayores anchos de banda, mejoras en la eficiencia espectral y el despliegue de arquitecturas densificadas con small cells (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018).

La red de transporte es la encargada de llevar el tráfico desde los nodos de acceso hacia los sistemas de agregación y el núcleo de la red. Este segmento es esencial para el funcionamiento de las redes móviles, ya que permite enviar la información generada en la interfaz de radio hacia otros usuarios, servicios de la red central o Internet (ITU-R, 2015).

Con la llegada de 5G, la red de transporte debe manejar un mayor volumen de tráfico debido al crecimiento del consumo de video, el uso de servicios en la nube y el aumento de dispositivos conectados. Como consecuencia, las exigencias no recaen únicamente sobre la red de acceso, sino también sobre la infraestructura encargada de transportar la información (Cisco, 2020).

En estas condiciones, la red de transporte adquiere una mayor importancia dentro de la planificación de redes 5G. Además de soportar el tráfico generado por los usuarios, debe cumplir requisitos relacionados con latencia, confiabilidad y sincronización, especialmente cuando se utilizan arquitecturas RAN distribuidas o más flexibles (3GPP, 2022).

El despliegue de esta infraestructura también está condicionado por las características del entorno. En zonas urbanas, las restricciones físicas pueden dificultar la instalación de nuevos elementos, por lo que es necesario considerar diferentes opciones para conectar los nodos de acceso. Por esta razón, el análisis de la red de transporte permite entender cómo las decisiones adoptadas en la red de acceso influyen en el desempeño general del sistema. En los apartados siguientes se describen los conceptos principales asociados al transporte en redes 5G, así como los diferentes segmentos que lo componen.

Definición y función del backhaul

Dentro de la arquitectura general de una red móvil, el backhaul corresponde al segmento encargado de transportar el tráfico generado en la red de acceso hacia la red central. En términos generales, este sistema conecta las estaciones base con nodos de agregación o directamente

con el núcleo de red, permitiendo el intercambio de datos de usuario y señalización entre distintos elementos del sistema (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018).

Históricamente, el backhaul ha sido considerado el enlace que conecta las estaciones base con la red central. No obstante, con la evolución de las arquitecturas de red hacia modelos más flexibles, el concepto ha tomado una estructura más compleja. En redes 5G, diferentes segmentos de transporte pueden existir entre los distintos componentes funcionales de la RAN y el núcleo, lo que ha llevado a distinguir entre enlaces de fronthaul, mid-haul y backhaul dependiendo de la ubicación de las funciones de procesamiento dentro de la red (3GPP, 2022).

A pesar de esta diferenciación, el término backhaul continúa utilizándose de manera general para referirse al conjunto de enlaces encargados de transportar el tráfico agregado desde la red de acceso hacia los sistemas centrales, de tal manera que se hace especialmente evidente en escenarios donde se despliega un gran número de small cells. Cada estación base adicional introduce nuevos flujos de tráfico que deben ser agregados y transportados hacia la red central. Si la infraestructura de transporte no es suficiente para la demanda, el desempeño de la red puede verse limitado aun cuando las condiciones radioeléctricas estén a favor.

Segmentos de una red en 5G

Con la evolución de las redes móviles hacia arquitecturas más flexibles, la red de transporte ha dejado de ser un único enlace entre la estación base y el núcleo de red. En redes 5G, la distribución de funciones entre distintos elementos de la RAN modifica la forma en que se transporta la información dentro de la red (3GPP, 2022).

Según la forma en que se distribuyen las funciones de la estación base, la red de transporte puede dividirse en varios segmentos que conectan los distintos bloques funcionales. Esta organización permite aprovechar mejor los recursos y facilita el uso de arquitecturas más flexibles (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018).

La red de transporte suele dividirse en tres segmentos: fronthaul, mid-haul y backhaul. Cada uno conecta diferentes elementos de la RAN con el núcleo de red y maneja distintas exigencias de capacidad, latencia y sincronización.

Esta división está directamente relacionada con la separación funcional de la estación base en componentes como la Radio Unit (RU), la Distributed Unit (DU) y la Centralized Unit (CU). Según la ubicación de estas funciones, la información generada en la interfaz radio puede recorrer uno o varios segmentos de transporte antes de alcanzar el núcleo de red (3GPP, 2022).

En los apartados siguientes se describen con mayor detalle las características de cada uno de estos segmentos de transporte.

Fronthaul: El fronthaul conecta la RU con la DU dentro de la RAN. A través de este segmento circula información asociada al procesamiento de la señal radio, por lo que normalmente requiere enlaces con alta capacidad y tiempos de transmisión reducidos.

En arquitecturas más tradicionales, una mayor cantidad de funciones se concentraba en la propia estación base. Debido a ello, la necesidad de transportar información entre unidades separadas era menor y los requerimientos del fronthaul resultaban menos exigentes. Sin embargo, con la introducción de arquitecturas más distribuidas y la posibilidad de centralizar parte del procesamiento de la señal, el fronthaul ha adquirido una mayor importancia en redes 5G (Checko, y otros, 2015).

Debido a las características del tráfico que transporta, este segmento suele implementarse mediante enlaces de fibra óptica, los cuales permiten cumplir con los requisitos estrictos de latencia y capacidad asociados al procesamiento de señales radio (ITU-R, 2015).

Mid-haul: Este segmento enlaza la Unidad Distribuida (DU) con la Unidad Central (CU) dentro de la RAN. A diferencia del fronthaul, transporta información ya procesada parcialmente, lo que reduce sus requerimientos de capacidad (3GPP, 2022). Su implementación permite distribuir funciones dentro de la red de acceso y adaptar la arquitectura según el escenario de despliegue (Checko, y otros, 2015). En la práctica, este segmento puede considerarse como

parte del sistema de transporte que conecta los nodos de acceso con las funciones centrales de la red y suele apoyarse en tecnologías similares a las del backhaul, como fibra óptica o enlaces inalámbricos de alta capacidad (Ericsson, 2023).

Backhaul: El backhaul corresponde al segmento encargado de conectar los nodos de acceso de la red móvil con los elementos centrales. A través de este conjunto de enlaces se transporta el tráfico agregado proveniente de las estaciones base hacia nodos de agregación o directamente hacia el núcleo de red, permitiendo que los datos de usuario y la señalización puedan ser encaminados dentro de la infraestructura del operador (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018).

En redes modernas, el backhaul no se limita a un enlace punto a punto entre una estación base y la red central. En muchos despliegues, varias estaciones base se conectan primero a nodos de agregación intermedios que concentran el tráfico antes de enviarlo hacia niveles superiores de la red. Esta estructura jerárquica permite organizar de forma eficiente el transporte de datos y optimizar el uso de los recursos disponibles ya que, en estos casos, el diseño del backhaul debe considerar no solo la conectividad individual de cada estación base, sino también la manera en que el tráfico generado por múltiples celdas se combina dentro de la red (Andrews, y otros, 2014).

Desde la planificación, dimensionar el backhaul consiste en estimar el tráfico generado por cada nodo de acuerdo con las condiciones de acceso y la cantidad de usuarios. Una estimación correcta evita que la red de transporte limite la comunicación entre la red de acceso y el núcleo.

Requerimientos del transporte en redes 5G

En la planificación de la red, los enlaces de transporte se diseñan considerando distintos parámetros relacionados con la calidad del servicio. Entre los principales se encuentran la capacidad, la latencia y la sincronización, ya que estos aspectos definen los requisitos que deben cumplir los enlaces utilizados para conectar los diferentes nodos de la red (3GPP, 2022). La

capacidad indica la cantidad de información que puede transportarse entre nodos, mientras que la latencia corresponde al tiempo que tarda la información en atravesar la infraestructura. Por su parte, la sincronización permite coordinar el funcionamiento de las estaciones base. Estos tres parámetros se explican con mayor detalle en los siguientes apartados.

Capacidad: La capacidad constituye uno de los parámetros más importantes en el diseño de la red de transporte ya que este concepto se refiere a la cantidad de información que puede transmitirse a través de un enlace dentro de un intervalo determinado de tiempo. En redes móviles modernas, la capacidad de los enlaces de transporte debe dimensionarse considerando el volumen de datos generado por las estaciones base que se encuentran conectadas a la infraestructura de transporte (Rappaport, Jr, Daniels, & Murdock, 2017). Como consecuencia, los enlaces de transporte deben ser capaces de soportar mayores flujos de datos provenientes de la red de acceso. Este aspecto resulta particularmente relevante cuando múltiples nodos comparten enlaces comunes dentro de la red de transporte (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 2018). En la planificación de redes, la capacidad del transporte suele estimarse a partir del tráfico generado por las estaciones y con esta información se puede dimensionar los enlaces de backhaul y analizar qué tecnologías de transporte pueden soportar el tráfico agregado de la red.

Latencia: Corresponde al tiempo que demora la información en desplazarse desde su origen hasta su destino. Este retardo es resultado de la combinación de varios factores, entre ellos el tiempo de propagación de la señal, el procesamiento en los nodos intermedios y las posibles colas que se generan durante la transmisión. Este aspecto adquiere mayor relevancia debido a la incorporación de servicios que requieren tiempos de respuesta más exigentes, como aplicaciones industriales o servicios interactivos (ITU-R, 2015). Aunque una parte importante del retardo total se origina en la interfaz radio y en el núcleo de red, la infraestructura de transporte también contribuye al tiempo global, por lo que su diseño debe considerar configuraciones que no introduzcan demoras adicionales innecesarias.

Sincronización: La sincronización permite que las estaciones base operen usando referencias comunes de tiempo y frecuencia. En redes 5G este aspecto tiene mayor importancia para la interacción entre múltiples nodos y al uso de técnicas avanzadas de acceso. Cuando no existe una buena sincronización, pueden aparecer problemas de interferencia y degradación en el desempeño del sistema, afectando especialmente la coordinación entre estaciones base y la gestión eficiente del espectro (3GPP, 2022).

Los mecanismos de sincronización suelen distribuirse a través de la propia red de transporte. Por esta razón, los enlaces que conectan las estaciones base con los nodos centrales deben ser capaces de soportar protocolos que permitan mantener la precisión temporal requerida por la red.

Tecnologías de transporte

La red de transporte de los sistemas móviles puede implementarse con distintas tecnologías, cada una con diferencias en capacidad de transmisión, latencia, alcance y facilidad de despliegue. La opción seleccionada depende de las características de cada caso, como la infraestructura disponible, la ubicación de los nodos y las condiciones del lugar donde se realizará la interconexión de los elementos de la red. Por esta razón, una misma red puede utilizar distintos medios de transporte según las necesidades de cada sector.

A continuación, se presentan las principales tecnologías empleadas para transportar el tráfico en redes móviles y sus características más relevantes.

Fibra óptica: La fibra óptica es una de las tecnologías más utilizadas en redes de telecomunicaciones debido a su elevada capacidad de transmisión y a su capacidad para transportar grandes volúmenes de datos a largas distancias. Los enlaces basados en fibra presentan pérdidas relativamente bajas y permiten implementar sistemas de transmisión de alta velocidad, lo que los convierte en una solución ampliamente utilizada para interconectar estaciones base con nodos de agregación o con el núcleo de red (Agrawal, 2010).

Esta tecnología destaca por su capacidad para transportar grandes volúmenes de información, ya que permite transmitir múltiples señales a través de un mismo enlace mediante técnicas como la multiplexación por longitud de onda. Gracias a ello, puede soportar el tráfico agregado de varios nodos sin convertirse fácilmente en un punto de congestión, otro aspecto importante es su baja latencia en comparación con otras tecnologías de transporte, característica que resulta especialmente útil en redes móviles actuales. Sin embargo, su despliegue puede verse limitado debido a que el tendido de fibra normalmente requiere obras civiles e intervención física sobre la infraestructura urbana.

Enlaces microondas: Los enlaces microondas constituyen una de las soluciones más utilizadas para el transporte de tráfico en redes móviles cuando la instalación de fibra óptica no es posible o resulta económicamente poco viable. Estos sistemas utilizan enlaces inalámbricos punto a punto que operan en bandas de frecuencia de varios gigahercios y permiten establecer conexiones de alta capacidad entre dos nodos de la red (Rappaport, Jr, Daniels, & Murdock, 2017).

El desempeño de los enlaces microondas depende en gran medida de las condiciones de propagación entre ambos puntos. En muchos casos es necesario mantener línea de vista entre antenas, ya que la presencia de obstáculos, la distancia o incluso las condiciones atmosféricas pueden afectar la calidad del enlace y la capacidad disponible (Freeman, 2006). Aun así, continúan siendo una opción válida en escenarios donde se necesita una solución flexible o donde no existe infraestructura de fibra.

Enlaces mmWave: Los enlaces en bandas milimétricas operan en frecuencias elevadas, generalmente superiores a 24 GHz, donde existe una mayor disponibilidad de ancho de banda. Esto permite alcanzar capacidades de transmisión considerablemente más altas que las obtenidas en enlaces microondas convencionales (Rappaport, Jr, Daniels, & Murdock, 2017) por lo que han despertado interés como alternativa de transporte en redes 5G densificadas.

Sin embargo, las señales mmWave presentan una mayor sensibilidad al bloqueo y a las pérdidas de propagación, por lo que normalmente requieren condiciones favorables de línea de vista para mantener enlaces estables (Molisch, 2012). Debido a ello, suelen utilizarse en escenarios donde las distancias entre nodos son relativamente cortas. En estos casos, los enlaces mmWave pueden complementar otras tecnologías de transporte, ofreciendo soluciones de alta capacidad sin necesidad de desplegar infraestructura física adicional

Normativa patrimonial y restricciones de despliegue en el marco legal

A nivel nacional, la Constitución de la República del Ecuador establece que los bienes patrimoniales deben conservarse y que cualquier intervención debe respetar su valor histórico (Asamblea Nacional del Ecuador, Constitución de la República del Ecuador. Registro Oficial No. 449., 2008). De forma similar, la Ley Orgánica de Cultura establece que las intervenciones en áreas históricas deben conservar sus características arquitectónicas y urbanas (Asamblea Nacional del Ecuador, 2016).

A nivel local, el Plan Especial del Centro Histórico de Quito regula las intervenciones en edificaciones y espacio público dentro de esta zona (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2020). En conjunto, estas disposiciones condicionan cualquier intervención en el área, incluyendo la instalación de infraestructura.

Restricciones de despliegue en el marco técnico

Las características de las zonas patrimoniales condicionan el despliegue de la red de acceso. En estos sectores, la instalación de macroceldas suele restringirse a estructuras autorizadas o a puntos donde los equipos no alteren la imagen urbana, lo que limita las alternativas para mejorar la cobertura radioeléctrica.

Frente a estas restricciones, las small cells pueden aumentar la capacidad sin requerir estructuras de gran tamaño. Su instalación en postes, fachadas u otros elementos existentes

facilita su uso en zonas con alta concentración de usuarios y permite una integración más discreta en el paisaje urbano.

Sin embargo, su ubicación también está sujeta a condiciones normativas y operativas. En áreas patrimoniales, cualquier intervención sobre fachadas, edificaciones o espacios públicos debe ajustarse a regulaciones específicas. Por esta razón, la selección de los sitios debe considerar tanto el desempeño de la red como las restricciones del entorno.

Estas condiciones también afectan a la red de transporte. La incorporación de nuevos nodos de acceso aumenta el tráfico que debe ser transportado. Por lo tanto, el dimensionamiento de los enlaces de backhaul y mid-haul debe considerar el tráfico agregado de estos nodos, para que la capacidad de transporte responda a las necesidades de la red de acceso.

Tipología constructiva y densidad de edificios

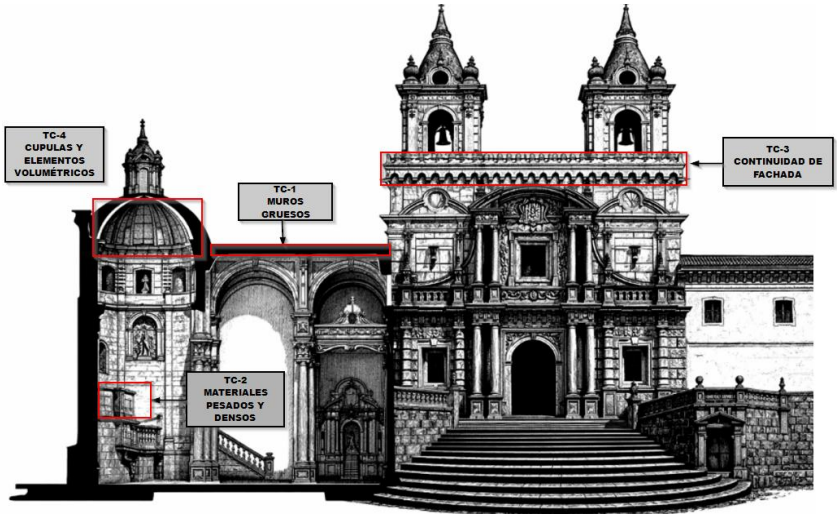
Las edificaciones del Centro Histórico de Quito presentan una tipología constructiva (TC) predominantemente maciza, con muros de gran espesor (TC-1) y materiales tradicionales como adobe, ladrillo y piedra (TC-2). Estas construcciones no fueron diseñadas considerando criterios de propagación radioeléctrica, por lo que generan niveles importantes de atenuación y bloqueo, especialmente en bandas medias utilizadas en redes 5G (ITU-R, 2019) (ITU-R, 2017).

Además, la continuidad de las fachadas (TC-3) y la alta densidad edificatoria aumentan la probabilidad de obstrucciones sobre los enlaces radioeléctricos, afectando tanto la cobertura como la calidad de la señal dentro del entorno urbano. En este contexto, el entorno construido deja de ser un elemento pasivo y pasa a condicionar directamente el desempeño del sistema.

Por ello, en el análisis de redes móviles en zonas patrimoniales resulta necesario incorporar el efecto conjunto de las edificaciones, ya que sus características influyen de forma directa en el comportamiento del enlace y en las decisiones de planificación de la red.

Figura 4

Tipología constructiva Iglesia de San Francisco en Quito.



Materiales de construcción patrimoniales y su impacto en la propagación

Las edificaciones patrimoniales del Centro Histórico de Quito fueron construidas mediante técnicas tradicionales y con materiales como adobe, ladrillo macizo, piedra volcánica y morteros de cal. Sus muros suelen tener un gran espesor y una alta densidad, debido a que fueron diseñados para brindar estabilidad estructural y conservar las condiciones térmicas del interior, sin tomar en cuenta la propagación de señales radioeléctricas.

Figura 5

Construcción en adobe - Patología de la construcción en tierra cruda en el área andina ecuatoriana



Nota. Tomado de: https://editorial.ucsg.edu.ec/

Desde una perspectiva electromagnética, este tipo de materiales tiende a introducir pérdidas importantes en las señales de radio. Su elevada densidad y sus propiedades eléctricas hacen que parte de la energía de la señal se absorba o se debilite al atravesar los muros, fenómeno que se vuelve más evidente en bandas de frecuencia medias como 3.5 GHz. A diferencia de muchas edificaciones contemporáneas, donde se utilizan materiales más ligeros, las construcciones patrimoniales pueden dificultar significativamente el paso de la señal y favorecer la aparición de condiciones de no línea de vista (NLOS) incluso en distancias relativamente cortas (ITU-R, 2017).

En el entorno de la Plaza e Iglesia de San Francisco, estas condiciones se ven reforzadas por la cercanía entre edificaciones y la continuidad de las fachadas. En varios casos, la señal que proviene de una estación base debe atravesar uno o más muros antes de llegar a espacios abiertos cercanos, debido a esto, las pérdidas asociadas a la penetración en fachadas y muros se convierten en un componente importante dentro del presupuesto de enlace.

Diversos estudios han reportado que materiales tradicionales como el adobe, el ladrillo macizo o la piedra pueden generar pérdidas de penetración superiores a las observadas en edificaciones modernas. Estas pérdidas dependen de factores como el espesor del muro, la humedad presente en los materiales y la frecuencia de operación del sistema (ITU-R, 2017) (Goldsmith, 2005). Dado que no se dispone de información detallada sobre las propiedades electromagnéticas de cada edificación del área de estudio, una alternativa práctica consiste en representar el efecto conjunto de estos materiales mediante pérdidas equivalentes que reflejen su impacto promedio sobre la propagación.

Figura 6

Materiales de construcción tradicionales utilizados en infraestructura arquitectónica.



Nota. Imagen de autoría propia

En este contexto, el entorno construido deja de ser únicamente una condición de fondo y pasa a formar parte del propio análisis del sistema, ya que condiciona las decisiones de diseño y los resultados obtenidos en la evaluación de la red.

Fundamentos de la propagación radioeléctrica en entornos urbanos

La propagación radioeléctrica en entornos urbanos puede analizarse desde una perspectiva de planificación a nivel de sistema mediante modelos empíricos de pérdida a gran escala, los cuales describen la potencia media recibida en función de la distancia y del entorno construido. Este tipo de modelos no busca representar de manera explícita los mecanismos electromagnéticos individuales del canal, sino capturar el efecto promedio que producen las edificaciones, la morfología urbana y los materiales de construcción sobre el enlace radioeléctrico (Rappaport T. , 2002).

En entornos urbanos caracterizados por una alta densidad edificatoria, la propagación de la señal radioeléctrica se ve condicionada por la presencia continua de obstáculos físicos, los cuales introducen pérdidas adicionales que afectan tanto la potencia recibida como el alcance efectivo de las estaciones base. Estas pérdidas están asociadas principalmente a la separación entre transmisor y receptor, a la altura relativa de las antenas y al nivel de obstrucción generado

por el entorno construido. En estas condiciones, el comportamiento del canal se aleja del supuesto de espacio libre, por lo que resulta necesario emplear modelos de pérdida a gran escala en el análisis de cobertura y capacidad (Goldsmith, 2005).

Desde la perspectiva de la planificación de redes, y en particular en estudios orientados a la densificación y al dimensionamiento de infraestructura, resulta más adecuado adoptar modelos empíricos y estadísticos que permitan describir el comportamiento promedio del sistema. Este tipo de aproximaciones facilita la evaluación comparativa de distintos escenarios de despliegue y se alinea con las recomendaciones de organismos internacionales, los cuales priorizan la representatividad estadística y la eficiencia computacional en simulaciones a nivel de sistema, por encima de la modelización detallada del canal electromagnético (ITU-R, 2017).

En zonas urbanas históricas y patrimoniales, como los centros históricos de ciudades latinoamericanas, la propagación radioeléctrica se ve adicionalmente afectada por la alta densidad edificatoria y el uso de materiales tradicionales de gran espesor. Estas características incrementan las pérdidas por bloqueo y penetración, dificultando la provisión de cobertura y capacidad adecuadas mediante soluciones convencionales de macrocelda. En este contexto, el análisis de propagación constituye la base para justificar la densificación de la red de acceso y evaluar sus implicaciones sobre la red de transporte o backhaul (Sun, Rappaport, Heath, Nix, & Rangan, 2014). Esta aproximación resulta adecuada para analizar escenarios densificados y derivar requerimientos de backhaul, que representan el eje central de la presente investigación (3GPP, 2020) .

Modelos empíricos de propagación

Los modelos clásicos de propagación han sido ampliamente utilizados en la planificación de redes móviles de generaciones anteriores debido a su simplicidad y bajo costo computacional. Entre los más representativos se encuentran los modelos Okumura-Hata, COST-231 Hata y Walfisch–Ikegami, los cuales permiten estimar la pérdida de propagación a partir de parámetros

macroscópicos como la distancia, la frecuencia y el tipo de entorno (urbano, suburbano o rural) (Hata, 1980).

El modelo Okumura-Hata se utilizó extensamente durante el despliegue de redes 2G y 3G debido a que fue concebido para frecuencias inferiores a 2 GHz. No obstante, las características de las redes 5G difieren de ese contexto, ya que emplean bandas de frecuencia más elevadas y suelen incorporar una mayor cantidad de nodos por unidad de área (COST 231, 1999).

En contraste, el modelo Walfisch–Ikegami incorpora parámetros relacionados con la configuración urbana, entre ellos la altura de los edificios y el ancho de las calles. Sin embargo, parte de una geometría relativamente regular, condición que no siempre se cumple en sectores históricos donde la disposición de las edificaciones presenta una mayor variabilidad (ITU-R, 2017).

En ambos casos, la información geográfica detallada del entorno no forma parte directa del modelo. Además, la representación de pérdidas asociadas a materiales constructivos con alta atenuación resulta limitada, un aspecto que adquiere mayor importancia en zonas urbanas densas y en edificaciones patrimoniales (3GPP, 2020).

Por esta razón, aunque los modelos clásicos constituyen una referencia importante en la evolución de la planificación celular, su uso en este tipo de escenarios resulta restringido. Esto motiva la adopción de modelos más generales, como el modelo Close-In, que permiten un análisis más acorde con las condiciones del entorno y los objetivos del presente estudio y un análisis más coherente con los objetivos de este estudio y con la evaluación de los requerimientos de backhaul (ITU-R, 2017) .

Finalmente, otros modelos más recientes, como WINNER II y el escenario Urban Microcell de 3GPP TR 38.901, permiten representar condiciones LOS y NLOS con mayor detalle. Sin embargo, requieren parámetros específicos del entorno que no se encuentran disponibles para cada calle, fachada y edificación del área analizada.

Modelo Close-In (CI)

El modelo Close-In (CI) es un modelo empírico de pérdida de propagación a gran escala que se fundamenta en una referencia física clara: **la pérdida en espacio libre a una distancia cercana al transmisor**, típicamente $d_0 = 1m$. A partir de esta referencia, el modelo describe la atenuación promedio de la señal en función de la distancia mediante un exponente de pérdida que caracteriza el entorno de propagación (Rappaport, MacCartney, Samimi, & Sun, 2015).

La expresión general del modelo CI se define en la ecuación (2.1):

$$PL^{CI}(f,d)[dB] = FSPL(f,1m)[dB] + 10nlog_{10}(d) + x_{\sigma}^{CI} \quad (2.1)$$

Donde FSPL (d_0) representa la pérdida en espacio libre a la distancia de referencia, n es el exponente de pérdida y d corresponde a la distancia tridimensional entre transmisor y receptor. Esta formulación permite separar de manera explícita el efecto de la frecuencia (contenido en la pérdida en espacio libre) del impacto del entorno, representado por el valor del exponente n (Rappaport, MacCartney, Samimi, & Sun, 2015), (Sun, y otros, 2016).

Exponente de pérdida n y valores típicos en entornos urbanos: El exponente de pérdida n del modelo Close-In depende fuertemente del tipo de entorno de propagación y refleja el grado de obstrucción y complejidad del entorno construido. En la literatura técnica se reportan rangos típicos de valores de n para distintos escenarios urbanos e interiores, los cuales han sido obtenidos a partir de mediciones experimentales y estudios de propagación a gran escala (Rappaport T. , 2002). La Tabla *2* muestra valores típicos del exponente de pérdida de distintos tipos de entorno. Estos valores se utilizan en este trabajo como referencia para la elección de los parámetros de propagación empleados en la simulación.

Tabla 2

Valores típicos del exponente de pérdida.

Entorno	$\boldsymbol{\gamma}$ rango
Macrocelda urbana	3.3 – 6.5

Small cell urbana	2.6 – 3.5
Edificio de oficinas (mismo piso)	1.6 – 3.5
Edificio de oficinas (múltiples pisos)	2 – 6
Tienda	1.8 – 2.2
Fábrica	1.6 – 3.3
Hogar	3

Nota. Tomado de: (Rappaport T. , 2002).

Con base en los valores presentados en la Tabla *2*, se adopta un exponente de pérdida n = 3.3 para la macrocelda, representativo de un entorno urbano denso. Para las small cells se utiliza n = 2.6, consistente con escenarios de corto alcance. Esta selección permite representar el comportamiento promedio de la propagación manteniendo una complejidad adecuada para la simulación.

Aplicación del modelo CI en la simulación: Desde el punto de vista de planificación, el modelo Close-In permite analizar cobertura y capacidad sin necesidad de modelar de forma detallada todos los fenómenos electromagnéticos del canal, lo que resulta adecuado para simulaciones a nivel de sistema y escenarios con múltiples nodos (ITU-R, 2017).

En esta investigación, el modelo CI se utiliza tanto para la macrocelda como para las small cells. En el caso de la macrocelda, se incorporan pérdidas adicionales asociadas al bloqueo generado por las edificaciones del entorno. Para las small cells, además del efecto de bloqueo, se consideran pérdidas relacionadas con penetración en muros y fachadas, debido a la cercanía entre transmisor y usuario dentro del escenario urbano analizado. Este enfoque permite mantener una formulación coherente del modelo de propagación, adaptándolo a las particularidades de cada tipo de celda sin introducir inconsistencias entre los escenarios analizados (3GPP, 2020).

Finalmente, la elección del modelo Close-In permite establecer una relación directa entre la propagación radioeléctrica y la planificación del backhaul. Al identificar zonas con mayor pérdida de propagación y, por ende, con déficit de cobertura y capacidad, el modelo CI facilita la determinación del número y la ubicación de small cells necesarias, así como la estimación de los requerimientos de capacidad de la red de transporte, que constituyen el eje central del presente estudio (ITU-R, 2017).

Atenuación por materiales de construcción patrimoniales

En este tipo de estudios, dichas pérdidas suelen representarse mediante modelos de pérdida a gran escala y términos equivalentes de penetración, los cuales permiten capturar el efecto promedio que tienen las edificaciones y sus materiales sobre la cobertura y la capacidad de la red (3GPP, 2020), como el conjunto de San Francisco. Estas construcciones presentan estructuras masivas y materiales tradicionales que tienden a incrementar la atenuación de la señal radioeléctrica.

En este tipo de edificaciones es habitual encontrar muros de gran espesor y el uso de materiales constructivos tradicionales, como adobe y tapial en los cerramientos, piedra tallada en cimentaciones y fachadas, así como madera en estructuras de pisos y cubiertas, complementadas con tejas de arcilla. Estas soluciones constructivas, características de los centros históricos, generan pérdidas significativas por penetración de la señal. En el caso específico del conjunto religioso de San Francisco, diversos estudios de caracterización patrimonial describen el empleo de materiales locales y técnicas constructivas tradicionales, además de la coexistencia de distintos morteros y elementos estructurales, lo que evidencia una alta heterogeneidad material dentro de estas edificaciones (Lara Calderón, 2023). Esta diversidad constructiva, junto con la elevada densidad edificatoria del entorno inmediato, favorece la aparición de enlaces en condiciones de línea de vista no directa (NLOS) y aumenta el efecto de atenuación asociado a fachadas y muros.

Desde la perspectiva del modelado en redes móviles, tanto el 3GPP como la ITU reconocen la importancia de considerar las pérdidas que se producen cuando la señal ingresa a los edificios. El 3GPP propone modelos de penetración, donde la pérdida total se representa mediante un término asociado al cruce de la pared exterior —dependiente del material y de la frecuencia— y otro término adicional relacionado con el entorno interior (3GPP, 2020). La ITU-R también propone modelos de pérdida de entrada a edificios, conocidos como building entry loss (BEL). Estos modelos estiman de forma estadística la atenuación que experimenta una señal al atravesar una edificación, sobre todo cuando no se dispone de información detallada del lugar (ITU-R, 2023). En zonas urbanas densas, estas pérdidas pueden afectar la cobertura y la capacidad de la red, por lo que se incorporan como factores adicionales de atenuación.

En la literatura técnica no es común encontrar valores específicos de pérdida de penetración para edificaciones patrimoniales. Esto se debe, principalmente, a la gran variabilidad en los materiales, espesores de muros y técnicas constructivas utilizadas en este tipo de construcciones, muchas de las cuales fueron levantadas en diferentes periodos históricos y han sufrido múltiples procesos de restauración o intervención.

Considerando este contexto, el objetivo de la presente investigación no es modelar con precisión electromagnética cada enlace hacia usuarios ubicados en el marco de las edificaciones, sino analizar distintos escenarios de cobertura y capacidad para estimar los requerimientos de backhaul asociados. Debido a estas limitaciones, se utiliza el modelo Close-In para calcular la pérdida de trayectoria y se añade un término de atenuación que representa el efecto de los muros y las fachadas. Como no se dispone de información detallada sobre los materiales y la estructura de cada edificio del área de estudio, esta aproximación permite incluir el efecto de las edificaciones patrimoniales sin aumentar demasiado la complejidad de la simulación.

Este análisis se relaciona directamente con el tema principal de la tesis: el dimensionamiento del backhaul. Las pérdidas producidas por los materiales de las edificaciones reducen el SINR y el throughput disponible para los usuarios, lo que puede aumentar las zonas

con déficit de capacidad. Ante esta situación, puede ser necesario instalar más small cells o mejorar su ubicación dentro del área urbana. La incorporación de estos nodos modifica la distribución del tráfico y añade nuevos enlaces que deben ser considerados por la red de transporte. Por esta razón, el dimensionamiento del backhaul debe tomar en cuenta la capacidad atendida por cada celda, utilizando métricas como los percentiles y la agregación espacial de la demanda.

Pérdidas equivalentes por fachada y penetración en edificios

En la literatura, modelos ampliamente utilizados, como los definidos por el 3rd Generation Partnership Project, consideran términos adicionales para representar la atenuación producida por obstáculos estructurales del entorno urbano, como edificaciones o materiales de construcción (3GPP, 2020).

Dentro de este enfoque, la pérdida asociada a la penetración en fachadas depende principalmente de los materiales de construcción y de la frecuencia de operación. 3GPP describe que esta pérdida puede modelarse a partir de la contribución de distintos materiales —como vidrio, concreto o madera— cuya atenuación se expresa como función de la frecuencia f (en GHz), mediante coeficientes específicos. Aunque el presente trabajo no utiliza directamente este modelo, su formulación respalda el uso de pérdidas equivalentes para representar el efecto de las edificaciones en estudios de planificación y considerando que no se dispone de información detallada sobre las características constructivas de cada edificación, resulta conveniente emplear modelos equivalentes que permitan representar estas pérdidas de forma agregada.

La recomendación ITU-R P.2109 propone un método para estimar la building entry loss (BEL) en un amplio rango de frecuencias, orientado a estudios de planificación donde no se dispone de información detallada para cada ubicación (ITU-R, 2023). Esta aproximación resulta adecuada para el presente trabajo, cuyo objetivo se centra en la comparación de escenarios y en la estimación de requerimientos de backhaul a partir de mapas de capacidad.

El efecto de las edificaciones se incorpora mediante términos adicionales de atenuación. En el caso de la macrocelda, se considera una penalización asociada al bloqueo producido por los edificios, mientras que para las small cells la atenuación depende del número de fachadas atravesadas por la señal, estableciendo un límite máximo para evitar pérdidas excesivas.

De esta manera, el efecto de las construcciones presentes en el entorno se incorpora a la simulación sin necesidad de modelar individualmente cada edificio. Esto permite evaluar cómo las edificaciones influyen sobre la cobertura, la capacidad y los requerimientos de transporte dentro del área de estudio.

Simulación a nivel de sistema

La evaluación del desempeño de redes móviles puede realizarse utilizando distintos niveles de simulación, dependiendo del objetivo del análisis. A diferencia de los análisis centrados en enlaces individuales, las simulaciones a nivel de sistema permiten evaluar el desempeño de la red en un escenario completo. Este enfoque es ampliamente utilizado en estudios de planificación y capacidad porque incorpora de forma conjunta aspectos como la ubicación de las estaciones base, la distribución espacial de usuarios y la interferencia entre celdas (Goldsmith, 2005; Andrews et al., 2014).

Dentro de este enfoque, el interés principal no está en modelar cada fenómeno electromagnético con alto nivel de detalle, sino en analizar métricas de desempeño como cobertura, SINR, throughput y capacidad. Debido a ello, las simulaciones a nivel de sistema suelen emplear modelos de propagación simplificados o empíricos, adecuados para representar el comportamiento promedio de la red en escenarios urbanos complejos (Molisch, 2012).

Herramientas de planificación como Xirio, Atoll y Mentum Planet incorporan metodologías de simulación utilizadas para el análisis de cobertura y capacidad en redes móviles. Estas plataformas permiten estudiar escenarios con varios nodos de acceso y distintos modelos de propagación. El canal puede representarse mediante modelos empíricos o mediante aproximaciones más complejas.

En estudios de planificación suelen emplearse modelos simplificados, porque facilitan el análisis de áreas extensas sin elevar demasiado el costo computacional. La simulación incluye la interacción entre la macrocelda y las small cells, además de la distribución espacial de la cobertura y la capacidad dentro del área de estudio. A partir de estos resultados se estiman los requerimientos de transporte asociados a cada nodo, relacionando el comportamiento de la red de acceso con las necesidades de backhaul del escenario evaluado.

Capítulo III

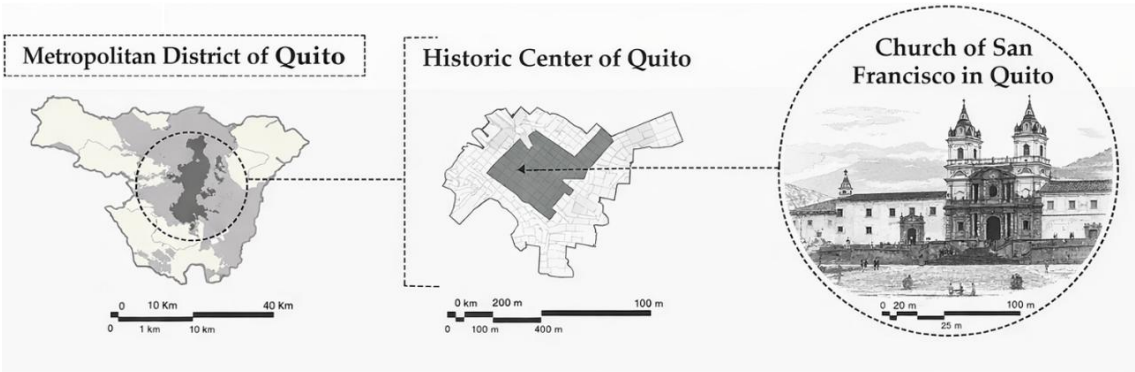
Metodología de simulación

Descripción del escenario de estudio

El escenario de estudio considerado en esta investigación corresponde al entorno inmediato de la Plaza de San Francisco y el conjunto arquitectónico de la Iglesia y Convento de San Francisco, ubicado en el Centro Histórico de Quito. Esta zona destaca por su elevada concentración urbana, edificaciones patrimoniales de gran valor histórico y una intensa actividad turística, lo que la convierte en un entorno especialmente desafiante para el despliegue y la planificación de redes 5G.

Figura 7

Descripción de la zona de estudio.



Con el fin de garantizar una representación realista del entorno urbano, el escenario se construye a partir de información geográfica real y verificable, siguiendo una secuencia

metodológica que permite establecer una correspondencia directa entre el espacio físico y el modelo de simulación. En particular, se emplea una aproximación progresiva que parte de la observación del entorno real, continúa con la extracción de datos geográficos estructurados y culmina con su representación computacional en MATLAB.

La Figura 8 muestra una vista satelital del área de estudio obtenida desde Google Maps, donde se identifican claramente la Plaza de San Francisco, la Iglesia y Convento de San Francisco y las edificaciones circundantes. Esta vista permite apreciar la complejidad geométrica del entorno, la disposición irregular de las construcciones y la estrecha relación entre espacios abiertos y edificaciones patrimoniales, características que influyen directamente en la propagación radioeléctrica.

Figura 8

Descripción de la zona de estudio.



A partir de esta delimitación espacial, la información geográfica del área de estudio se obtiene mediante la plataforma OpenStreetMap (OSM), la cual proporciona datos vectoriales abiertos y estructurados del entorno urbano, incluyendo los contornos de las edificaciones representados mediante polígonos. Estos contornos se emplean como insumo principal para el modelado del bloqueo y la penetración de la señal radioeléctrica en el entorno urbano. La información se obtiene mediante Overpass API, utilizada para filtrar y descargar las geometrías

ubicadas dentro del área delimitada. La Figura *9* presenta la representación del sector construida con estos datos, donde se observan los polígonos de las edificaciones y su distribución espacial. Esta imagen permite comparar el sector real con la información geográfica empleada como entrada en la simulación.

Figura 9

Zona de análisis desde Open Streat Map (OSM)



Los datos vectoriales extraídos de OpenStreetMap se procesan en MATLAB, donde se transforman a un sistema de coordenadas locales y se representan gráficamente para incorporarlos al modelo de simulación. Figura 10 muestra la representación del entorno urbano del área de estudio, donde los polígonos corresponden a las edificaciones presentes alrededor de la Plaza e Iglesia de San Francisco.

Figura 10

Representación de la zona de estudio en Matlab.



Esto permite relacionar el entorno real con el escenario simulado, de manera que los resultados reflejen de forma más cercana el comportamiento de la red 5G en el Centro Histórico de Quito.

***Rasterización del entorno urbano*:** A partir de los datos vectoriales obtenidos, el entorno urbano se convierte en una representación rasterizada para poder usarlo en la simulación. Esto básicamente implica dividir el área de estudio en una malla bidimensional regular, donde cada celda representa una pequeña parte del espacio.

En la malla de simulación, las edificaciones se representan mediante una máscara binaria que diferencia las zonas construidas de los espacios abiertos. Esta representación se utiliza para identificar bloqueos y cruces de muros entre el transmisor y el receptor. También sirve como base para calcular los mapas de potencia recibida, SINR y throughput.

La resolución seleccionada permite representar la distribución de las edificaciones del área de estudio sin utilizar modelos geométricos más complejos. Esto facilita el procesamiento de la simulación en toda la zona analizada. Aunque la forma de cada edificio no se representa con exactitud, el nivel de detalle es suficiente para estudiar el comportamiento general de la red

e identificar tendencias de cobertura, zonas con déficit y resultados que posteriormente se utilizan para estimar los requerimientos de backhaul.

Representación 2.5D del entorno urbano

Para representar el área de estudio se utilizó un modelo 2.5D, construido a partir de la geometría en planta de las edificaciones y de la asignación de alturas representativas. Esta representación permite incluir los bloqueos y las condiciones de línea de vista sin recurrir a un modelo tridimensional completo. Durante la construcción del escenario se observó que las edificaciones presentan alturas relativamente similares, en concordancia con las características predominantes del sector patrimonial. No obstante, también existen ciertas estructuras con una altura superior al promedio, capaces de generar obstrucciones más significativas sobre las trayectorias de propagación.

Por este motivo, el modelo no asigna una altura específica a cada edificio del escenario, sino que utiliza un conjunto reducido de valores representativos. Se considera una altura estándar para la mayor parte de las edificaciones y una altura adicional para aquellas estructuras que sobresalen del entorno y pueden generar condiciones NLOS en determinados enlaces.

Esta aproximación conserva las características principales de la geometría urbana sin requerir una descripción individual de cada construcción. De esta manera, es posible representar el efecto de las edificaciones sobre la propagación dentro del área de estudio sin aumentar innecesariamente la complejidad de la simulación.

También se incorpora la altura promedio del usuario, fijada en 1.5 m, con el fin de representar dispositivos móviles utilizados a nivel peatonal. De igual forma, las alturas de la macrocelda y de las small cells se definen de manera independiente de las edificaciones donde se encuentran instaladas. Esto permite evaluar de forma más realista las condiciones de línea de vista entre los distintos nodos de acceso y los usuarios distribuidos en el escenario.

La interacción entre las alturas y la distribución espacial de las edificaciones permite identificar trayectorias LOS y NLOS dentro del entorno estudiado. Este criterio guarda relación

con los modelos de propagación utilizados por 3GPP TR 38.901, donde el comportamiento del enlace se diferencia de acuerdo con la existencia o no de línea de vista entre el transmisor y el receptor. Además, las pérdidas asociadas al cruce de muros y fachadas se incorporan tomando como referencia los criterios de pérdida de entrada en edificaciones establecidos por la ITU-R.

Para verificar que el escenario implementado en MATLAB mantenga relación con el entorno real, la geometría obtenida de OpenStreetMap fue comparada con la distribución observable de las edificaciones, calles y espacios abiertos del sector de la Plaza e Iglesia de San Francisco. También se revisó que las ubicaciones asignadas a la macrocelda y a las small cells correspondan con puntos existentes dentro del área de estudio. Esta comparación permitió comprobar la coherencia geométrica del modelo y respaldar que los principales bloqueos considerados en la simulación tienen correspondencia con la distribución física del entorno.

Sin embargo, esta verificación es de tipo indirecto, debido a que no se realizaron mediciones radioeléctricas de potencia recibida, SINR o throughput en el lugar. Por lo tanto, el modelo 2.5D no busca reproducir de forma exacta todos los fenómenos electromagnéticos presentes en el escenario real, sino representar el efecto dominante de la morfología urbana sobre la cobertura y la capacidad de la red. El uso de criterios aceptados por 3GPP e ITU-R permite sustentar el procedimiento empleado, aunque una validación completa requeriría comparar los resultados simulados con mediciones realizadas en campo.

La Figura 11 muestra la representación 2.5D utilizada en la simulación, incluyendo las edificaciones del entorno, la ubicación de la macrocelda y las small cells consideradas en el escenario densificado.

Figura11

Representación dimensional aplicada en la simulación



Modelado de Macrocelda

La macrocelda representa la capa principal de cobertura de la red de acceso y constituye el punto de referencia para evaluar las limitaciones de capacidad en el entorno analizado representándose como una estación base 5G que opera en banda media y proporciona cobertura outdoor en el Centro Histórico de Quito, específicamente en el sector de la Plaza e Iglesia de San Francisco. Para definir sus características se utilizan parámetros representativos de despliegue 5G, tomados de documentación técnica y recomendaciones de organismos como 3GPP e ITU-R. La Tabla *3* presenta los valores empleados en la simulación, seleccionados para representar condiciones típicas de operación.

Los parámetros seleccionados no corresponden a un equipo comercial específico, sino que se utilizan para representar condiciones típicas de operación de una macrocelda dentro del escenario analizado. A continuación, se detallan los principales parámetros considerados para la modelación de las small cells en la simulación.

Tabla 3

Parámetros para el modelamiento de la macrocelda

Parámetro	Descripción	Referencia
Frecuencia portadora	3.5 GHz	(ITU-R, 2017)
Ancho de banda	100 MHz	(3GPP, 2020)
Potencia de transmisión	30 dBm	(Rappaport, MacCartney, Samimi, & Sun, 2015).
Altura de antena (Tx)	12 m	Supuesto del estudio
Altura del receptor (UE)	1.5 m	Supuesto del estudio
Exponente de pérdida n	3.3	(Goldsmith, 2005).
Distancia de referencia $(\boldsymbol{d_0})$	1 m	Modelo Close-in

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

***Modelo de propagación y bloqueo por edificaciones*:** La simulación de la macrocelda se basa en un modelo de propagación de gran escala que permite representar el comportamiento promedio de la señal sobre el área de estudio. En este tipo de análisis el objetivo principal es evaluar la cobertura radioeléctrica considerando la pérdida por distancia y el efecto del entorno urbano, sin modelar de forma detallada todos los fenómenos electromagnéticos del canal (Rappaport, MacCartney, Samimi, & Sun, 2015).

Como modelo base de pérdida de trayectoria se adopta el modelo Close-In (CI), ampliamente utilizado en estudios de propagación para sistemas 5G debido a su formulación físicamente fundamentada y su estabilidad en diferentes bandas de frecuencia (Rappaport, MacCartney, Samimi, & Sun, 2015) (Rappaport, Jr, Daniels, & Murdock, 2017). La pérdida de trayectoria se calcula a partir de la distancia tridimensional entre el transmisor y cada punto receptor del escenario, considerando una altura de transmisión de 12 m y una altura de recepción de 1.5 m. El modelo CI se expresa en la ecuación (3.1):

$$PL_{f,d}^{CI}[dB] = FSPL(f, 1m)[dB] + 10nlog_{10}(d) + x_{\sigma}^{CI} \quad (3.1)$$

donde $FSPL(d_0)$ corresponde a la pérdida en espacio libre evaluada a la distancia de referencia d_0, n es el exponente de pérdida y $d$la distancia entre transmisor y receptor. En esta expresión, el término $FSPL(d_0)$ se calcula como $FSPL(d_0) = 32.4 + 20\log_{10}(f_{GHz})$, donde f es la frecuencia en GHz. En la simulación se utiliza $d_0 = 1$m y un exponente de pérdida $n = 3.3$, valores representativos de entornos urbanos con presencia de obstrucciones.

El análisis de bloqueo se realiza mediante una aproximación 2.5D que se detalló previamente en el capítulo II.

Para el escenario de simulación se considera una altura representativa para la mayoría de las edificaciones, aunque el modelo también permite asignar alturas distintas a estructuras específicas cuando se dispone de esa información. De esta manera, es posible representar construcciones que generan un mayor efecto de bloqueo dentro del entorno urbano.

Si la trayectoria entre transmisor y receptor intersecta una edificación cuya altura supera la altura del rayo en ese punto, la edificación se considera bloqueante. En cambio, cuando no existe intersección con estructuras urbanas, el enlace se modela únicamente mediante la pérdida de trayectoria del modelo CI, representando una condición equivalente de línea de vista (LOS). En presencia de obstrucciones, se introduce una pérdida adicional equivalente de tipo NLOS que representa el efecto del bloqueo producido por las edificaciones. Este tipo de modelado es consistente con metodologías de propagación utilizadas en estudios de sistemas celulares, donde la degradación adicional del enlace en condiciones NLOS se representa mediante pérdidas adicionales o penalizaciones empíricas asociadas a la presencia de obstáculos (Rappaport, MacCartney, Samimi, & Sun, 2015), (3GPP, 2020).

En la simulación, esta penalización se define mediante un término inicial de 38 dB para el primer edificio bloqueante y un incremento de 6 dB por cada edificio adicional interceptado por la trayectoria directa, estableciendo una saturación máxima de 60 dB. De esta manera, la degradación del enlace depende tanto de la distancia como del nivel de obstrucción acumulado a lo largo del trayecto, lo cual es coherente con modelos de propagación urbanos en los que la

pérdida adicional en condiciones NLOS se asocia a la presencia de edificaciones entre el transmisor y el receptor (Rappaport, MacCartney, Samimi, & Sun, 2015) (3GPP, 2020).

Este tipo de aproximación es consistente con metodologías de planificación radioeléctrica en las que los efectos del entorno urbano se modelan mediante representaciones simplificadas, evitando técnicas deterministas de alta complejidad como el trazado de rayos, que requieren información detallada de materiales y geometría tridimensional (ITU-R, 2017). La potencia recibida final se obtiene restando a la potencia de transmisión tanto la pérdida por distancia del modelo CI como la pérdida adicional asociada al bloqueo por edificaciones, lo que permite generar mapas de cobertura que reflejan la influencia espacial de la geometría urbana (Goldsmith, 2005) (3GPP, 2020).

Modelado de Small cell

La incorporación de small cells en el escenario de estudio responde a la necesidad de incrementar la capacidad de la red en zonas donde la macrocelda presenta limitaciones, la atenuación introducida por edificaciones históricas reduce significativamente en la experiencia de conexión percibida por los usuarios, lo que hace necesaria una estrategia de densificación de la red de acceso.

Desde el punto de vista de la simulación, las small cells se modelan como nodos de corto alcance y baja potencia orientados a mejorar la capacidad en zonas con alta concentración de usuarios. Este tipo de despliegue suele utilizarse en zonas donde existe una elevada concentración de usuarios, como ocurre en áreas turísticas y espacios públicos con alta demanda de conectividad.

En la simulación, las small cells se configuran con niveles de potencia inferiores a los de la macrocelda, tomando como referencia valores habitualmente utilizados en estudios de redes 5G urbanas (3GPP, 2020) (ITU-R, 2017). Asimismo, se considera una altura de instalación reducida, asociada a ubicaciones habituales como postes, fachadas y otros elementos presentes en el entorno urbano.

Los parámetros utilizados no buscan representar un equipo comercial en particular, sino aproximar el comportamiento general de este tipo de nodos dentro de una simulación a nivel de sistema. Esto permite evaluar tendencias de cobertura y capacidad en escenarios densificados sin depender de configuraciones específicas de hardware. A continuación, se detallan los principales parámetros considerados:

Tabla 4

Parámetros técnicos del modelamiento de small cell

Parámetro	Descripción	Referencia
Frecuencia portadora	3.5 GHz	(ITU-R, 2017)
Ancho de banda	100 MHz	(3GPP, 2020)
Potencia de transmisión	20 dBm	(Rappaport, MacCartney, Samimi, & Sun, 2015).
Altura de antena (Tx)	5-8 m	Supuesto del estudio
Altura del receptor (UE)	1.5 m	Supuesto del estudio
Exponente de pérdida n	2.6	(Goldsmith, 2005).
Distancia de referencia $(\boldsymbol{d_0})$	1 m	Modelo Close-in

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

Modelado de pérdidas por muros y fachadas

En este trabajo, las pérdidas asociadas a muros y fachadas se modelan mediante un método geométrico basado en la trayectoria entre transmisor y receptor. A lo largo de esta trayectoria se identifican las intersecciones con edificaciones representadas en la máscara urbana del escenario. Cada transición desde espacio abierto hacia una edificación se interpreta como el cruce de un muro o fachada, al cual se le asigna una pérdida adicional equivalente. De

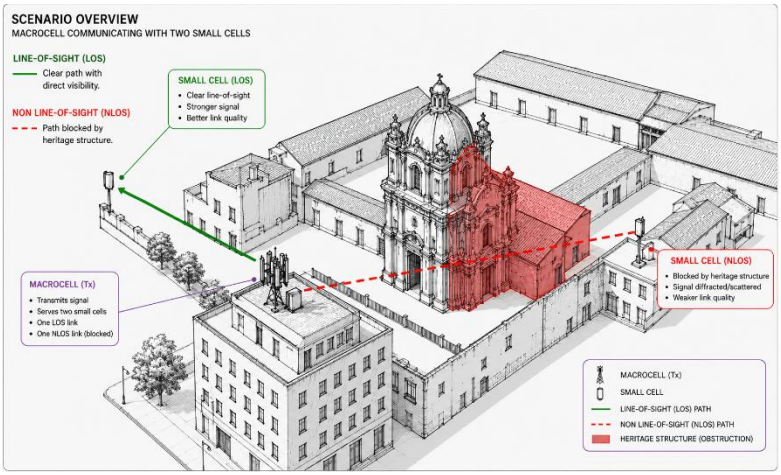
esta manera se incorpora el efecto agregado de la densidad edificatoria del entorno dentro del cálculo de la potencia recibida.

Para evitar que trayectorias altamente obstruidas produzcan pérdidas excesivas dentro de la simulación, se establece un límite máximo para la pérdida acumulada asociada a muros. Este criterio permite mantener la estabilidad del modelo y refleja el hecho de que, a partir de cierto nivel de obstrucción, el enlace radioeléctrico se vuelve prácticamente inutilizable y aumentos adicionales de pérdida no modifican de manera significativa las métricas de capacidad evaluadas.

Este modelado resulta relevante para el análisis desarrollado en esta investigación, ya que las pérdidas adicionales introducidas por el entorno construido influyen directamente en el SINR y en el throughput alcanzable por los usuarios. Como consecuencia, estas condiciones afectan la distribución de cobertura de la macrocelda y justifican la incorporación de small cells como mecanismo de densificación, lo cual tiene implicaciones directas en los requerimientos de capacidad de la red de transporte analizados en capítulos posteriores. En la Figura 12 se presenta una representación geométrica del entorno edificado considerado en este estudio, la cual permite visualizar las condiciones de bloqueo que motivan la adopción de este tipo de modelado equivalente.

Figura 12

Representación del modelado de pérdidas por muros o fachadas



***Justificación y calibración de los parámetros de pérdida equivalente*:** Los valores de pérdida adicional adoptados en la simulación no deben interpretarse como la atenuación exacta de un muro individual, sino como una penalización NLOS equivalente que resume el efecto conjunto del bloqueo producido por las edificaciones del entorno. Esta interpretación es consistente con el uso de modelos de canal a nivel de sistema, donde la propagación en condiciones NLOS y las pérdidas de penetración se representan mediante términos agregados, en lugar de modelar de forma detallada cada material, cada espesor y cada trayectoria particular.

Para representar el efecto de bloqueo generado por las edificaciones del entorno, se adopta una penalización inicial de 38 dB. Este valor permite modelar de forma aproximada las pérdidas adicionales producidas por fachadas continuas y estructuras patrimoniales presentes en el escenario analizado. Esta elección no pretende reproducir una medición puntual, sino mantenerse dentro del orden de magnitud de las pérdidas de penetración y bloqueo reportadas en la literatura y en recomendaciones internacionales, donde la pérdida asociada a la entrada a edificios puede ubicarse en varias decenas de decibelios y depende de la frecuencia, del tipo de construcción y de la configuración geométrica del enlace.

De forma similar, se incluye un aumento de pérdida por cada edificio adicional y se establece un valor máximo para esta penalización. A medida que el trayecto atraviesa más obstáculos, la potencia recibida disminuye y el enlace pierde utilidad. Sin embargo, una vez alcanzado cierto nivel de atenuación, añadir más pérdida al modelo no cambia de manera importante la clasificación del enlace, ya que este se considera prácticamente inutilizable. Por esta razón, en lugar de representar cada obstáculo de forma individual, se aplica una penalización incremental con un límite máximo, adecuada para una simulación comparativa orientada a la planificación.

De esta forma, el valor de 38 dB no se toma como una constante fija, sino como un parámetro de calibración dentro de un rango razonable para escenarios con bloqueo urbano y pérdidas por penetración en edificaciones.

Modelado de interferencia y cálculo de SINR

El desempeño de la red no depende únicamente de la potencia recibida, sino también de la interferencia generada por las demás celdas activas, aspecto que adquiere mayor importancia en escenarios densificados con small cells. Por esta razón, además del análisis de cobertura, se calcula el SINR para evaluar la calidad del enlace y la capacidad disponible en cada punto del escenario.

En la simulación, la estación servidora se define como aquella que entrega la mayor potencia recibida, mientras que la interferencia se obtiene a partir de la suma de las contribuciones del resto de celdas presentes en la red. Con esta configuración es posible analizar la interacción entre la macrocelda y las small cells dentro del escenario considerado.

El ruido térmico se obtiene a partir del ancho de banda del sistema y del factor de ruido del receptor. A partir de estos parámetros, el SINR se calcula para cada punto de la malla considerando la potencia recibida desde el nodo servidor, la interferencia generada por el resto de las celdas activas y la contribución del ruido térmico. Esta formulación es ampliamente utilizada en análisis de redes celulares, ya que permite evaluar de manera consistente el impacto

conjunto de la densificación, la potencia de transmisión y el entorno construido sobre la calidad del enlace radioeléctrico (3GPP, 2020) (ITU-R, 2017), y se detalla en la ecuación (3.2):

$$N_{dBm} = -172 + 10\log_{10}(B) + NF \quad (3.2)$$

Esta hipótesis considera una situación de alta carga de tráfico, similar a la que puede presentarse en zonas turísticas del Centro Histórico de Quito. Aunque en una red real la demanda varía a lo largo del tiempo, mantener una carga constante facilita la comparación entre escenarios y permite analizar el comportamiento de la red bajo condiciones exigentes.

Los valores de SINR obtenidos se utilizan posteriormente para estimar la eficiencia espectral y el throughput disponible para los usuarios dentro del área de estudio. Además, el análisis espacial del SINR permite identificar zonas donde la interferencia limita el desempeño del sistema, información fundamental para justificar la ubicación de small cells y para dimensionar los requerimientos de transporte asociados al backhaul y al mid-haul.

Estimación de capacidad y throughput

A partir del mapa de SINR, se calcula la capacidad y el throughput percibido por los usuarios, métricas directamente relacionadas con el desempeño del sistema y necesarias para el dimensionamiento de la red de transporte. En redes celulares, el throughput alcanzable por un usuario depende directamente de la eficiencia espectral del enlace, la cual se encuentra asociada al SINR y a los esquemas de modulación y codificación utilizados por el sistema.

En esta investigación, la relación entre SINR y eficiencia espectral se representa mediante una expresión basada en la fórmula de Shannon, incorporando además un factor de eficiencia para aproximar pérdidas relacionadas con señalización, control, codificación y asignación de recursos dentro de la red, a continuación se detalla en la ecuación (3.3):

$$SINR = \frac{P_s}{\sum_{i \neq s} P_i + N} \quad (3.3)$$

donde P_s corresponde a la potencia recibida del nodo servidor, P_i a las potencias provenientes de las celdas interferentes y N al ruido térmico del receptor, calculado como se detalla en (3.4):

$$N_{dBm} = -174 + 10\log_{10}(B) + NF \quad (3.4)$$

El throughput en cada punto de la malla se calcula multiplicando la eficiencia espectral obtenida por el ancho de banda del sistema, de tal manera que a partir del SINR se obtiene la eficiencia espectral mediante la ecuación (3.5):

$$SE = \eta\log_2(1 + SINR) \quad (3.5)$$

y el throughput alcanzable por el usuario se calcula como se detalla en (3.6):

$$T = B \cdot SE \quad (3.6)$$

De este modo, se generan mapas espaciales de throughput, que permiten identificar zonas con desempeño adecuado y áreas donde la capacidad resulta insuficiente para satisfacer los requerimientos del servicio.

En esta etapa, la estimación de capacidad y throughput permite relacionar el desempeño de la red de acceso con los requerimientos de transporte asociados al escenario analizado. A partir de los resultados obtenidos es posible estimar la capacidad que debe soportar la red de backhaul, considerando el tráfico generado por la macrocelda y las small cells dentro del área de estudio.

Para representar de mejor manera el comportamiento de la red, el análisis no se limita únicamente a valores promedio de throughput. También se utilizan percentiles como p50, p90 y p95, los cuales permiten identificar tanto el comportamiento típico del sistema como condiciones de mayor demanda de tráfico, especialmente relevantes en zonas con alta concentración de usuarios (ITU-R, 2017).

Además, se evalúa la proporción de área que presenta déficit de capacidad a partir de umbrales mínimos y objetivos de throughput. Estas zonas permiten identificar sectores donde la

cobertura o la capacidad resultan insuficientes y donde la densificación mediante small cells puede aportar mejoras en el desempeño de la red.

Cálculo de métricas de capacidad: Para evaluar el desempeño general del sistema y estimar los requerimientos asociados a cada nodo de acceso, se utilizan métricas estadísticas obtenidas a partir de los mapas de throughput generados en la simulación.

El área servida por cada celda se determina con un criterio de asociación basado en la mayor potencia recibida. Para cada punto del escenario, se identifica la estación base que entrega el nivel de señal más alto y se asigna ese punto a dicha celda. Con esta asignación, el área servida se calcula con (3.7):

$$A_i(\%) = \frac{N_i}{N_{total}} * 100 \tag{3.7}$$

donde N_i es el número de puntos a los que se da servicio por la celda i y N_{total} es el número total de puntos del escenario.

El throughput promedio (Tmean) se calcula como el valor medio del throughput en todos los puntos pertenecientes al área servida por cada celda, como se explica en (3.8):

$$T_{mean,i} = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} T_k \tag{3.8}$$

donde $T_k$corresponde al throughput en cada punto del área servida.

Adicionalmente, se calculan percentiles de la distribución de throughput, en particular p50, p90 y p95. Estos percentiles se obtienen ordenando los valores de throughput de menor a mayor y seleccionando el valor correspondiente al porcentaje acumulado deseado.

Por otra parte, el porcentaje de puntos en capacidad máxima se define en (3.9):

$$P_{cap,i}(\%) = \frac{N_{cap,i}}{N_i} * 100 \tag{3.9}$$

donde $N_{cap,i}$ corresponde al número de puntos en los que el throughput alcanza el valor máximo definido en la simulación. Estas métricas permiten relacionar la distribución espacial de la capacidad con el desempeño de la red de acceso y constituyen la base para el análisis de los requerimientos de transporte desarrollado en capítulos posteriores.

Criterios para evaluación de requerimiento de backhaul

Es importante destacar que, si bien en arquitecturas 5G se distingue entre front-haul, mid-haul y backhaul, el presente estudio se centra en el segmento de transporte que agrega el tráfico desde las estaciones base hacia la red central, el cual corresponde funcionalmente al mid-haul. No obstante, desde el punto de vista del dimensionamiento de capacidad, este segmento se trata de forma equivalente al backhaul, ya que ambos cumplen la función de transporte agregado del tráfico hacia la red núcleo.

Bajo esta consideración, los criterios adoptados permiten relacionar directamente el rendimiento del enlace inalámbrico con las exigencias de capacidad de la red de transporte. En este contexto, y a partir de las métricas de throughput obtenidas para cada celda, se estiman los requerimientos de capacidad considerando el tráfico agregado generado por los nodos de acceso (3GPP, 2018).

El dimensionamiento del transporte se realiza a partir del throughput asociado a cada celda y del área donde cada nodo actúa como servidor dominante. Con ello se obtiene una estimación de la carga de tráfico asociada a cada small cell dentro del escenario analizado.

El análisis también considera percentiles de throughput como p90 y p95, utilizados habitualmente para describir situaciones donde la demanda de tráfico es elevada (ITU-R, 2017).

Adicionalmente, las zonas que no alcanzan los umbrales de capacidad establecidos permiten identificar sectores donde la incorporación de nuevos nodos puede aportar mejoras en el desempeño de la red, como se mencionó previamente este proceso incrementa el número de nodos desplegados y, en consecuencia, la capacidad agregada que debe ser soportada por la

infraestructura de transporte, estableciendo así una relación directa entre las condiciones del entorno urbano, la estrategia de despliegue y los requerimientos de backhaul.

Capítulo IV

Simulación

Escenario base, cobertura y capacidad con macrocelda

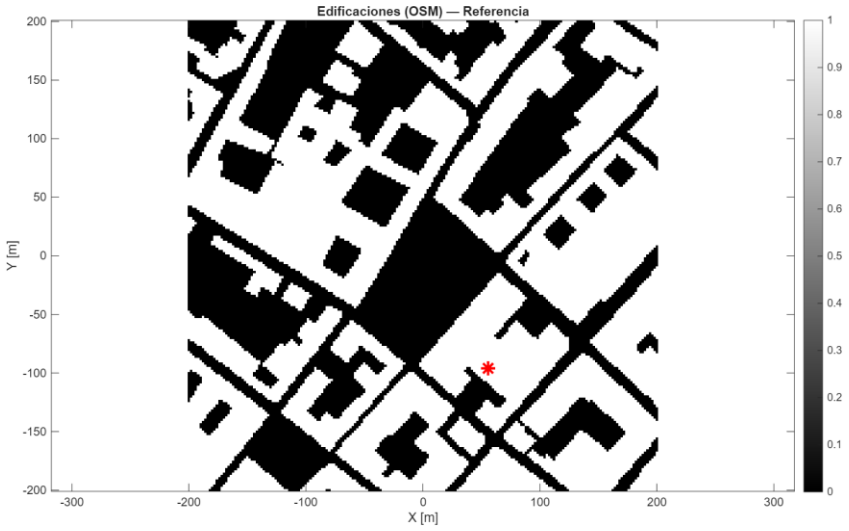
En esta sección se presentan los resultados del escenario base, en el cual el servicio es provisto únicamente por una macrocelda operando en banda media (3.5 GHz) y los parámetros especificados en el anterior capitulo. Este escenario sirve como punto de referencia para comparar posteriormente el efecto de la densificación mediante small cells dentro del área de estudio. A partir de él es posible identificar el comportamiento de la red cuando el servicio depende únicamente de la macrocelda y observar cómo la geometría urbana influye sobre la distribución de cobertura y capacidad.

Los resultados obtenidos se presentan mediante mapas de potencia recibida, SINR y throughput, los cuales permiten visualizar las variaciones espaciales del desempeño de la red dentro del entorno analizado. De forma complementaria, también se incluyen métricas estadísticas como throughput promedio, percentiles y porcentaje de área en déficit de capacidad, en conjunto, estos indicadores permiten evaluar el desempeño global del escenario base y establecer una referencia para el análisis comparativo con el escenario densificado presentado en la siguiente sección.

Representación del entorno urbano: La Figura 13 presenta la representación digital del entorno urbano correspondiente al sector de la Plaza e Iglesia de San Francisco según la metodología descrita en el Capítulo 3. En esta representación, las áreas correspondientes a edificaciones se muestran en color oscuro, mientras que los espacios abiertos —como plazas, calles y áreas peatonales— se representan en tonos claros.

Figura 13

Representación del entorno de estudio.

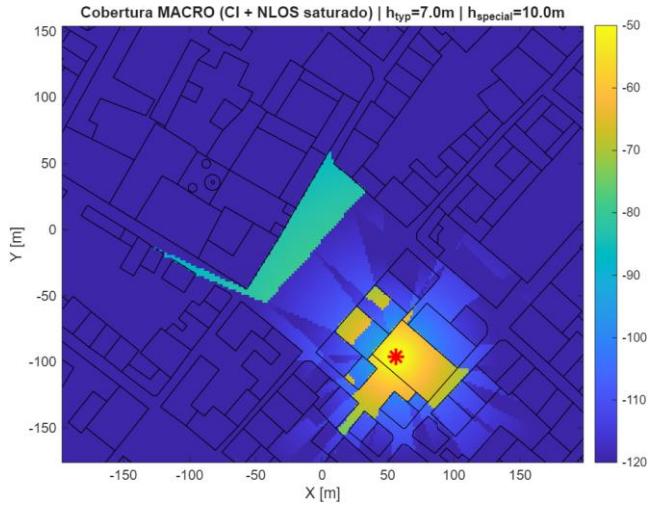


La estación base macro se identifica con un marcador rojo y se encuentra en el sector sur de la plaza. Su ubicación coincide con una infraestructura real presente en la zona, lo que permite vincular los resultados de la simulación con un escenario físico. También se distingue el espacio abierto de la plaza de las áreas cercanas, donde predominan las edificaciones continuas y los corredores urbanos estrechos. Esta distribución genera variaciones en las condiciones de propagación a lo largo del escenario, lo cual se refleja posteriormente en los mapas de cobertura y capacidad. En consecuencia, la representación mostrada en la Figura 13 no solo cumple una función ilustrativa, sino que constituye la base geométrica sobre la cual se aplican los modelos de propagación y bloqueo evaluados en las siguientes subsecciones.

Mapa de potencia recibida (CI + bloqueo por edificaciones): La Figura 14 presenta el mapa de potencia recibida correspondiente al escenario base con una única macrocelda, empleando el modelo Close-In (CI) combinado con penalización por bloqueo de edificaciones y saturación de pérdida, conforme a lo descrito en capítulos anteriores. La escala de colores representa niveles de potencia en dBm, donde los tonos más cálidos indican mayor intensidad de señal y los tonos fríos corresponden a regiones con señal debilitada.

Figura 14

Mapa de potencia en el escenario de Macrocelda.



Aunque el modelo CI establece una disminución progresiva de la potencia con la distancia, la distribución observada en el escenario no depende únicamente de este efecto. La presencia de edificaciones modifica la propagación de la señal y genera zonas con niveles de potencia considerablemente inferiores a los esperados por distancia.

En el mapa pueden identificarse sectores donde la potencia recibida desciende incluso por debajo de −110 dBm. Estas regiones coinciden principalmente con sectores donde existen edificaciones continuas o corredores urbanos más cerrados, evidenciando el efecto de bloqueo producido por las estructuras del entorno, también puede observarse que la propagación no ocurre de manera uniforme en todas las direcciones.

En áreas abiertas, como la plaza y algunos corredores con menor obstrucción, la señal mantiene mejores niveles incluso a distancias similares respecto a la macrocelda. Esto indica que el comportamiento de la cobertura depende no solo de la distancia al transmisor, sino también de la interacción entre la trayectoria de propagación y la distribución de las edificaciones presentes en el escenario.

Desde el punto de vista técnico, estos resultados indican que la macrocelda aún está operando con parámetros típicos de planificación en banda media, no garantiza una cobertura

homogénea en el entorno de estudio. La presencia de sombras de señal constituye un factor estructural que afecta la calidad del enlace y anticipa posibles limitaciones en términos de SINR y capacidad, las cuales serán analizadas en las siguientes subsecciones.

Selección de puntos estratégicos de evaluación: Para complementar el análisis de los mapas, se definieron cinco puntos dentro del entorno de estudio que permiten evaluar el desempeño de la red de forma puntual. La elección de estos puntos se basa en la geometría del sector y en zonas de interés dentro del entorno de la Plaza e Iglesia de San Francisco.

Tabla 5

Descripción de puntos utilizados en el estudio.

Punto de estudio	**Condición del punto**
P1	Debajo de la fachada del edificio trasmisor (NLOS).
P2	Ubicado en la Plaza, tiene línea de vista, pero afectado por la distancia a la que se encuentra de la estación.
P3	Punto elegido para análisis de requerimientos de backhaul, ubicado dentro de la fachada de la Iglesia San Francisco.
P4	Punto elegido para análisis de requerimiento de capacidad, ubicado en el callejón con mucha afluencia de usuarios.
P5	Ubicación estratégica, detrás de un edificio más alto que la estación.

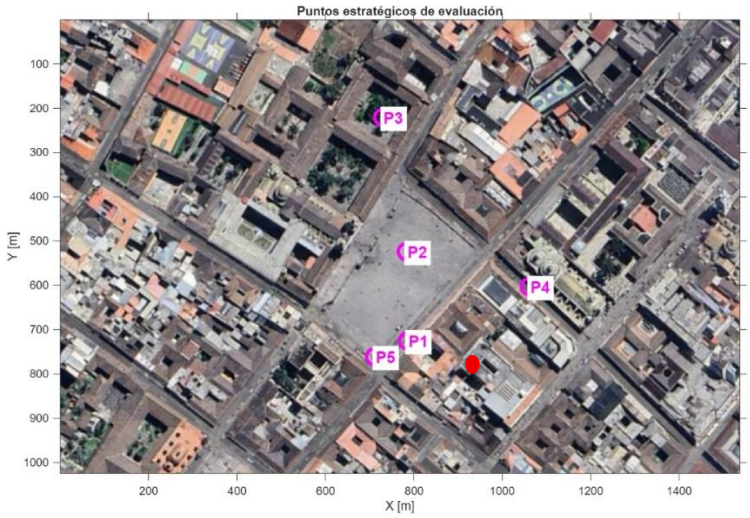
Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

Esta selección permite contrastar escenarios con diferente número de edificaciones bloqueantes, variación en distancia y orientación respecto a la estación base, proporcionando una visión más detallada del comportamiento del SINR y del throughput más allá del análisis puramente gráfico. La ubicación de estos puntos se muestra en la Figura 15, tanto en la representación rasterizada utilizada para la simulación como en el contexto geográfico real del

entorno urbano. Esta doble representación facilita la interpretación de los resultados y refuerza la correspondencia entre el modelo digital y el escenario físico del Centro Histórico de Quito.

Figura 15

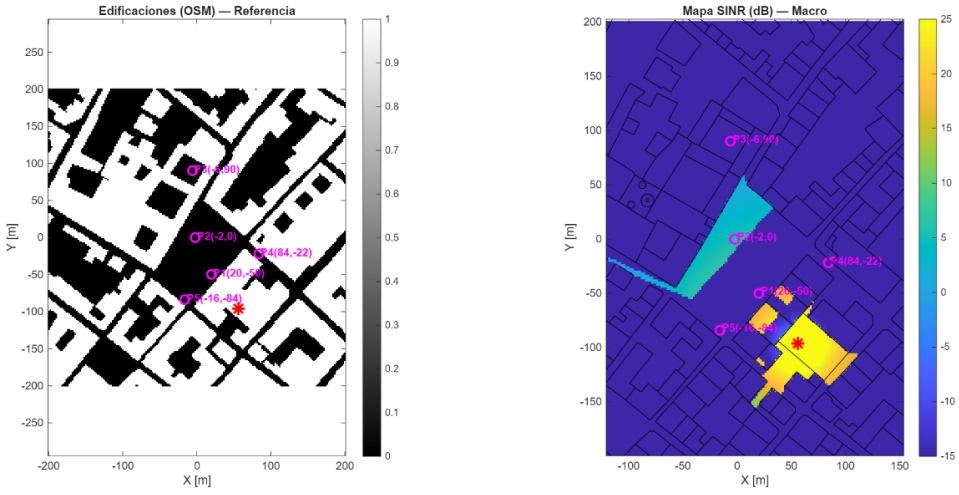
Ubicaciones seleccionadas para el estudio.



Análisis del SINR en el escenario macro: La Figura 15 presenta el mapa de SINR del escenario base con una sola macrocelda. En la simulación se consideró un ancho de banda de 100 MHz, una figura de ruido de 7 dB y un nivel de interferencia equivalente de −95 dBm. Con estos parámetros se obtiene un nivel de ruido aproximado de −87 dBm para el sistema.

Figura 16

Mapa del escenario macro para SINR.



El mapa evidencia una fuerte dependencia espacial del SINR, estrechamente vinculada tanto a la distancia como al número de edificaciones bloqueantes previamente analizado. En el entorno inmediato de la estación base se observan valores positivos de SINR, mientras que en la mayoría del escenario los valores son negativos, reflejando condiciones de enlace severamente degradadas. Los valores obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 6

Valores de SINR en los puntos de estudio

Punto de estudio	**Potencia recibida (dBm)**	**SINR (dB)**
P1	−109.80	−23.44
P2	−80.99	5.37
P3	−126.95	−40.59
P4	−120.05	−33.69
P5	−112.92	−26.56

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

El punto P2, ubicado en una zona con menos obstrucciones, alcanza un SINR positivo de 5.37 dB y una eficiencia espectral moderada. Por el contrario, los puntos P1, P3, P4 y P5 presentan valores negativos, algunos inferiores a −30 dB, lo que refleja una señal útil considerablemente menor que el nivel conjunto de interferencia y ruido. La condición más crítica se observa en P3, con un SINR de −40.59 dB. Este comportamiento no depende solo de la distancia respecto a la macrocelda, sino también de la presencia de edificaciones que afectan el enlace.

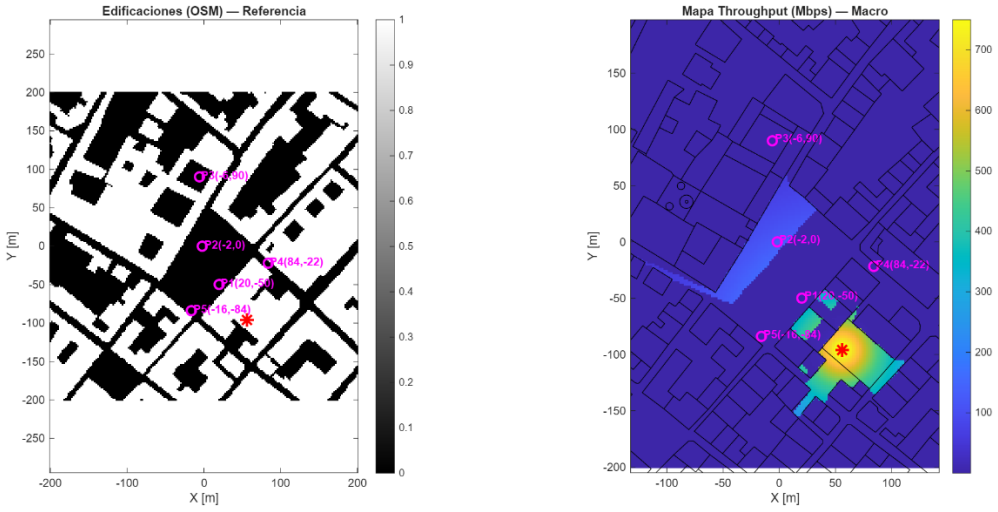
Bajo estas condiciones, el enlace presenta limitaciones importantes para sostener esquemas de modulación de mayor eficiencia, reduciendo considerablemente el throughput disponible para el usuario. Esto muestra que la cobertura y la capacidad no presentan necesariamente el mismo comportamiento dentro del escenario. Aunque la macrocelda mantiene

niveles de potencia que permiten cobertura en gran parte del área analizada, la calidad del enlace varía de forma considerable entre distintos puntos.

Análisis del throughput en el escenario macro: La Figura 16 muestra el mapa de throughput estimado para el escenario base con macrocelda. El throughput se calcula a partir del SINR mediante una relación SINR–eficiencia espectral con limitaciones prácticas: se emplea un factor de eficiencia $\eta=0.60$, un límite de eficiencia espectral $SE_{max}=7.5$ bps/Hz y un ancho de banda $BW=100$ MHz. Este enfoque evita sobreestimar la capacidad en condiciones ideales y permite obtener una representación realista de la capacidad disponible en el entorno urbano patrimonial.

Figura 17

Mapa del escenario macro para throughput.



El mapa de throughput presenta una distribución poco uniforme dentro del escenario analizado. Los valores más altos de capacidad se concentran en las proximidades de la macrocelda, mientras que en gran parte del área predominan niveles significativamente inferiores. Con el fin de analizar estas diferencias de manera más detallada, se seleccionaron cinco puntos estratégicos (P1–P5) distribuidos en distintas zonas del escenario. Estos puntos permiten comparar el throughput bajo diferentes condiciones de propagación y niveles de

obstrucción. Estos puntos permiten comparar de manera más directa cómo varían el SINR y el throughput en distintas áreas del escenario. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 7

Valores de Throughput en los puntos de estudio

Punto de estudio	SINR (dB)	Throughput (Mbps)
P1	−23.44 dB	0.39
P2	5.37 dB	129.14
P3	−40.59 dB	0.01
P4	−33.69 dB	0.04
P5	−26.56 dB	0.19

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

Se observa que únicamente el punto P2 alcanza un throughput significativo (129.14 Mbps), coherente con su SINR positivo y su ubicación relativa en una zona menos obstruida, en contraste, los puntos P1, P3, P4 y P5 registran valores inferiores a 1 Mbps. Aunque permanecen dentro del área de cobertura de la macrocelda, las condiciones de propagación en estas ubicaciones limitan considerablemente la capacidad disponible.

Delimitación del Área de Interés y análisis agregado del throughput: Después de revisar los puntos de evaluación, el estudio se centra en el sector cercano a la Plaza de San Francisco. Aunque la simulación abarca un área mayor, el análisis se limita a la plaza, la iglesia y las zonas próximas, por ser los sectores de mayor interés para esta investigación.

La Figura 18 muestra el Área de Interés (AOI) definida para el análisis. A partir de esta delimitación se calculan las métricas agregadas utilizadas en la evaluación de capacidad y en la estimación de los requerimientos de backhaul.

Figura 18

Ubicaciones seleccionadas para el estudio.



El comportamiento del escenario base dentro del Área de Interés puede resumirse mediante métricas agregadas de throughput. Aunque el valor promedio obtenido es de 34.27 Mbps, los percentiles muestran una distribución poco uniforme de la capacidad dentro del escenario. En particular, el valor p50 = 0.00 Mbps indica que una parte importante del área presenta niveles muy bajos de throughput, mientras que los valores más altos se concentran únicamente en sectores cercanos a la macrocelda, esto evidencia que el throughput promedio, por sí solo, no representa adecuadamente el desempeño general de la red, ya que puede verse influenciado por zonas reducidas con capacidades elevadas.

Por esta razón, el análisis también considera percentiles y porcentaje de área en déficit de capacidad, permitiendo describir de mejor manera el comportamiento del sistema dentro del entorno estudiado.

Los resultados del escenario base muestran que la macrocelda presenta limitaciones de capacidad en gran parte del área analizada. Estos valores se utilizarán posteriormente como referencia para comparar el efecto de la incorporación de small cells y estimar sus requerimientos de transporte.

Déficit de capacidad en el escenario macro: Para evaluar la capacidad del escenario base, se definieron dos umbrales de throughput:

- 10 Mbps como nivel mínimo.
- 25 Mbps como nivel objetivo.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- T < 10 Mbps: 88.67 % del área.
- T < 25 Mbps: 88.79 % del área.

Estos valores indican que más del 88 % del área evaluada presenta déficit de capacidad. La diferencia entre ambos resultados es de solo 0.12 puntos porcentuales, lo que muestra que la mayor parte de las zonas que no alcanzan los 25 Mbps tampoco supera el nivel mínimo de 10 Mbps. Por lo tanto, no se trata únicamente de sectores con valores cercanos a los umbrales, sino de áreas con throughput muy bajo.

El análisis en los cinco puntos de evaluación presenta los siguientes resultados:

- P1: 0.39 Mbps → Déficit mínimo y objetivo
- P2: 129.14 Mbps → Cumple ambos umbrales
- P3: 0.01 Mbps → Déficit mínimo y objetivo
- P4: 0.04 Mbps → Déficit mínimo y objetivo
- P5: 0.19 Mbps → Déficit mínimo y objetivo

El punto P2 es el único que cumple con los criterios establecidos, debido a que se encuentra en una zona con menor obstrucción. Los demás puntos presentan valores de capacidad muy bajos, en relación con los niveles negativos de SINR analizados anteriormente.

Escenario densificado macro y small cells: Para reducir el déficit de capacidad del escenario base, se evaluó una configuración densificada con múltiples small cells operando en la banda de 3.5 GHz. Esta estrategia busca mejorar el SINR en zonas afectadas por distancia y bloqueo por edificaciones.

En este escenario se considera la interferencia intercelda tanto de la macrocelda como de las small cells, por lo que el cálculo del SINR muestra la interacción real entre nodos. Esto permite evaluar el efecto de la densificación sobre la calidad del enlace y la capacidad disponible. Además, el análisis se enfoca en cómo la redistribución de la capacidad impacta los requerimientos de transporte (midhaul/backhaul) asociados a cada nodo.

Criterio de ubicación de small cells: La ubicación de las small cells en el escenario densificado se estableció a partir del déficit de capacidad observado en el escenario base. Como se muestra en la Figura 19, más del 88 % del área evaluada presentó un throughput inferior a 10 Mbps, lo que evidenció las limitaciones de la macrocelda para ofrecer un nivel adecuado de servicio en la plaza y sus alrededores.

El mapa de déficit de throughput, definido para valores menores a 10 Mbps, sirvió como referencia inicial para seleccionar las ubicaciones. No obstante, las small cells no se instalaron en cualquier zona con bajo desempeño. Se priorizaron las regiones más críticas y los puntos de evaluación P1–P5, especialmente aquellos donde la macrocelda registró los resultados más bajos. La ubicación de los nodos permitió analizar las variaciones del SINR y el throughput bajo distintas condiciones de obstrucción. Se dio mayor atención a los sectores cercanos a P1, P3, P4 y P5, procurando mantener una separación adecuada entre las small cells para evitar solapamientos innecesarios.

Desde el punto de vista radioeléctrico, se buscó mejorar la capacidad en las zonas con mayor déficit sin afectar de forma importante los sectores que ya presentaban un desempeño favorable. Debido al uso de reutilización espectral total, la incorporación de nuevos nodos también modifica la interferencia entre celdas. Aunque la densificación mejora las zonas críticas, puede disminuir ligeramente el desempeño en algunos sectores que antes presentaban mejores condiciones. La selección de las ubicaciones también consideró las características patrimoniales del Centro Histórico de Quito. Se priorizaron puntos donde fuera posible aprovechar postes de

iluminación, mobiliario urbano u otras estructuras existentes, con el fin de reducir la intervención sobre las fachadas y edificaciones del sector.

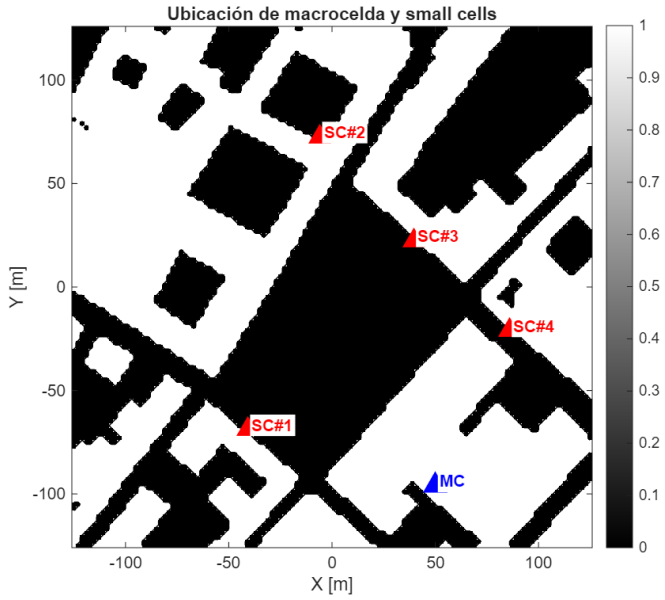
La selección también tomó en cuenta las características patrimoniales del Centro Histórico de Quito. Se priorizaron ubicaciones que podrían aprovechar postes de iluminación, mobiliario urbano u otras estructuras existentes, con el propósito de reducir la intervención sobre las fachadas y edificaciones del sector.

Las coordenadas utilizadas corresponden a ubicaciones reales del sector, lo que permite mantener coherencia entre el modelo y el entorno físico. Su viabilidad práctica se prevé validar mediante observación en campo.

Conforme a lo descrito la Figura 18, ilustra la ubicación que se tomó para las small cell en la Plaza San Francisco.

Figura 19

Ubicación de Small cell.



***Validación en sitio del despliegue propuesto*:** Con el fin de fortalecer la coherencia entre el modelo de simulación y la realidad física del entorno urbano patrimonial, se realizó una validación en sitio de las ubicaciones propuestas para las small cells en el sector de la Plaza e

Iglesia de San Francisco, dentro del Centro Histórico de Quito. El objetivo de esta validación no fue replantear el modelo radioeléctrico, sino verificar que las posiciones seleccionadas en la simulación sean físicamente viables, mantengan coherencia geométrica con el entorno real, no vulneren criterios patrimoniales y resulten técnicamente justificables en un despliegue real.

***Correspondencia entre modelo digital y entorno real*:** Las ubicaciones de las small cells fueron definidas sobre la máscara urbana y posteriormente verificadas en campo. Se constató que corresponden a puntos estratégicos reales, como esquinas, bordes de plaza y postes de alumbrado. Esto confirma que el modelo no solo es geométricamente consistente, sino también viable desde el punto de vista de despliegue.

Figura 20

Representación de la ubicación de small cells en el entorno urbano real.



A continuación, se muestran las imágenes en sitio de la ubicación de la macrocelda y de las propuestas para la colocación de small cell, con el objetivo de ilustrar la integración en el entorno urbano. Estas imágenes corresponden a montajes referenciales basados en el escenario de estudio y en los resultados obtenidos en la simulación, por lo que no representan instalaciones reales, sino una aproximación del despliegue planteado.

Macrocelda: La macrocelda considerada en este estudio se encuentra ubicada en la terraza de un edificio próximo a la Plaza de San Francisco, aunque su posición efectiva queda

parcialmente oculta por la volumetría de construcciones adyacentes. Esta configuración genera una condición particular: si bien la estación base dispone de cierta altura que favorece la propagación en espacios abiertos, su emplazamiento detrás de un bloque edificado introduce escenarios de bloqueo y trayectorias NLOS hacia diversos sectores del entorno urbano.

Figura 21

Ubicación de la macrocelda en el entorno urbano real.



Small cell 1 (SC1): La SC1 se ubica en un poste cercano a un sector hotelero y comercial próximo a la plaza, permitiendo extender la cobertura hacia zonas con alta circulación peatonal. Su ubicación busca reforzar sectores donde la macrocelda presenta limitaciones de capacidad y mejorar la conectividad en áreas con presencia constante de usuarios.

Figura 22

Propuesta de implementación de la small cell SC1 en el entorno urbano.



Small cell 2 (SC2): La SC2 fue posicionada estratégicamente para brindar cobertura a un patio interior dentro del complejo de la Iglesia de San Francisco, donde el escenario macro evidenciaba pérdidas significativas por penetración y distancia. En el análisis base, este sector presentaba valores extremadamente bajos de throughput debido a múltiples intersecciones con fachadas y muros patrimoniales.

Figura 23

Propuesta de implementación de la small cell SC2 en el entorno urbano.



Small cell 3 (SC3): La SC3 se ubicó en un poste lateral de la Plaza de San Francisco con el objetivo de reforzar la cobertura en espacio abierto y aportar capacidad adicional en una zona de alta concentración turística. Aunque la plaza presenta condiciones relativamente más favorables de propagación que calles estrechas, el análisis macro mostró que la capacidad era insuficiente en gran parte del área. Esta small cell actúa como nodo de refuerzo para mejorar tanto el SINR como la disponibilidad de throughput en eventos o concentraciones masivas de usuarios.

Figura 24

Propuesta de implementación de la small cell SC3 en el entorno urbano.



Small cell 4 (SC4): La SC4 fue instalada en el callejón asociado a la salida del metro, sector caracterizado por flujo constante y dinámico de usuarios. Este punto combina tránsito peatonal elevado con geometría urbana parcialmente confinada, lo que en el escenario macro generaba degradación significativa del enlace. La small cell permite mejorar la cobertura en este corredor urbano y garantizar mayor capacidad en un punto estratégico de conectividad intermodal.

Figura 25

Propuesta de implementación de la small cell SC4 en el entorno urbano.



A continuación, se presenta una tabla resumen de las ubicaciones de small cell

Tabla 8

Análisis y resumen de ubicaciones propuestas para las small cells.

SC	Ubicación simulada coordenadas	Infraestructura disponible	Altura estimada entorno	Observaciones geométricas
SC1	-0.22112989015501652, -78.51531763020391	Poste	3 pisos	Da cobertura a edificio turístico y parte de la plaza
SC2	-0.22032819182861468, -78.51520404316297	Fachada al interior del patio interior del complejo de la Iglesia de San Francisco	2 pisos	Da cobertura a una zona turística, alejada del transmisor y con grandes pérdidas por penetración.

SC3	-0.2203883563535132, -78.51449005041304	Poste	2 pisos	Da cobertura a parte de la plaza y capacidad en caso de ser necesario.
SC4	-0.220682535457104, -78.51417009908009	Fachada exterior de casa tradicional en callejón adyacente a la plaza	2 pisos	Cubrir de cobertura a usuarios que se encuentren en el callejón salida de la estación del metro de Quito en San Francisco

Nota. Elaboración propia a partir de información geográfica en la red.

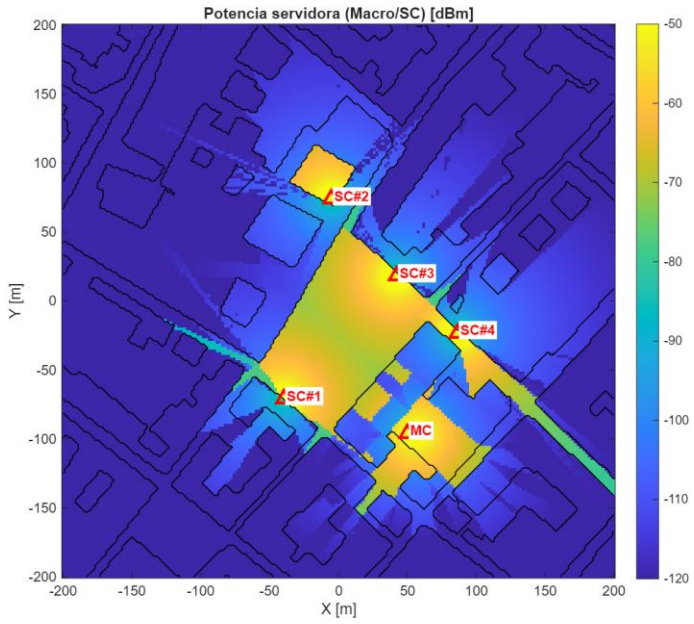
Viabilidad patrimonial y estética: Se evaluó si las ubicaciones propuestas, evitan intervención directa sobre edificaciones patrimoniales protegidas, permiten instalación sobre infraestructura urbana existente, no afectan visualmente elementos emblemáticos de la Iglesia de San Francisco y son compatibles con el carácter turístico de la plaza. Este análisis es fundamental, ya que el despliegue técnico debe armonizar con la normativa y el valor histórico del entorno.

***Mapa de potencia servidora*:** El mapa de potencia servidora muestra, en cada punto del escenario, la mayor potencia recibida entre la macrocelda y las small cells desplegadas. De esta manera, se identifica el nodo que proporciona la señal útil dominante en cada ubicación y se observa su distribución espacial dentro del escenario densificado. En consecuencia, el mapa refleja condiciones realistas de atenuación propias del entorno urbano del Centro Histórico de Quito.

En comparación con el escenario macro exclusivo, se observan incrementos significativos de potencia en zonas que previamente presentaban niveles extremadamente bajos de señal. Estas mejoras son particularmente evidentes en el interior del complejo arquitectónico de San Francisco, en los bordes de la plaza y en el entorno del callejón asociado a la salida del metro, donde la proximidad de las small cells reduce la pérdida efectiva del enlace, como se observa en la Figura 26.

Figura 26

Mapa de potencia servidora en el escenario densificado.



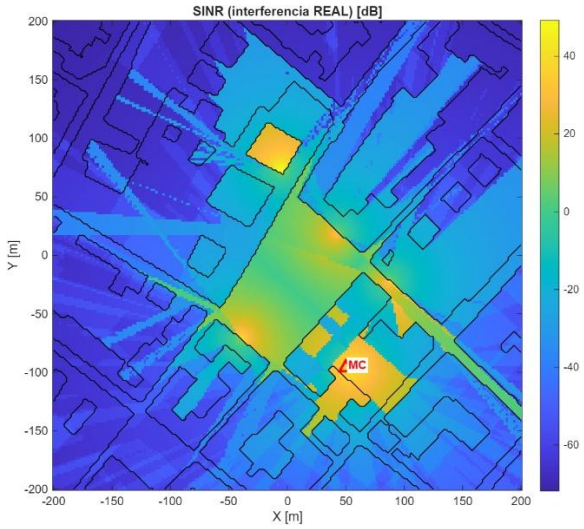
Asimismo, el mapa evidencia que la macrocelda continúa proporcionando cobertura dominante en sectores abiertos donde la obstrucción es menor y la distancia no es excesiva. De este modo, el resultado muestra una coexistencia espacial entre cobertura macro y micro, característica de redes heterogéneas densificadas. Es importante señalar que este mapa representa únicamente la señal útil dominante y no incorpora aún el efecto de la interferencia intercelda. Por tanto, aunque se observan mejoras claras en potencia en múltiples zonas, la evaluación completa del desempeño requiere analizar posteriormente el comportamiento del SINR bajo condiciones de interferencia real

***Mapa de SINR con interferencia real*:** El mapa de SINR obtenido para el escenario densificado permite evaluar el desempeño radioeléctrico considerando de forma explícita la interferencia entre la macrocelda y las small cells. A diferencia del mapa de potencia servidora —que únicamente muestra cuál es la señal dominante en cada punto— el SINR integra la señal útil, la interferencia generada por las demás estaciones y el ruido térmico. Por esta razón, ofrece una visión más realista de la calidad efectiva del enlace.

Desde el punto de vista espacial, se aprecia una mejora evidente en varias zonas que, en el escenario macro, presentaban condiciones críticas, sectores donde anteriormente se registraban valores inferiores a −30 dB ahora muestran niveles positivos o moderadamente altos de SINR, especialmente en el interior del complejo arquitectónico, en los bordes de la plaza y en ciertos corredores urbanos estratégicos, esto se evidencia en la Figura 27.

Figura 27

Mapa de SINR con interferencia de servidor real en el escenario densificado.



También se observan zonas donde el SINR permanece en niveles intermedios, aun cuando la potencia recibida desde la estación servidora resulta suficiente. Este comportamiento aparece en sectores donde varias estaciones entregan niveles de señal

similares, incrementando la interferencia bajo el esquema de reutilización espectral empleado. El análisis de los puntos estratégicos complementa la información obtenida a partir del mapa y permite examinar con mayor detalle el comportamiento del SINR en distintas zonas del escenario, algunos de estos valores se exponen en la Tabla 9.

Tabla 9

Valores de SINR con interferencia de servidor real en el escenario densificado.

Punto de estudio	Potencia recibida (dBm)	SINR (dB)
P1	-69.64	1.28
P2	-61.58	5.10
P3	-55.18	32.11
P4	-48.56	29.15
P5	-59.74	16.07

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

En conjunto, estos resultados confirman que la incorporación de small cells permite transformar puntos con condiciones NLOS pronunciadas en áreas con alta calidad de enlace. No obstante, la mejora no se distribuye de manera uniforme en todo el escenario, sino que depende de la geometría urbana y de la interacción entre las distintas celdas desplegadas.

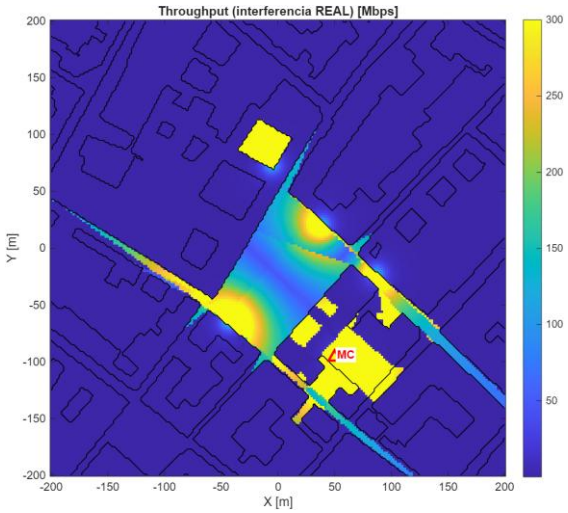
***Mapa de Throughput y métricas globales*:** El mapa de throughput representa la capacidad efectiva disponible en cada punto del escenario, calculada a partir del SINR mediante la relación entre eficiencia espectral y ancho de banda del sistema. A diferencia del mapa de SINR, que describe la calidad del enlace en términos radioeléctricos, el throughput traduce dicha calidad en una métrica directamente asociada al servicio percibido por el usuario.

En el escenario densificado se observa una mejora clara frente al primer caso de estudio en donde intervenía únicamente la macrocelda. Zonas que antes tenían throughput casi nulo ahora presentan valores más altos, como se muestra en la Figura 28 y la Tabla *10*. Este cambio

se debe al aumento del SINR en esas áreas, ya que las small cells acortan la distancia del enlace y reducen el efecto del bloqueo.

Figura 28

Mapa de throughput en el escenario densificado.



El estudio puntual en los puntos estratégicos refuerza esta conclusión:

Tabla 10

Valores de Throughput con interferencia de servidor real en el escenario densificado.

Punto de estudio	Throughput (Mbps)
P1	61.44
P2	104.12
P3	300
P4	300
P5	268.64

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

No obstante, el mapa también evidencia que la mejora no es completamente uniforme, ya que en zonas de transición entre celdas pueden persistir valores moderados debido a interferencia intercelda. Este comportamiento es coherente con la naturaleza de redes heterogéneas con reutilización espectral total.

***Análisis comparativo en puntos estratégicos (Macro vs. Macro + SC)*:** Para evaluar el efecto de la incorporación de small cells, se utiliza como referencia el escenario base, compuesto únicamente por la macrocelda. En este escenario, el throughput promedio alcanza 14.72 Mbps, mientras que el percentil p50 es de 0 Mbps. Esto indica que al menos la mitad del área evaluada presenta valores de throughput prácticamente nulos. Además, cerca del 88.67 % del escenario registra valores inferiores a 10 Mbps, lo que muestra una distribución poco uniforme de la capacidad dentro del área de estudio.

Con la incorporación de las small cells, el throughput promedio aumenta hasta 22.63 bps y el porcentaje de área con valores inferiores a 10 Mbps disminuye a 70.24 %. Aunque este último indicador presenta una variación relativamente pequeña, el incremento del throughput promedio muestra que la mejora se concentra principalmente en las zonas donde fueron instaladas las nuevas estaciones. En otras palabras, la capacidad no aumenta de manera uniforme en todo el escenario, sino que se incrementa de forma localizada alrededor de las small cells, mientras que otros sectores mantienen limitaciones similares a las observadas en el escenario macro. Puntos que anteriormente presentaban prácticamente ausencia de servicio (P1, P3, P4 y P5) experimentan incrementos drásticos:

Tabla 11

Comparativa de indicadores de red en puntos estratégicos.

Puntos de estudio	**Métricas de estudio**			
	SINR (dB)		Throughput (Mbps)	
	Escenario 1 (Macro)	Escenario 2 (Macro + SC)	Escenario 1 (Macro)	Escenario 2 (Macro + SC)
P1	−23.44	1.28	0.39	61.44
P2	5.37	5.10	129.14	104.12
P3	−40.59	32.11	0.01	300

P4	−33.69	29.15	0.04	300
P5	−26.56	16.07	0.19	268.64

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

Los resultados muestran que la incorporación de small cells mejora de forma considerable el desempeño en los puntos donde la macrocelda presentaba mayores limitaciones. En P1, P3, P4 y P5, el throughput pasó de valores inferiores a 0,4 Mbps a resultados comprendidos entre 61,44 y 300 Mbps. Esta mejora se debe principalmente a la reducción de la distancia entre el transmisor y los usuarios, así como a la posibilidad de evitar parte de los bloqueos que afectaban los enlaces con la macrocelda.

Este comportamiento coincide con lo señalado por Andrews et al. (2014), quienes explican que la densificación mediante small cells permite aumentar la reutilización espacial del espectro y mejorar la capacidad en zonas con alta demanda. En el escenario analizado, esta ventaja se observa sobre todo en los sectores críticos, donde la macrocelda no podía mantener niveles adecuados de SINR y throughput.

Sin embargo, los resultados también muestran que la densificación no produce una mejora uniforme. En el punto P2, el throughput disminuyó de 129,14 Mbps a 104,12 Mbps, a pesar de que se mantuvo en un nivel alto. Esta reducción puede estar relacionada con el aumento de la interferencia intercelda, debido a que en el escenario densificado varias estaciones transmiten utilizando el mismo espectro. Este resultado también coincide con Andrews et al. (2014), quienes señalan que el aumento del número de nodos puede mejorar la capacidad, pero al mismo tiempo genera mayores niveles de interferencia y aumenta las exigencias de coordinación y transporte.

Desde el punto de vista del dimensionamiento de backhaul, estos resultados adquieren especial relevancia. En el escenario macro, el tráfico se concentraba en una única estación; sin embargo, con la densificación, la demanda se distribuye entre múltiples nodos, donde si bien los

valores típicos de p90 superan los 100 Mbps, en ciertos casos particulares pueden alcanzar o incluso superar los 200 Mbps. En escenarios de alta concurrencia —como eventos turísticos o concentraciones en la Plaza de San Francisco—, cada small cell podría requerir enlaces de backhaul con capacidades del orden de cientos de Mbps, con el fin de evitar que el cuello de botella se desplace desde la interfaz radio hacia la red de transporte.

En relación con la propagación, los resultados son coherentes con lo planteado por Rappaport et al. (2017) y con la clasificación LOS/NLOS utilizada en 3GPP TR 38.901. Los puntos con menor desempeño en el escenario macro se encuentran en zonas donde existen edificaciones entre el transmisor y el usuario, lo que incrementa la pérdida de trayectoria y reduce la calidad del enlace. Al incorporar las small cells, algunos de estos enlaces se acortan o presentan menos obstrucciones, permitiendo mejorar el SINR y el throughput.

***Análisis de sensibilidad al número de small cells*:** Con el fin de evaluar la influencia de la densidad de nodos sobre el desempeño de la red, se consideró un escenario adicional con tres small cells en lugar de cuatro. Los demás parámetros de simulación se mantuvieron sin cambios. En esta configuración, el throughput promedio del área alcanza 26.09 Mbps, frente a los 22.63 Mbps obtenidos en el escenario con cuatro nodos. De igual manera, se observan mejoras evidentes en los puntos estratégicos evaluados.

Tabla 12

Análisis del impacto del número de small cells sobre las métricas de desempeño.

Puntos de estudio	**Análisis de sensibilidad**			
	SINR (dB)		Throughput (Mbps)	
	Escenario 1 (4 SC)	Escenario 2 (3 SC)	Escenario 1 (4 SC)	Escenario 2 (3 SC)
P1	1.28	17.06	61.44	384.79

P2	5.10	7.16	104.12	131.59
P3	32.11	31.73	300	300
P4	29.15	36.07	300	300
P5	16.07	27.29	268.64	300

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

Estos resultados sugieren que la eliminación de una small cell reduce la interferencia intercelda en determinadas zonas, especialmente en regiones de frontera donde las potencias recibidas eran similares. Como resultado, el SINR mejora en varios puntos del escenario y el throughput promedio global aumenta. No obstante, este comportamiento no significa que el escenario con menos nodos sea necesariamente el más adecuado. Reducir el número de estaciones también implica, una mayor área servida por cada small cell, una mayor concentración de tráfico por nodo y un posible incremento en los requerimientos de backhaul por estación.

En consecuencia, aunque el escenario con tres small cells presenta mejores métricas promedio de SINR y throughput, también concentra más carga en un menor número de nodos, lo que puede traducirse en exigencias mayores para cada enlace de transporte individual.

Este análisis pone en evidencia el compromiso característico de las redes heterogéneas densificadas: incrementar el número de small cells puede favorecer la cobertura localizada, pero introduce interferencia adicional; en cambio, reducir la cantidad de nodos puede mejorar el SINR promedio, aunque aumenta la carga por estación y la dependencia espacial de cada celda.

Desde la perspectiva del backhaul, esta conclusión resulta fundamental. El diseño óptimo no debe basarse únicamente en el valor promedio de SINR, sino en un equilibrio entre cobertura, capacidad radioeléctrica y distribución del tráfico agregado entre los distintos nodos del sistema.

En consecuencia, la mejora obtenida en la interfaz radio traslada el foco del problema hacia la red de transporte. Las small cells que alcanzan elevados niveles de throughput potencial requerirán enlaces de backhaul capaces de soportar el tráfico agregado correspondiente, especialmente en un entorno turístico con alta variabilidad de demanda.

A partir de estos resultados, el siguiente capítulo abordará el análisis detallado de capacidad por nodo y el dimensionamiento de backhaul asociado al despliegue propuesto, integrando consideraciones técnicas y restricciones propias del Centro Histórico de Quito.

Capítulo V

Análisis de Capacidad y Dimensionamiento del Backhaul

Para cada small cell se calcularon métricas a partir del mapa de throughput en las zonas donde actúa como nodo servidor. El porcentaje de área servida indica qué parte del escenario queda asociada a cada celda, es decir, las zonas donde esa estación proporciona la mayor potencia recibida. Esta métrica permite apreciar la distribución espacial de la cobertura entre las distintas small cells. El throughput promedio (Tmean) representa la capacidad media obtenida dentro del área atendida por cada estación, mientras que el percentil 50 (p50) corresponde al valor típico registrado en esa zona. Los percentiles p90 y p95 muestran los niveles alcanzados bajo condiciones más favorables y sirven como referencia para estimar la capacidad disponible y los requerimientos de transporte. Por último, el porcentaje en capacidad máxima indica la proporción del área donde el sistema opera en su límite de throughput, lo que permite evaluar la eficiencia espectral alcanzada en el escenario.

Área servida por cada small cell

El análisis del escenario densificado dentro del área de interés evidencia un cambio importante frente al caso en el que solo operaba la macrocelda. En lugar de concentrar toda la cobertura en un único transmisor, el servicio se reparte entre varios nodos de acceso, lo que

permite distribuir mejor la carga y acercar físicamente el punto de transmisión a los usuarios como se evidencia en la Tabla 13.

Tabla 13

Porcentaje de área atendida por cada small cell.

Small cell	Porcentaje del área que cubre
SC#1	22.72%
SC#2	12.17%
SC#3	23.12%
SC#4	10.29%

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

Se aprecia que SC#1 y SC#3 desempeñan un papel predominante dentro del Área de Interés, ya que en conjunto cubren aproximadamente el 45 % del dominio total. Este resultado es consistente con su ubicación en sectores estratégicos, caracterizados por alta concentración peatonal y por presentar previamente una degradación significativa de cobertura bajo el escenario macro. Desde la perspectiva del backhaul, esta distribución resulta relevante, ya que el porcentaje de área servida permite estimar qué estaciones podrían concentrar una mayor cantidad de tráfico. En general, las celdas que cubren áreas más extensas suelen asociarse a mayores demandas de transporte.

Sin embargo, este criterio debe complementarse con el análisis del throughput, ya que es este parámetro el que determina la carga generada por cada nodo. Por esta razón, en el siguiente apartado se analiza la distribución del throughput y los percentiles de capacidad correspondientes a cada small cell.

***Distribución de throughput por small cell*:** Más allá del porcentaje de área cubierta, el parámetro que determina directamente los requerimientos de transporte es la capacidad

efectiva entregada por cada small cell. Para ello, se analizaron métricas estadísticas del throughput en las zonas servidas por cada nodo, considerando valores promedio y percentiles representativos (p50, p90 y p95).

Las métricas estadísticas por small cell se obtienen a partir del mapa de throughput calculado para cada punto de la malla de simulación. Para cada celda se seleccionan los puntos donde dicha estación actúa como servidor y se calculan estadísticas descriptivas del throughput (promedio, percentiles y porcentaje de saturación) que permiten caracterizar la distribución espacial de la capacidad dentro del área servida, estas se detallan a continuación en la tabla.

Tabla 14

Evaluación de métricas percentiles y capacidad espacial por small cell.

SC	Tmean (Mbps)	P50 (Mbps)	P90 (Mbps)	P95 (Mbps)	% en capacidad máxima
1	69.55	1.02	257.07	300.00	6.2
2	47.34	1.07	300.00	300.00	14.8
3	58.49	1.22	193.09	261.32	4.0
4	49.50	2.01	280.91	300.00	9.5

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en MATLAB.

Se observa que, aunque los valores medianos (p50) son relativamente bajos —del orden de 1–2 Mbps— los percentiles superiores muestran una porción significativa del área operando en condiciones de alta eficiencia espectral. Los percentiles p90 y p95 presentan valores cercanos al límite de capacidad del sistema (300 Mbps), lo que muestra que, en determinadas zonas, las small cells alcanzan las mayores tasas de transmisión permitidas por la configuración de la simulación. No obstante, esta situación no se extiende a toda el área, ya que continúan existiendo sectores donde la capacidad disminuye debido a la interferencia entre celdas y al efecto de las

edificaciones sobre la propagación de la señal. Para el dimensionamiento del backhaul, el percentil p95 se tomó como referencia al representar condiciones de operación cercanas a la máxima demanda. A partir de esta métrica, SC#2 y SC#4 concentran una mayor proporción de áreas con throughput elevado, por lo que es razonable considerar una mayor capacidad en sus enlaces de transporte.

En el escenario densificado, el throughput promedio dentro del Área de Interés alcanza 56.72 Mbps, valor superior al obtenido con la macrocelda como único nodo de acceso. Sin embargo, el 70.38 % del área todavía registra valores inferiores a 10 Mbps. Esto indica que la incorporación de small cells incrementa la capacidad disponible, aunque el efecto de las obstrucciones propias del entorno continúa condicionando el desempeño de la red.

***Estimación de requerimientos de backhaul*:** A partir de la distribución de throughput obtenida para cada small cell, se estiman los requerimientos de transporte asociados al tráfico generado en la interfaz radio. Para ello, se emplean percentiles altos como referencia, debido a que representan escenarios cercanos a la máxima carga.

Los resultados muestran que los valores p95 se acercan al límite del sistema (300 Mbps) en varias celdas. En particular, SC1, SC2 y SC4 alcanzan 300 Mbps, mientras que SC3 llega a aproximadamente 261 Mbps. Esto indica que, en condiciones favorables, cada nodo puede generar demandas de tráfico del orden de 250 a 300 Mbps

Desde el punto de vista de ingeniería de redes, el dimensionamiento del backhaul debe considerar además factores adicionales como señalización, sobrecarga de protocolos, variabilidad del tráfico y crecimiento futuro de la demanda. Por ello, suele considerarse una capacidad adicional sobre el tráfico estimado, con márgenes que habitualmente se sitúan entre el 20 % y el 30 %.

A partir de los resultados obtenidos, un enlace de backhaul del orden de 400 Mbps por small cell resulta suficiente para soportar los niveles de tráfico observados en el escenario analizado. Este valor mantiene una diferencia respecto a los percentiles más altos registrados y contempla posibles incrementos temporales de demanda asociados a la actividad del entorno.

En consecuencia, el despliegue propuesto de cuatro small cells implicaría una demanda agregada de transporte del orden de 1.6 Gbps para el conjunto del área de interés, valor que deberá ser soportado por la infraestructura de backhaul que interconecta los nodos de acceso con la red central.

Discusión del dimensionamiento y viabilidad del backhaul

Con base en los requerimientos de capacidad derivados en la sección anterior (dimensionamiento a partir de percentiles altos por small cell), la selección de la tecnología de transporte debe evaluarse bajo dos criterios simultáneos: (i) capacidad y robustez del enlace, y (ii) viabilidad física y patrimonial en el entorno del Centro Histórico. En este escenario, la viabilidad de soluciones inalámbricas depende de la disponibilidad de línea de vista (LOS) hacia un punto de agregación, condición que no se garantiza para muchas ubicaciones debido estructuras o edificios.

***Fibra óptica*:** La fibra óptica permite cubrir sin dificultad los requerimientos de capacidad estimados en el escenario densificado, del orden de Mbps por small cell. Su uso ofrece un medio de transporte estable, independiente de interferencias y condiciones de propagación, lo que resulta adecuado para soportar el tráfico agregado generado por múltiples nodos, por lo que en el entorno analizado, esta tecnología garantiza que el desempeño de la red de acceso no se vea limitado por el transporte, manteniendo la capacidad disponible incluso en condiciones exigentes.

Sin embargo, su implementación en el Centro Histórico de Quito está condicionada por la infraestructura existente. La construcción de nuevos ductos o canalizaciones puede verse

limitada por las características urbanas y las restricciones patrimoniales, lo que dificulta el despliegue de fibra óptica en algunos sectores. Aunque esta tecnología ofrece capacidad suficiente para transportar el tráfico estimado, su viabilidad debe evaluarse según las condiciones de cada ubicación.Los resultados de throughput muestran que algunas small cells pueden alcanzar valores cercanos a la capacidad máxima definida en la simulación. Por lo tanto, los enlaces de transporte deben soportar tasas de varios cientos de megabits por segundo por nodo, valores que pueden ser atendidos mediante redes de fibra óptica.

En zonas urbanas centrales, la existencia de ductos, canalizaciones o puntos de acceso de telecomunicaciones puede facilitar la conexión de nuevas small cells. La reutilización de esta infraestructura permite reducir las intervenciones físicas y facilita una integración más discreta en el entorno de estudio.

***Enlaces de microondas*:** Los enlaces de microondas representan una alternativa para el backhaul cuando no es posible utilizar fibra óptica. Estos enlaces permiten establecer conexiones punto a punto con capacidades de varios cientos de megabits por segundo y, en algunas configuraciones, cercanas a 1 Gbps. Su principal ventaja es la facilidad de despliegue, al no requerir obras civiles extensas no obstante y como ya se detalló, en este tipo de enlaces, la condición clave es la existencia de línea de vista (LOS) entre los nodos. En el entorno el análisis geométrico muestra que la mayoría de las small cells no cumplen esta condición respecto al punto de agregación, debido al bloqueo generado por edificaciones patrimoniales. Esto limita su uso como solución general de backhaul.

No obstante, existen ubicaciones específicas donde sí es posible establecer trayectorias con LOS. En estos casos, los enlaces de microondas pueden utilizarse para transportar el tráfico de determinadas small cells, considerando además que las distancias dentro del área de estudio son relativamente cortas y compatibles con las capacidades del sistema.

Aun así, su uso en este tipo de entorno también está condicionado por la instalación de las antenas. Los elementos necesarios para establecer enlaces direccionales pueden generar un impacto visual si no se integran con la infraestructura existente, aspecto que suele estar sujeto a restricciones en zonas patrimoniales.

En el escenario analizado, los enlaces de microondas pueden emplearse en aquellos nodos donde exista una trayectoria con línea de vista hacia el punto de agregación. Sin embargo, la disposición de las edificaciones y la geometría del entorno hacen que esta condición no se cumpla en todas las ubicaciones, por lo que su utilización queda limitada a casos específicos.

***Enlaces en bandas milimétricas (mmWave)*:** Las comunicaciones en bandas milimétricas (mmWave) ofrecen otra posibilidad para el transporte inalámbrico de alta capacidad. Estas tecnologías operan, por lo general, en frecuencias superiores a 24 GHz y pueden proporcionar velocidades de varios gigabits por segundo, por lo que resultan una opción de interés para enlaces de backhaul en despliegues con alta densidad de small cells.

Su disponibilidad de ancho de banda permite transportar grandes volúmenes de información en distancias relativamente cortas, una condición frecuente en despliegues basados en small cells. Además, las dimensiones reducidas de las antenas facilitan su instalación sobre elementos de mobiliario urbano o estructuras ya existentes.

Las características de propagación en estas frecuencias también imponen restricciones importantes. Las señales son sensibles a bloqueos producidos por edificaciones, vegetación y otros elementos presentes en el entorno urbano. Por este motivo, los enlaces mmWave suelen requerir trayectorias con línea de vista o niveles mínimos de obstrucción para mantener un desempeño adecuado. En el entorno de estudio la presencia de estructuras arquitectónicas de gran espesor y la geometría irregular del entorno urbano incrementan la probabilidad de bloqueo

de las trayectorias radioeléctricas, lo que reduce la viabilidad de enlaces mmWave como solución general de backhaul.

No obstante, en ubicaciones específicas donde sea posible establecer trayectorias con visibilidad directa entre nodos cercanos, los enlaces mmWave podrían representar una alternativa interesante para transportar grandes volúmenes de tráfico en distancias cortas. En estos casos, su elevada capacidad permitiría soportar sin dificultad las tasas de transmisión derivadas del despliegue de small cells en el área de estudio.

En consecuencia, aunque las tecnologías mmWave ofrecen ventajas significativas en términos de capacidad y compacidad de los equipos, su aplicación en el escenario analizado se encuentra condicionada por las restricciones geométricas del entorno urbano patrimonial. Por esta razón, su implementación podría considerarse únicamente en situaciones puntuales donde las condiciones de propagación lo permitan, complementando otras soluciones de transporte más robustas dentro de la arquitectura general de backhaul.

***Síntesis del análisis de backhaul para el escenario estudiado*:** La incorporación de small cells incrementa la capacidad disponible en el área de interés, pero también exige una red de transporte capaz de manejar el tráfico generado sin afectar el desempeño. Los valores del percentil p95 indican que varias estaciones pueden alcanzar tasas cercanas a 300 Mbps en condiciones favorables. Por ello, el dimensionamiento de los enlaces debe considerar estos niveles de demanda y no basarse únicamente en los valores promedio.

El análisis de las alternativas de transporte muestra que la elección de la tecnología no depende únicamente de la capacidad disponible. Aunque la fibra óptica puede soportar sin inconvenientes el tráfico estimado, su implementación está condicionada por la infraestructura existente y por las restricciones del Centro Histórico. En el caso de los enlaces de microondas y

mmWave, la principal limitación es la disponibilidad de trayectorias con línea de vista, reducida por la disposición de las edificaciones del sector.

En estas condiciones, el despliegue no puede plantearse a partir de una única solución de transporte. La tecnología más conveniente depende de las características de cada ubicación, por lo que una arquitectura híbrida permite adaptar el backhaul a las condiciones reales del entorno sin dejar de cubrir los requerimientos de capacidad obtenidos en la simulación.

Evidencia de infraestructura existente en el entorno de estudio

Small cell 1: En la ubicación propuesta para la SC1 se observa tendido de cable entre edificaciones cercanas. En particular, se identifican conexiones que parten desde el edificio donde se ubica la macrocelda hacia una construcción próxima al poste considerado para la small cell. Esta infraestructura constituye una referencia útil para el análisis de alternativas de backhaul, ya que muestra la existencia de rutas de cableado en el sector:

Figura 29

Evidencia de cableado existente para SC1.



Nota. Fotografía tomada por el autor durante el reconocimiento del área de estudio.

Small cell 2: Para la ubicación correspondiente a la small cell 2, se identificó un recorrido de mayor extensión en comparación con las demás ubicaciones analizadas. Durante el reconocimiento del área se observó la presencia de tendidos de cable que conectan edificaciones

desde los alrededores de la plaza hasta el sector del Patio de San Francisco. Esto evidencia que en la zona ya existen trayectorias físicas de este tipo. Se identificaron cables instalados sobre las fachadas y tramos que ascienden por las paredes hacia niveles superiores, patios interiores y cubiertas. Este aspecto resulta relevante porque coincide con la ubicación propuesta para la small cell, situada en un nivel elevado dentro del patio interior. La presencia de este tipo de infraestructura sugiere que, a pesar de la mayor distancia, es posible establecer rutas de conexión aprovechando recorridos existentes, incluyendo trayectorias verticales y accesos a cubiertas.

Figura 30

Evidencia de cableado e infraestructura existente para SC2.



Nota. Fotografía tomada por el autor durante el reconocimiento del área de estudio.

Small cell 3: La ubicación propuesta para la small cell 3 presenta una configuración similar a la descrita para la small cell 2, aunque con un recorrido más corto. En este caso, el tendido de cable requeriría únicamente el cruce desde una edificación hasta el poste donde se

instalaría la small cell. La presencia de conexiones similares en el sector indica que esta ruta podría implementarse aprovechando parte de la infraestructura existente y sin utilizar recorridos complejos.

Figura 31

Evidencia de cableado e infraestructura existente para SC3.



Nota. Fotografía tomada por el autor durante el reconocimiento del área de estudio.

Small cell 4: En la ubicación de la small cell 4, el recorrido de conexión es relativamente simple, ya que se limita a un cruce en esquina entre edificaciones y a un tramo de cableado sobre fachada vertical hasta el punto de instalación. Nuevamente este tipo de configuración se encuentra presente en el entorno, lo que indica que la integración de la small cell puede realizarse utilizando rutas existentes, sin necesidad de modificaciones significativas en la infraestructura urbana.

Figura 32

Evidencia de cableado e infraestructura existente para SC4.



Nota. Fotografía tomada por el autor durante el reconocimiento del área de estudio.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

En Capitulo V, se exponen las conclusiones y recomendaciones con énfasis en los resultados obtenidos y enfocados en la futura implementación.

Conclusiones

La evaluación realizada en el entorno de la Plaza e Iglesia de San Francisco mostró que la cobertura y la capacidad no siempre presentan el mismo comportamiento. Aunque la macrocelda mantiene niveles de potencia recibida aceptables en una parte importante del escenario, los resultados de SINR y throughput indican limitaciones de capacidad, principalmente en las zonas afectadas por bloqueos y condiciones NLOS. Por esta razón, la evaluación de una red 5G no debe basarse únicamente en la potencia recibida, sino también en indicadores relacionados con la capacidad.

La simulación también mostró que la incorporación de small cells permite aumentar la capacidad de la red en el entorno patrimonial analizado. Sin embargo, la mejora depende de la ubicación de cada nodo, debido a que las condiciones de propagación generadas por las edificaciones hacen que los resultados varíen entre las diferentes zonas del área de estudio.

El análisis conjunto de la red de acceso y del backhaul permitió comprobar que el dimensionamiento del transporte no debe realizarse asignando una capacidad uniforme a todas las small cells. Las diferencias observadas en cobertura, throughput y área servida hacen que cada nodo genere una demanda distinta, por lo que la planificación del backhaul debe considerar el comportamiento individual de cada estación.

La incorporación de información de altura mediante un modelo 2.5D permitió representar con mayor detalle las condiciones de línea de vista presentes en el área analizada. Un análisis únicamente bidimensional habría simplificado el efecto de las edificaciones sobre la propagación

y podría generar estimaciones menos representativas de cobertura, capacidad y viabilidad de los enlaces de transporte.

Las observaciones efectuadas en campo permitieron identificar infraestructura de cableado ya existente entre edificaciones y elementos urbanos del sector. A partir de ello se identificaron rutas factibles para la conexión de los nodos propuestos, aprovechando infraestructura presente en la zona y reduciendo la necesidad de nuevas intervenciones sobre el patrimonio construido.

Recomendaciones para trabajos futuros

Se recomienda ampliar la simulación hacia sectores urbanos de mayor extensión para analizar el comportamiento de la red y la interacción entre zonas con distintas características. En trabajos futuros también podrían emplearse modelos de propagación que incluyan fenómenos de reflexión y difracción, además de herramientas de trazado de rayos. Esto permitiría representar con mayor detalle las condiciones de propagación en escenarios urbanos complejos.

También se recomienda realizar mediciones de campo para comparar los resultados de la simulación, especialmente en aspectos relacionados con las pérdidas por penetración y las condiciones de propagación en áreas patrimoniales. El estudio podría complementarse con un análisis económico de las alternativas de backhaul, considerando los costos de implementación, mantenimiento y factibilidad de despliegue en zonas con restricciones patrimoniales.

Finalmente, se propone profundizar en la relación entre la planificación de redes de telecomunicaciones y las políticas de conservación patrimonial, con el propósito de identificar alternativas que mejoren la conectividad sin afectar las características del entorno histórico.

Referencias

3GPP. (2017). *Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (TR 38.913). 3rd Generation Partnership Project.*

3GPP. (2017). *www.etsi.org.* Obtenido de https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf

3GPP. (2018). *TR 38.874, "Study on Integrated Access and Backhaul (IAB),".*

3GPP. (2020). *3rd Generation Partnership Project*. Obtenido de Gobal Infinityvi: https://www.3gpp.org/

3GPP. (2020). *NR; Base Station (BS) radio transmission and reception.*

3GPP. (2020). *R 38.306, "NR; User Equipment (UE) radio access capabilities".* UIT.

3GPP. (2020). *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16).*

3GPP. (2020). *www.etsi.org.* Obtenido de https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf

3GPP. (2022). *NR; Overall description; Stage-2 (TS 38.300). 3rd Generation Partnership Project.*

Agrawal, G. P. (2010). *Fiber-Optic Communication Systems.* John Wiley & Sons.

Andrews, J. G. (2014). *What will 5G be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(6), 1065–1082.* IEEE.

Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., & Soong, A. C. (2014). *What will 5G be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(6), 1065–1082.* Obtenido de ieeexplore.ieee.org: https://ieeexplore.ieee.org/document/6824752

Andrews, J., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S., Lozano, A., Soong, A., & Zhang, J. (Junio de 2014). What Will 5G Be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, págs. 1065–1082.

Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador. Registro Oficial No. 449.*

Asamblea Nacional del Ecuador. (2016). *Ley Orgánica de Cultura. Registro Oficial Suplemento No. 913.*

Battelli, E. (2021). La decisión robótica: algoritmos, interpretación y justicia predictiva. *Revista de Derecho Privado*(40). doi:https://doi.org/10.18601/01234366.n40.03

Checko, A., Christiansen, H. L., Yan, Y., Scolari, L., Kardaras, G., & Berger, M. S. (2015). *ieeexplore.* Obtenido de Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview: https://ieeexplore.ieee.org/document/6897914

Cisco. (2020). *cisco.com.* Obtenido de https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html

COST 231. (1999). *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems, European Communities.* European Commission.

Dahlman, E. P. (2018). *5G NR: The next generation wireless access technology. Academic Press.*

Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2018). *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology.* ambridge: Academic Press.

Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2018). *5G NR: The next generation wireless access technology. Academic Press.* Elsevier.

Ericsson. (2023). *Ericsson Mobility Report. Ericsson.*

Freeman, R. L. (2006). *Radio System Design for Telecommunications.*

Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications.* Cambridge University Press.

Hata, M. (Agosto de 1980). *Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services.* Obtenido de ieeexplore: https://ieeexplore.ieee.org/document/1622772

ITU-R. (2015). *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (Recommendation ITU-R M.2083-0).* International Telecommunication Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones - UIT).

ITU-R. (Septiembre de 2015). *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (Recommendation ITU-R M.2083-0). International Telecommunication Union.* Obtenido de www.itu.int: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/r-rec-m.2083-0-201509-i!!pdf-e.pdf

ITU-R. (2017). *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020, Report ITU-R M.2412-0.*

ITU-R. (2017). *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s), Report ITU-R M.2410-0.*

ITU-R. (2017). *Recommendation M.2412-0, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020.* UIT.

ITU-R. (2019). *Recommendation P.1411, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems.*

ITU-R. (2023). *Recommendation ITU-R P.2109: Prediction of building entry loss, 2023/2024 edition.*

ITU-R. (2023). *Recommendation ITU-R P.2109-2: Prediction of building entry loss.* UIT.

Lara Calderón, M. L. (Noviembre de 2023). *Heritage (MDPI).* Obtenido de https://www.mdpi.com/2571-9408/6/12/393

Molisch, A. F. (2012). *Wireless communications. Wiley.*

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2020). *Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.* Quito.

Pérez Herrera, S., Villamarín, D., & Altamirano, D. (Abril de 2024). Desafíos para la implementación de redes móviles 5G en Ciudades Patrimoniales: caso particular de Quito. *RISTI – Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, págs. 594–606.

Rappaport, T. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed.* Prentice Hall.

Rappaport, T. S., Jr, R. W., Daniels, R. C., & Murdock, J. N. (2017). *Millimeter WaveWireless Communications.* PRENTICEHALL.

Rappaport, T. S., MacCartney, G. R., Samimi, M. K., & Sun, S. (2015). *Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design.* IEEE.

Sawad, I., Nilavalan, R., & Al-Raweshidy, H. (2023). Backhaul in 5G systems for developing countries: A literature review. *IET Communications*, págs. 659–669.

Sun, S., Rappaport, T. S., Heath, R. W., Nix, A., & Rangan, S. (2014). *"MIMO for millimeter-wave wireless communications: Beamforming, spatial multiplexing, or both?", IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 12, pp. 110–121.*

Sun, S., Rappaport, T. S., Rangan, S., Thomas, T. A., Ghosh, A., Kovács, I. Z., . . . Järveläinen., J. (2016). *Propagation Path Loss Models for 5G Urban Microand Macro-Cellular Scenarios.* Nueva York.