UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema: "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"

Trabajo de Integración Curricular Previo a la obtención del Título de Ingeniero
En Telecomunicaciones

Elaborado por:
Ortiz Muñoz Marlon Jahir

Director del Proyecto:
Ing. Pérez Herrera Nelson Santiago



Agenda

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS Y ACTIVIDADES
- METODOLOGÍA
- ESCENARIOS Y PARÁMETROS TÉCNICOS
- ANÁLISIS Y RESULTADOS
- DIMENSIONAMIENTO DEL BACKHAUL
- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Agenda

- INTRODUCCIÓN
  - Contexto del problema
  - Estado del arte
  - Alcance de la investigación
- OBJETIVOS Y ACTIVIDADES
- METODOLOGÍA
- ESCENARIOS Y PARÁMETROS TÉCNICOS
- ANÁLISIS Y RESULTADOS
- DIMENSIONAMIENTO DEL BACKHAUL
- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Contexto del Problema

Nuevos requerimientos de conectividad
- Mayor velocidad
- Menor latencia
- Más dispositivos conectados

→

Tecnologías habilitadoras de 5G
- Nuevas bandas de frecuencia
- Massive MIMO y beamforming
- Small cells

→

Transformación de la infraestructura
- Red más densificada
- Arquitectura flexible
- Mayor número de nodos

→

Impacto sobre la red de transporte
- Más tráfico agregado
- Mayor capacidad de backhaul
- Mayores exigencias de latencia y disponibilidad



Centro Histórico de Quito
Zona de alto valor patrimonial y turístico

ENTORNO PATRIMONIAL

- Edificaciones densas
- Calles estrechas
- Restricciones de instalación
- Actividad turística y comercial

Cobertura + capacidad + planificación del backhaul

Estado del Arte

Metodologías de evaluación a nivel de sistema	Modelos de propagación para 5G	Comportamiento de la propagación en entornos urbanos	Densificación mediante small cells	Arquitectura 5G NR y relación con la red de transporte	Red de transporte y dimensionamiento del backhaul	Desafíos para 5G en ciudades patrimoniales
ITU-R (2017)	3GPP TR 38.901 (2020)	Rappaport et al. (2017)	Andrews et al. (2014)	Dahlman et al. (2018)	Sawad y Nilavalan (2023)	Pérez Herrera, Villamarín y Altamirano (2024)
• Metodología de evaluación para IMT-2020. • Uso de simulaciones a nivel de sistema. • Métricas: cobertura, capacidad y throughput.	• Modelos de canal en frecuencias 0.5 – 100 GHz. • Condiciones LOS / NLOS. • Pérdidas por distancia, bloqueo y penetración.	• Influencia de la morfología urbana y obstrucciones físicas. • Impacto en la pérdida de trayecto y calidad del enlace. • Mayor afectación en frecuencias altas o medias.	• Estrategia clave para incrementar la capacidad. • Favorece la reutilización del espectro y el throughput. • Retos: interferencia y exigencias de la red de transporte.	• Visión integral de 5G NR: arquitectura y funcionamiento. • Relación entre RAN, backhaul y desempeño del sistema. • Base para analizar la capacidad del transporte generada por la red de acceso.	• Revisión de alternativas de transporte en 5G. • El backhaul debe dimensionarse adecuadamente para evitar limitaciones. • Planificación clave en regiones con infraestructura limitada.	• Restricciones urbanísticas y de patrimonio. • Limitaciones para instalar nueva infraestructura. • Caso: Centro Histórico de Quito. • Necesidad de estrategias que mejoren cobertura y capacidad sin afectar el valor patrimonial.

Alcance de la investigación

Caso de estudio

Plaza e Iglesia de San Francisco
Centro Histórico de Quito

Escenarios analizados

Macrocelda
Macrocelda + small cells

Métricas evaluadas

Cobertura
SINR
Throughput
Capacidad

Aplicación de resultados

Estimación de requerimientos del backhaul



Área de estudio

Plaza e Iglesia de San Francisco

Fuera del alcance

- Implementación física de la red
- Diseño económico detallado
- Modelado electromagnético de alta precisión
- Validación experimental completa

Agenda

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS Y ACTIVIDADES
- METODOLOGÍA
- ESCENARIOS Y PARÁMETROS TÉCNICOS
- ANÁLISIS Y RESULTADOS
- DIMENSIONAMIENTO DEL BACKHAUL
- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Objetivo y actividades

Objetivo

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

Objetivos específicos y actividades

- Fundamentos técnicos del estudio: Redes 5G, propagación radioeléctrica, densificación y backhaul.
- Construcción y evaluación del escenario: Representación digital del sector de San Francisco y análisis de escenarios con macrocelda y small cells
- Análisis de desempeño y transporte: Definición de una propuesta de planificación que integre la mejora del servicio, el dimensionamiento del backhaul y las restricciones técnicas, urbanísticas y normativas del entorno patrimonial.

Agenda

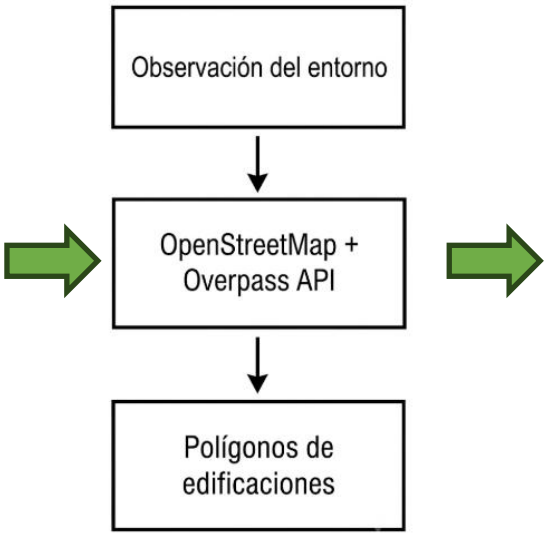
- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS Y ACTIVIDADES
- METODOLOGÍA
  - Obtención de información geográfica
  - Construcción del entorno digital
  - Modelado radioeléctrico
  - Simulación de escenarios
  - Evaluación y dimensionamiento
- ESCENARIOS Y PARÁMETROS TÉCNICOS
- ANÁLISIS Y RESULTADOS
- DIMENSIONAMIENTO DEL BACKHAUL
- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Obtención de información geográfica

Los datos geográficos obtenidos permitieron modelar la geometría del entorno y la distribución de las edificaciones.

Vista satelital



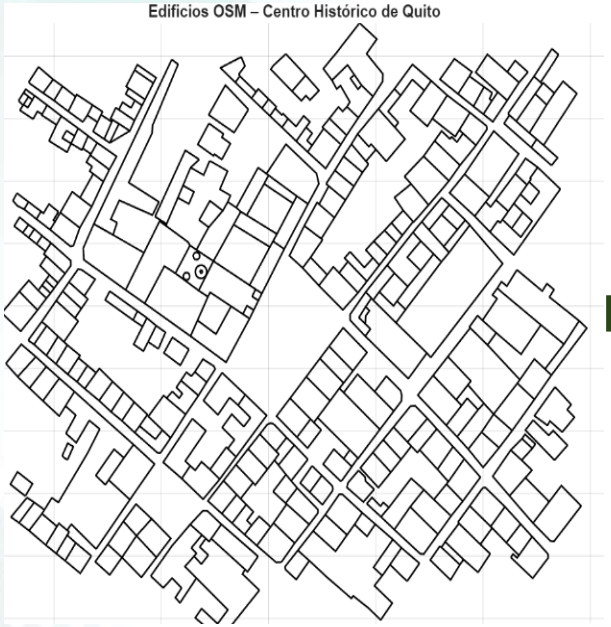


Vista satelital



Construcción del entorno digital

Polígonos vectoriales



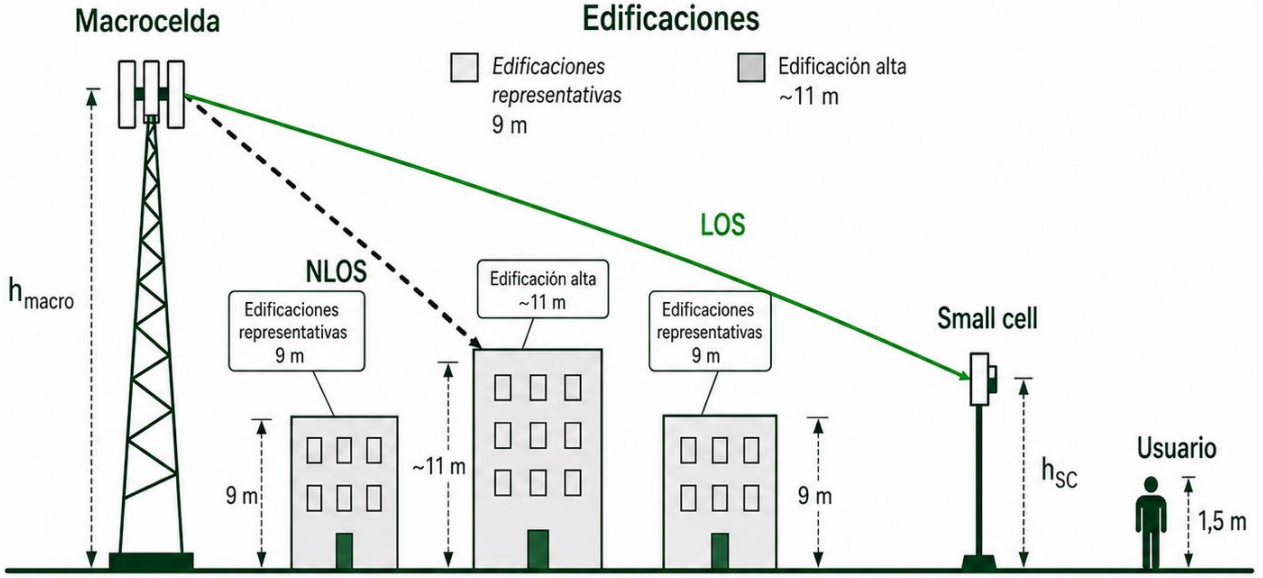
Máscara urbana en MATLAB



Asignación de alturas del entorno

- Edificaciones: altura representativa según el entorno
- Usuario: **1,5 m**
- Macrocelda: altura definida independientemente
- Small cells: altura definida independientemente

La interacción entre geometría y altura permite identificar trayectorias **LOS/NLOS** y representar el efecto dominante de la morfología urbana.



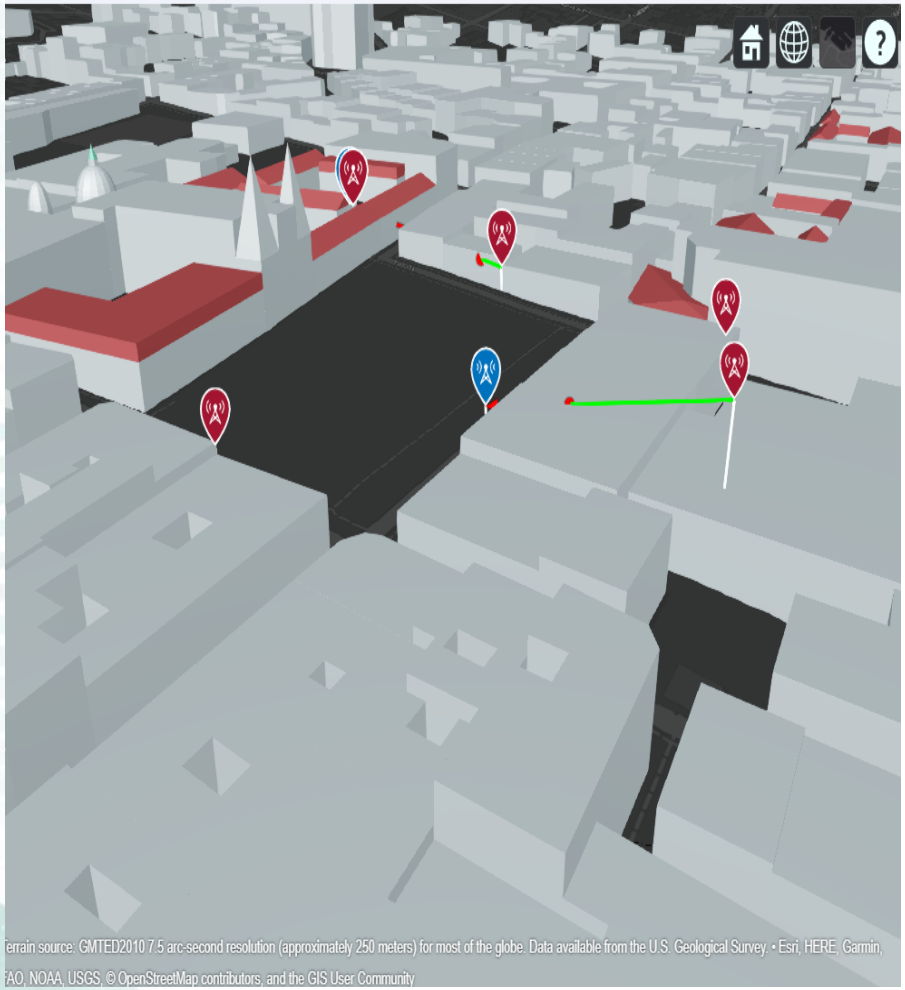
Construcción del entorno digital

Detalle de alturas



Construcción del entorno digital

Detalle de alturas





Simulación de escenarios

Escenario base

Macrocelda únicamente

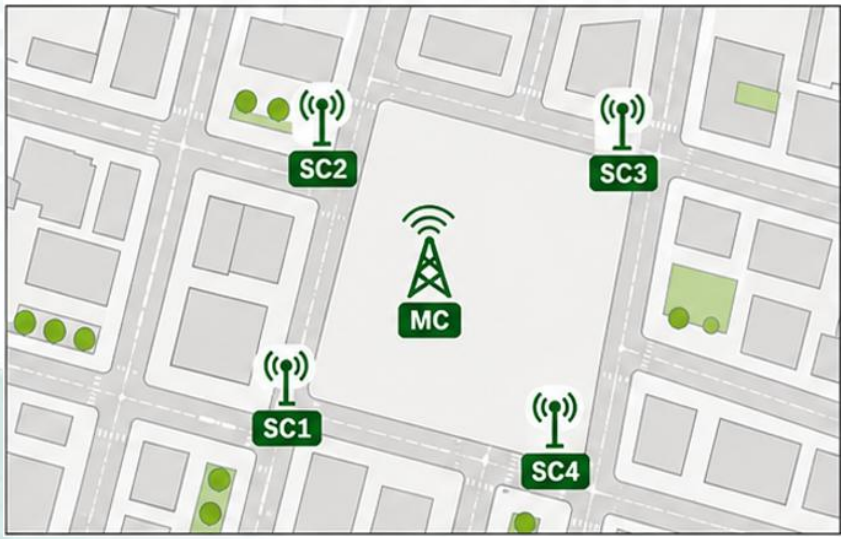


Identificación de puntos de interés



Escenario densificado

Macrocelda + small cells



Variables comparadas

- Potencia recibida
- SINR
- Throughput
- Área en déficit

Modelado radioeléctrico

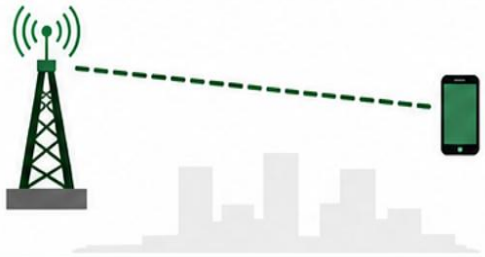
Modelo Close-In (CI)

Modelo empírico para estimar pérdidas por distancia en simulaciones a nivel de sistema

$$PL_{f,d}^{CI}\,[dB] = FSPL(f, 1m)[dB] + 10nlog_{10}\,(d) + x_{\sigma}^{CI}$$ (3GPP, 2020)

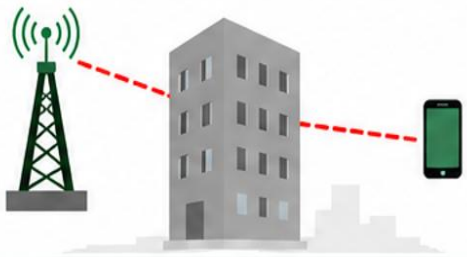
Incorporación en el entorno urbano

1. Trayectoria despejada (LOS)



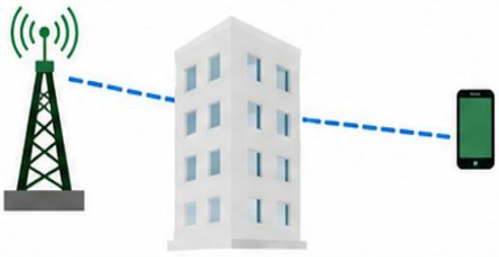
Solo se considera la pérdida por distancia mediante el modelo Close-In (CI).

2. Trayectoria bloqueada (NLOS)



Se añade una pérdida adicional por bloqueo debido a las edificaciones del entorno.

3. Cruce de fachadas / muros



Se añade una pérdida equivalente por cada fachada o muro atravesado, representando de forma agregada el efecto de materiales patrimoniales.



Materiales patrimoniales como adobe, piedra y ladrillo se consideran de forma conceptual; no se modelaron individualmente por edificio.

Justificación del modelo de pérdidas equivalentes

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Limitación de la información

- Material y espesor de fachadas no disponibles.
- Composición constructiva heterogénea.
- No existe caracterización por edificio.

Decisión metodológica

- Se adopta una pérdida equivalente agregada.
- Representa bloqueo, fachadas y efecto patrimonial.
- Mantiene una complejidad adecuada para simulación a nivel de sistema.

Fundamento técnico

- 3GPP considera pérdidas adicionales por penetración y materiales.
- ITU-R P.2109 propone *building entry loss* para planificación.
- El objetivo es evaluar cobertura, SINR, throughput y backhaul, no modelar cada edificio electromagnéticamente.

Edificio real complejo

Estructura patrimonial con múltiples capas y materiales heterogéneos

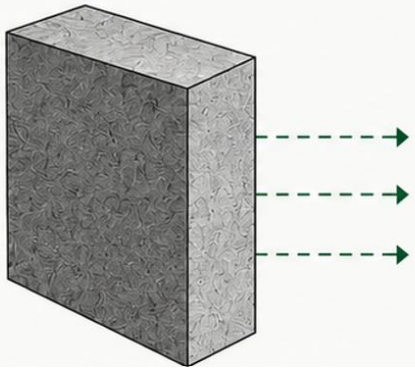


Múltiples capas y materiales

- Acabado (revoque/pintura)
- Ladrillo / adobe
- Mortero
- Piedra
- Relleno / mezcla heterogénea

Modelo equivalente simplificado

Representación agregada mediante una única pérdida equivalente



Pérdida equivalente L_{eq}

Building entry loss

Pérdida adicional que sufre la señal al entrar a un edificio desde el exterior hacia el interior.

Origen:
Fachada(s) y elementos de entrada (ventanas, puertas, marcos, etc.).

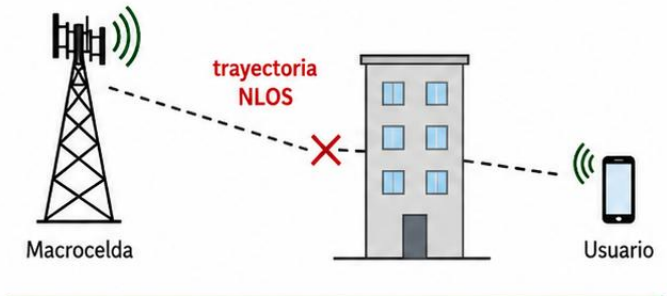
Representa:
Atenuación por penetración, materiales y múltiples interacciones.

Uso:
Parámetro agregado para planificar cobertura y capacidad a nivel de sistema.

Referencia:
ITU-R P.2109 (*building entry loss*), considerado también en 3GPP.

Modelado de pérdida por edificaciones

Caso Macrocelda – bloqueo por edificaciones

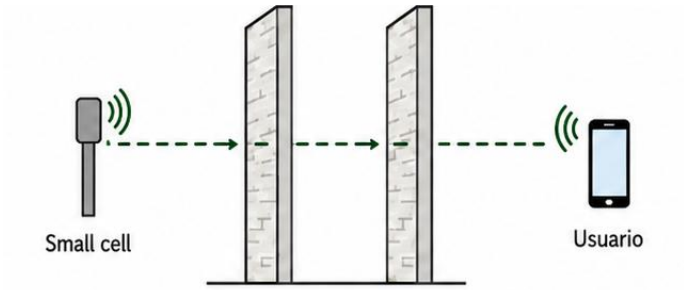


$$PL_{total} = PL_{CI} + L_{bloqueo}$$

$$L_{bloqueo} = \begin{cases} 0 & si\ N_b = 0 \\ \min(L_1 + \Delta L\ (N_b - 1), L_{max})\ , si\ N_b \geq 1 \end{cases}$$

N_b : número de edificaciones bloqueantes
L_1 : pérdida equivalente del primer bloqueo
ΔL : incremento por cada edificio adicional
L_{max} : límite máximo de penalización

Caso Small cell – cruce de fachada



$$PL_{total} = PL_{CI} + \min\left(N_f, N_{f,max}\right) L_f$$

N_f : número de fachadas atravesadas
$N_{f,max}$: máximo de cruces considerados
L_f : pérdida equivalente por cada cruce

La recomendación ITU-R P.1238 reconoce expresamente modelos de propagación que consideran atenuación por múltiples paredes y pisos

Potencia recibida y selección del servidor

Ecuación principal

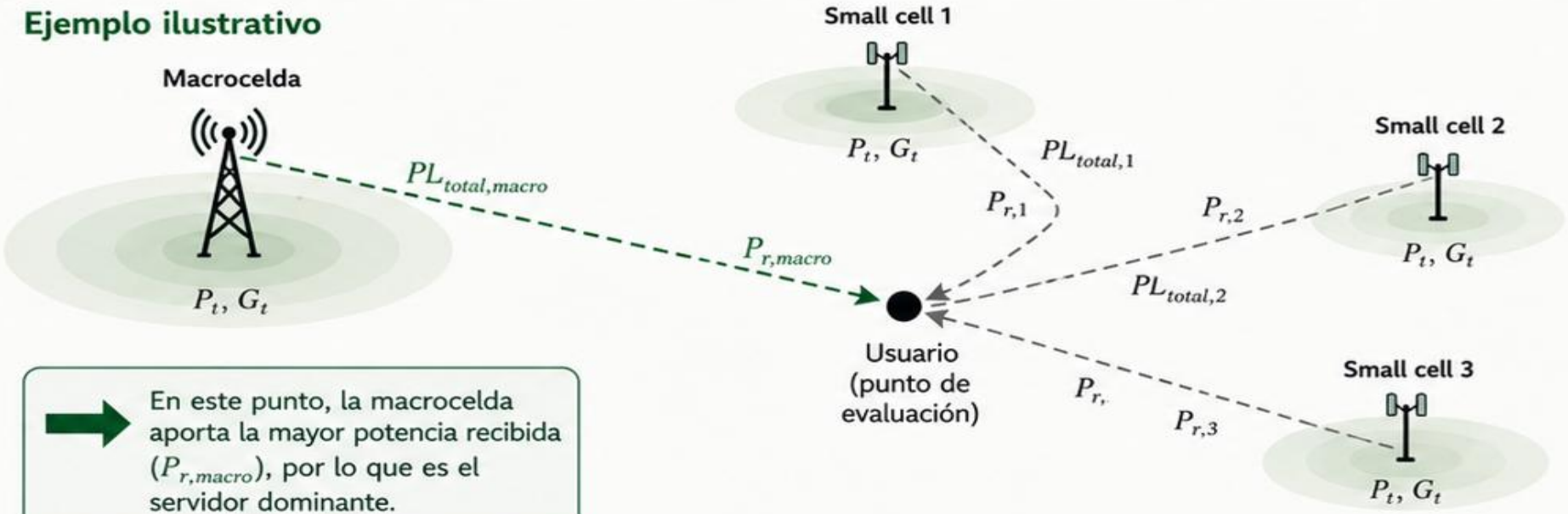
$$P_{r,i} = P_{t,i} + G_{t,i} + G_r - PL_{total,i}$$

Selección del servidor (nodo dominante)

$$s = \arg_i \max(P_{r,i})$$

1. **Pérdida total del enlace** $PL_{total,i}$
2. **Potencia recibida desde cada nodo** $P_{r,i}$
3. **Comparación entre nodos** $P_{r,1},\ P_{r,2},\ \ldots,\ P_{r,N}$
4. **Servidor dominante** $s = \arg\max_i (P_{r,i})$

Ejemplo ilustrativo



En este punto, la macrocelda aporta la mayor potencia recibida ($P_{r,macro}$), por lo que es el servidor dominante.

Modelado de interferencia y cálculo de SINR

Interferencia

Suma en escala lineal

$$I = \sum_{i \neq s} P_r, i$$

Calculo de SINR

Relación señal a interferencia más Ruido

$$SINR = \frac{S}{I + N}$$

1. Servidor dominante

$$s = \arg\max_{i}(P_{r,i})$$

2. Señal útil

$$S = P_{r,s}$$

3. Interferencia

Potencias de los nodos $i \neq s$

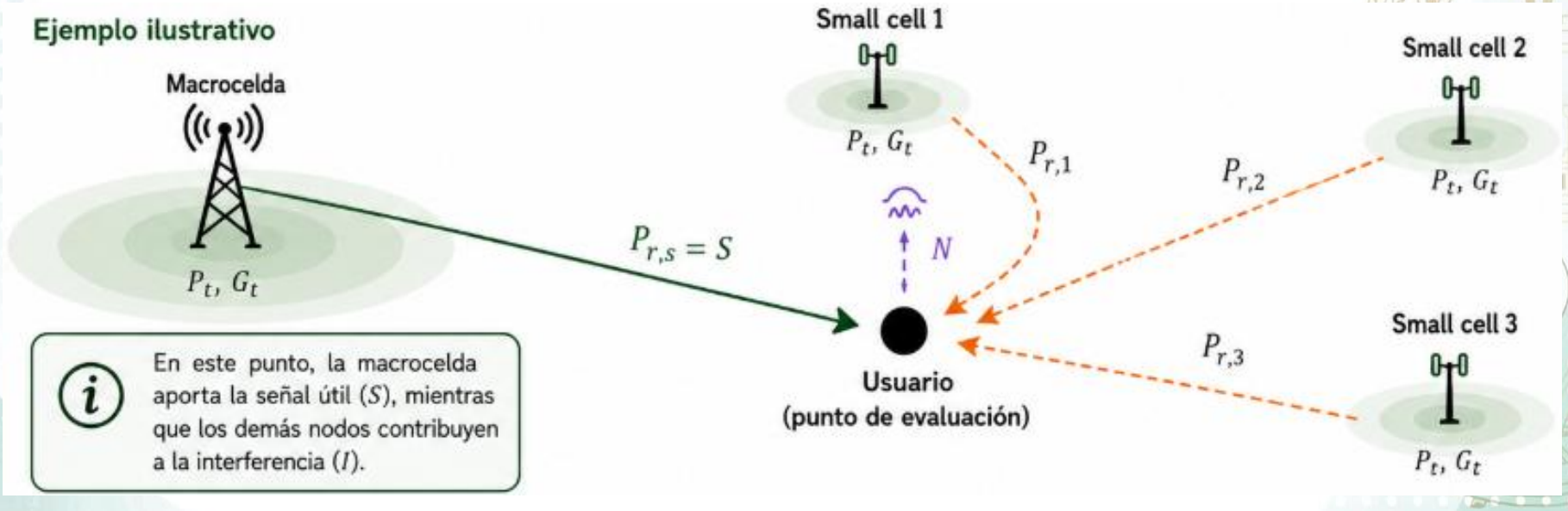
4. Ruido

$$N = kT_0BF$$

5. SINR

$$\text{SINR} = \frac{S}{I + N}$$

Ejemplo ilustrativo



En este punto, la macrocelda aporta la señal útil (S), mientras que los demás nodos contribuyen a la interferencia (I).

Throughput y métricas de evaluación

Cálculo de Throughput

SINR Lineal

Eficiencia espectral

$$C = B \log_2(1 + SINR)[bps]$$

Throughput por punto

$$T = \eta C \ [bps]$$

η: *eficiencia del sistema*

Métricas de evaluación

Métricas globales

- Throughput promedio
- Área con throughput < 10 Mbps
- Área con throughput < 25 Mbps
- Área en capacidad máxima ($T \geq T_{cap}$

Puntos de evaluación

Potencia recibida (P_r)	[dBm]
SINR	[dB]
Throughput	[Mbps]
Comparación entre escenarios	

Métricas por nodo

Área servida	A_{nodo} [km^2]
Throughput medio	$\overline{T}_{nodo}$ [Mbps]
Percentil 50 (mediana)	p_{50} [Mbps]
Percentil 90	p_{90} [Mbps]
Percentil 95	p_{95} [Mbps]

Dimensionamiento del backhaul.

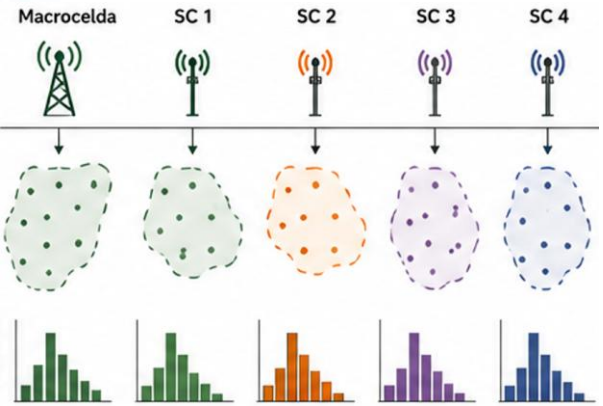
Margen de diseño

$(1 + M)$

Capacidad de backhaul requerida



Asignación de tráfico por nodo



- Cada punto de la malla se asocia al nodo servidor.
- Se obtiene el área servida y su distribución de throughput

Selección de la demanda de diseño

p_{90}: demanda alta.
p_{95}: condición exigente.
Se prioriza un percentil alto para evitar subdimensionamiento

Dimensionamiento de backhaul

Capacidad de backhaul requerida por el nodo i

$$C_{BH,i} = T_{p,i}(1 + M)$$

Demanda agregada en el punto de agregación

$$C_{agregada} = \sum_{i} C_{BH,i}$$



Agenda

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS Y ACTIVIDADES
- METODOLOGÍA
- ESCENARIOS Y PARÁMETROS TÉCNICOS
  - Zona de estudio
  - Marco normativo y restricciones de despliegue
  - Escenario con macrocelda
  - Escenario densificado
  - Parámetros de simulación
- ANÁLISIS Y RESULTADOS
- DIMENSIONAMIENTO DEL BACKHAUL
- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Descripción de la zona de estudio

El entorno combina obstrucciones urbanas, restricciones patrimoniales y demanda de conectividad, por lo que constituye un escenario exigente para la planificación 5G.





- Plaza abierta con alta concentración de usuarios
- Punto de interés urbano, histórico y ciudadano
- Zona con actividad turística y comercial constante
- Entorno mixto: espacios abiertos rodeados por edificaciones patrimoniales

Marco normativo y restricciones de despliegue

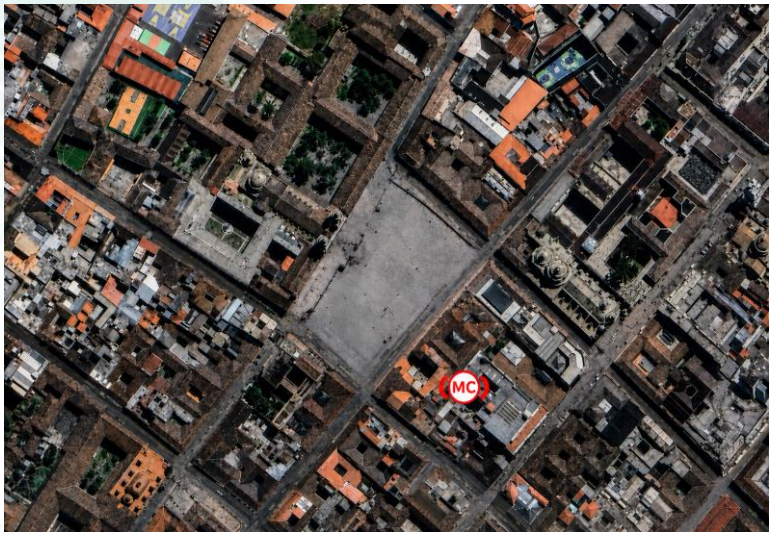
Nivel	Instrumento	Implicación para el despliegue
Nacional	Constitución del Ecuador (Art. 379)	Reconoce y protege los bienes históricos, arquitectónicos y urbanos como patrimonio cultural.
Nacional	Ley Orgánica de Cultura	Las intervenciones en áreas patrimoniales deben respetar las características arquitectónicas y urbanísticas del entorno.
Local	Plan Especial del Centro Histórico de Quito	Regula las intervenciones en edificaciones y espacio público para evitar afectaciones a la imagen histórica del sector.

Implicaciones técnicas

- Priorizar infraestructura previamente autorizada
- Reutilizar postes, ductos y canalizaciones existentes
- Reducir la instalación de equipos visibles
- Integrar small cells en mobiliario urbano o fachadas autorizadas
- Gestionar permisos antes de intervenir el espacio público

Escenario con macrocelda

Escenario base





Parámetro	Descripción
Frecuencia portadora	3.5 GHz
Ancho de banda	100 MHz
Potencia de transmisión	30 dBm
Altura de antena (Tx)	12 m
Altura del receptor (UE)	1.5 m
Exponente de pérdida n	3.3
Distancia de referencia (d_0)	1 m

Propósito del escenario base

- Condición inicial de referencia
- Identificación de limitaciones por distancia y bloqueo
- Comparación posterior con el escenario densificado

Escenario densificado con small cells

El escenario densificado incorpora cuatro small cells que operan junto con la macrocelda y comparten la misma banda de frecuencia.



Parámetro	Descripción
Frecuencia portadora	3.5 GHz
Ancho de banda	100 MHz
Potencia de transmisión	20 dBm
Altura de antena (Tx)	5-8 m
Altura del receptor (UE)	1.5 m
Exponente de pérdida n	2.6
Distancia de referencia (d_0)	1 m

Nodo	Infraestructura y ubicación
SC1	Poste ubicado en el sector suroccidental de la plaza, en un entorno de aproximadamente tres pisos.
SC2	Fachada interior del complejo de la Iglesia de San Francisco, en un entorno de aproximadamente dos pisos.
SC3	Poste ubicado en el sector nororiental de la plaza, en un entorno de aproximadamente dos pisos.
SC4	Fachada exterior de una vivienda tradicional, ubicada en el callejón adyacente a la plaza, en un entorno de aproximadamente dos pisos.


Ubicación propuesta para SC1


Ubicación propuesta para SC2


Ubicación propuesta para SC3


Ubiucación propuesta para SC4

Selección de puntos de interés

Se definieron cinco puntos dentro del entorno de estudio que permiten evaluar el desempeño de la red de forma puntual

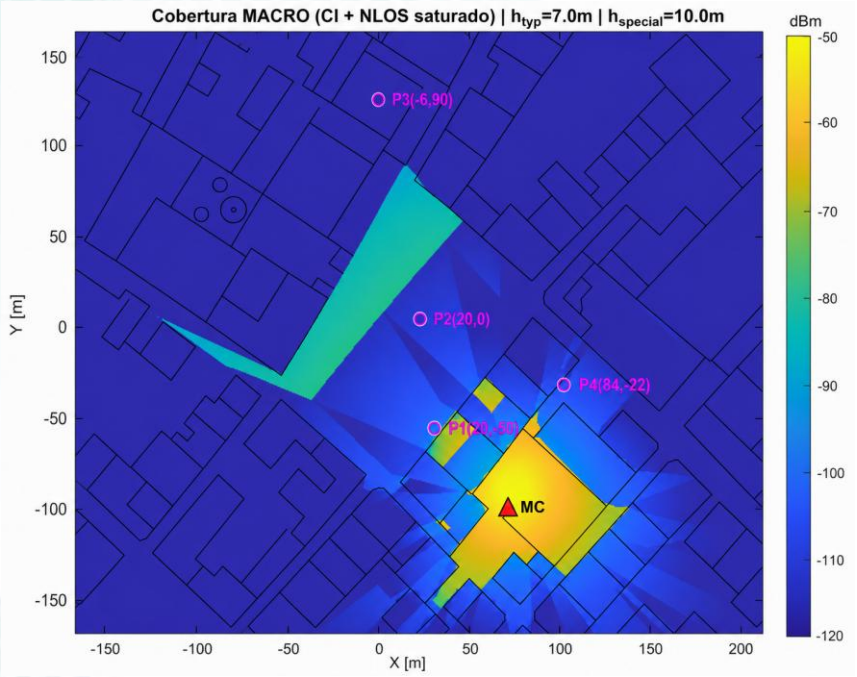


Punto de estudio	Condición del punto
P1	Debajo de la fachada del edificio trasmisor (NLOS).
P2	Ubicado en la Plaza, tiene línea de vista, pero afectado por la distancia a la que se encuentra de la estación.
P3	Punto elegido para análisis de requerimientos de backhaul, ubicado dentro de la fachada de 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.

Agenda

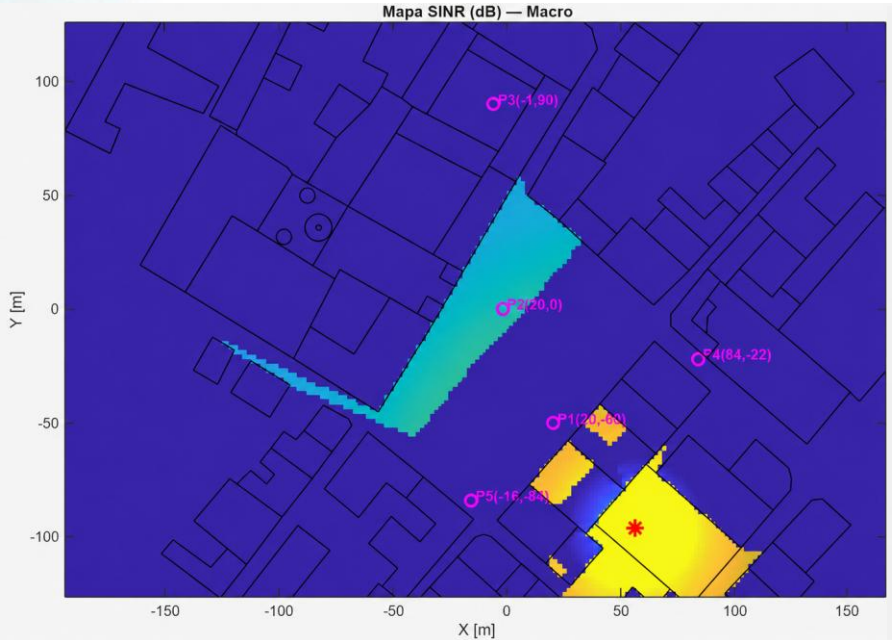
- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS Y ACTIVIDADES
- METODOLOGÍA
- ESCENARIOS Y PARÁMETROS TÉCNICOS
- ANÁLISIS Y RESULTADOS
  - Métricas en escenario base
  - Métricas en escenario densificado
  - Comparación entre escenarios
- DIMENSIONAMIENTO DEL BACKHAUL
- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

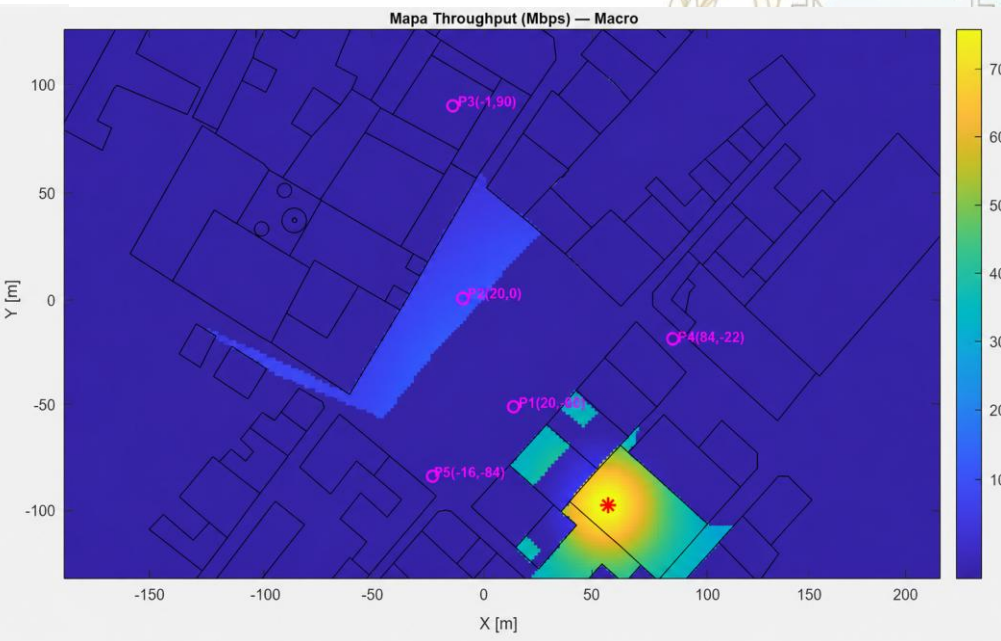
Escenario base: potencia, SINR y throughput



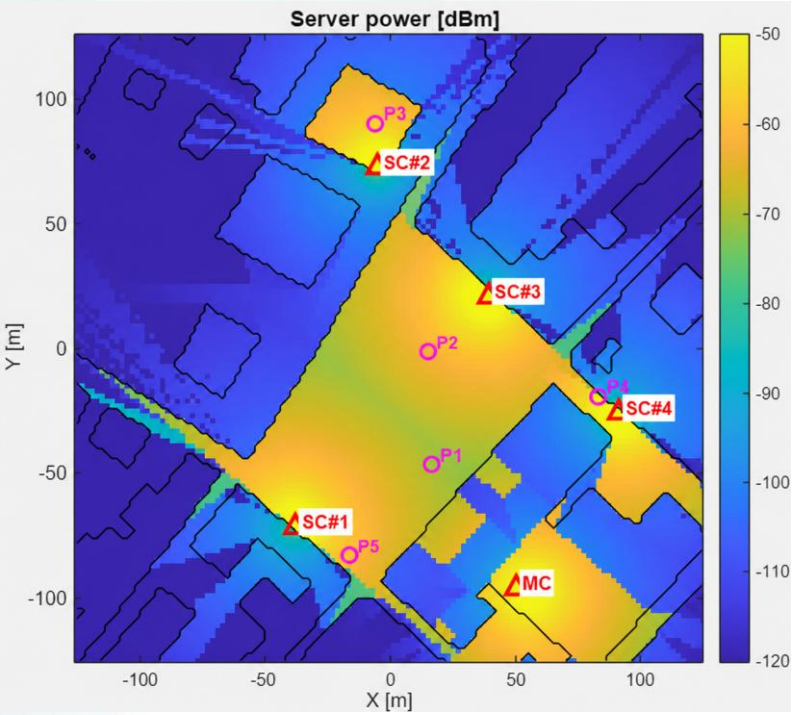
Punto de estudio	Potencia recibida (dBm)	SINR (dB)	Throughput (Mbps)
P1	−109.80	−23.44 dB	0.39
P2	−80.99	5.37 dB	129.14
P3	−126.95	−40.59 dB	0.01
P4	−120.05	−33.69 dB	0.04
P5	−112.92	−26.56 dB	0.19

- **Throughput promedio:** 14,72 Mbps
- **Área con T < 10 Mbps:** 88,67 %
- **Área con T < 25 Mbps:** 88,79 %



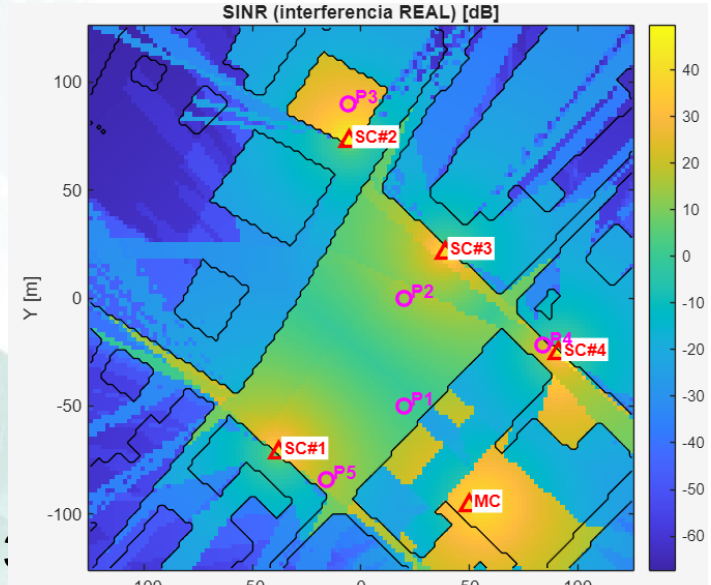


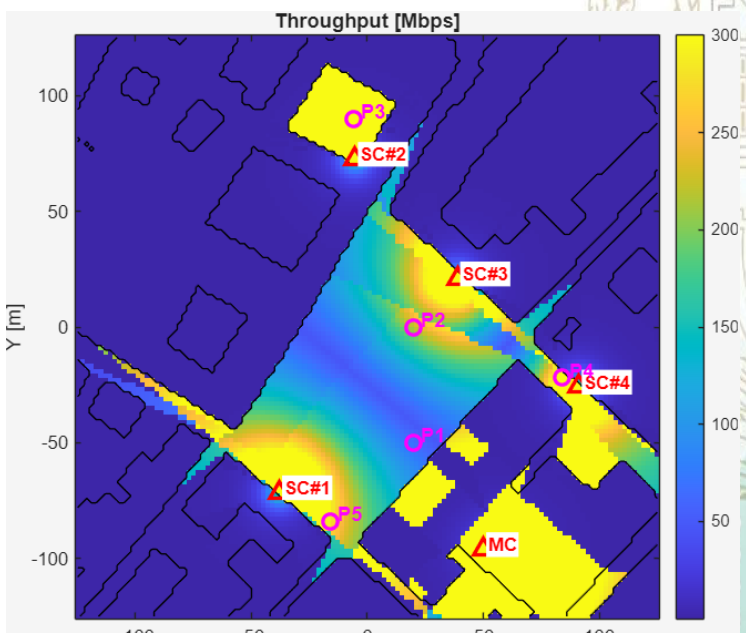
Escenario densificado: potencia, SINR y throughput



Punto de estudio	Potencia recibida (dBm)	SINR (dB)	Throughput (Mbps)
P1	-69.64	1.28	61.44
P2	-61.58	5.10	104.12
P3	-55.18	32.11	300
P4	-48.56	29.15	300
P5	-59.74	16.07	268.64

- **Throughput promedio**: 57.62 Mbps
- **T<10 Mbps**: 70.24 %
- **T<25 Mbps:** 72.12 %





Comparación global: escenario base vs. densificado

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

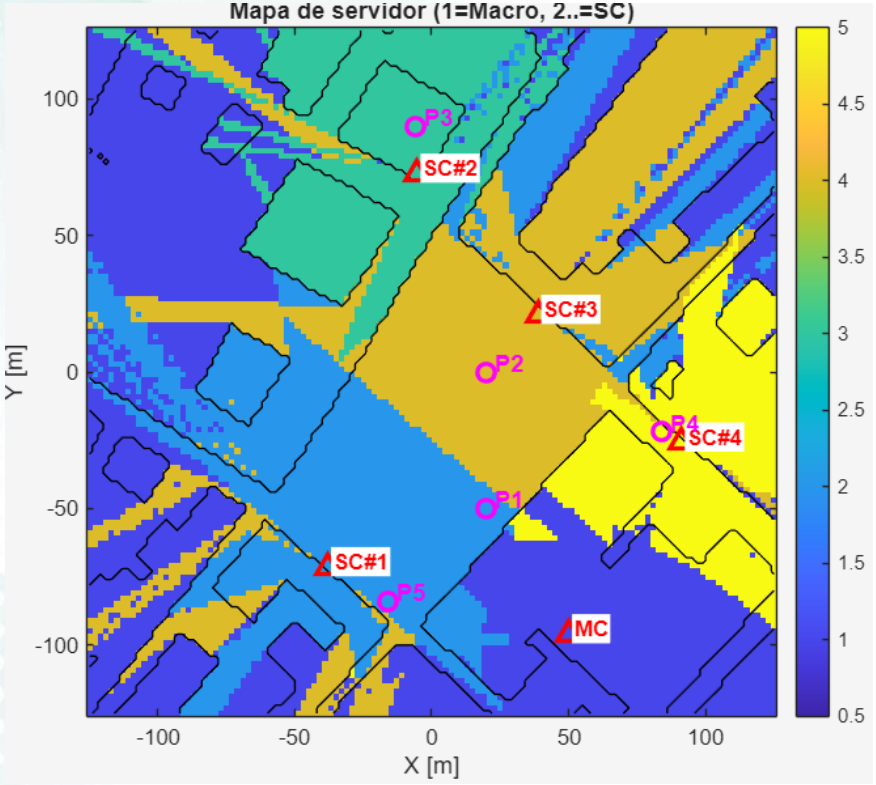
Escenario 1

- **Throughput promedio:** 14,72 Mbps
- **Área con T < 10 Mbps:** 88,67 %
- **Área con T < 25 Mbps:** 88,79 %

Escenario 2

- **Throughput promedio**: 57.62 Mbps
- **T<10 Mbps**: 70.24 %
- **T<25 Mbps:** 72.12 %

Métricas por nodo



Cada small cell atiende sectores con distinta extensión, geometría urbana y nivel de throughput.

SC	Área (%)	Tmean	p50	p90	p95	Capacidad (%)
1	21.92	70.01	1.04	256.71	300.00	6.0
2	12.33	46.78	1.07	300.00	300.00	14.6
3	23.72	59.63	1.17	200.25	254.17	3.0
4	9.68	60.05	2.64	300.00	300.00	12.6

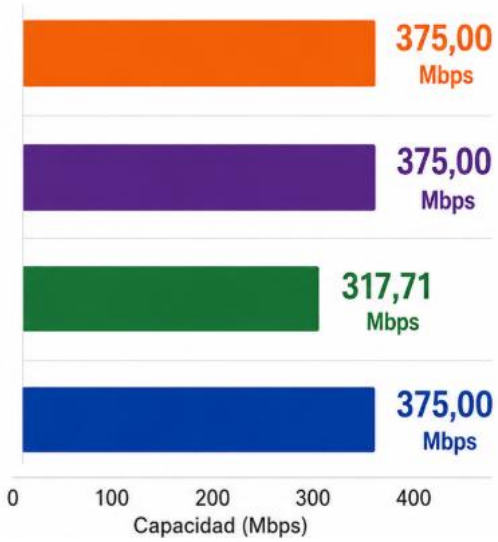
Agenda

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS Y ACTIVIDADES
- METODOLOGÍA
- ESCENARIOS Y PARÁMETROS TÉCNICOS
- ANÁLISIS Y RESULTADOS
- DIMENSIONAMIENTO DEL BACKHAUL
  - Demanda de backhaul por small cell
  - Alternativas tecnológicas de backhaul
  - Propuesta final de backhaul
- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Dimensionamiento del backhaul

Capacidad requerida por small cell

Nodo	p95 Throughput (Mbps)	Margen (1 + M)	Capacidad requerida $C_{BH,i}$ (Mbps)
SC 1	300,00	1,25	375,00 Mbps
SC 2	300,00	1,25	375,00 Mbps
SC 3	254,17	1,25	317,71 Mbps
SC 4	300,00	1,25	375,00 Mbps



Capacidad total agregada (p95 + 25%)

1442,71 Mbps

La capacidad requerida varía entre las small cells debido a las diferencias en área servida y distribución de throughput.

El dimensionamiento individual evita asignar una capacidad uniforme a nodos con demandas diferentes.



Alternativas tecnológicas de backhaul

Tecnología	Capacidad frente a la demanda	Viabilidad en el entorno patrimonial	Recomendación
Fibra óptica	Supera con holgura la capacidad requerida por cada small cell y permite transportar la demanda agregada sin convertirse en un cuello de botella. Ofrece alta estabilidad, gran disponibilidad y baja latencia.	Su implementación puede verse limitada por restricciones de obra civil. Es más viable cuando se reutilizan ductos, canalizaciones o infraestructura existente, reduciendo el impacto en el entorno patrimonial.	Solución principal
Enlace de microondas	Puede cubrir la demanda individual de los nodos con equipos de alta capacidad, siempre que se seleccione el ancho de banda y la modulación adecuados.	Requiere línea de vista entre los puntos y antenas instaladas en estructuras elevadas. Su despliegue debe evaluar el impacto visual y la disponibilidad de puntos de montaje compatibles con las normativas patrimoniales.	Solución complementaria
Enlace en ondas milimétricas (mmWave)	Ofrece alta capacidad en distancias cortas, adecuada para conectar small cells cercanas. Su capacidad disminuye con la distancia y con la calidad del enlace.	Requiere línea de vista estricta y es más sensible a obstáculos, lluvia y atenuación atmosférica. Es viable en trayectos cortos y discretos, con baja afectación visual.	Aplicación puntual

Evidencia de infraestructura existente en el entorno de estudio









Agenda

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS Y ACTIVIDADES
- METODOLOGÍA
- ESCENARIOS Y PARÁMETROS TÉCNICOS
- ANÁLISIS Y RESULTADOS
- DIMENSIONAMIENTO DEL BACKHAUL
- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Conclusiones

La evaluación mostró que una potencia recibida aceptable no garantiza una capacidad adecuada, ya que el SINR y el throughput se reducen en zonas con bloqueos y condiciones NLOS. Por ello, la planificación de una red 5G debe considerar indicadores de cobertura y capacidad.

También se determinó que el backhaul debe dimensionarse según la demanda individual de cada small cell, debido a las diferencias en cobertura, tráfico y área servida.

El modelo 2.5D permitió representar mejor la línea de vista y el efecto de las edificaciones sobre la propagación y los enlaces de transporte. Además, las observaciones de campo permitieron identificar infraestructura existente que podría aprovecharse para conectar los nodos y reducir intervenciones en el entorno patrimonial.

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.

Trabajos Futuros

Se recomienda ampliar la simulación hacia sectores urbanos de mayor extensión, con el propósito de analizar el comportamiento de la red y la interacción entre zonas con distintas características urbanas.

En trabajos futuros también podrían utilizarse modelos de propagación que incluyan fenómenos como la reflexión y la difracción, además de herramientas de trazado de rayos. Esto permitiría representar con mayor precisión las condiciones de propagación en entornos urbanos complejos.

Asimismo, se recomienda realizar mediciones de campo para comparar los resultados obtenidos mediante la simulación, especialmente en aspectos relacionados con las pérdidas por penetración y las condiciones de propagación en áreas patrimoniales.

El estudio también podría complementarse con un análisis económico de las alternativas de backhaul, considerando los costos de implementación y mantenimiento, así como su factibilidad de despliegue en zonas con restricciones patrimoniales.

¡Gracias por su atención!

Marlon Ortiz
mjortiz10@espe.edu.ec

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓN

CARRERA DE TELECOMUN

Tema: "Análisis de los desafíos y consideraciones téc
de redes móviles 5G en entornos patrimoniales, con é

Trabajo de Integración Curricular Previo a la obter
En Telecomunicacione

Elaborado por
Ortiz Muñoz Marlon

Director del Proye
Ing. Pérez Herrera Nelso