



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**“Diseño de una solución tecnológica basada en femtoceldas para mejorar la cobertura móvil de espacios interiores en la Universidad Nacional de Chimborazo campus
Édison Riera”**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en
Telecomunicaciones**

Autor:
Bolaños Gaspar Conny Lisbeth

Tutor:
PhD. Daniel Antonio Santillán Haro

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Conny Lisbeth Bolaños Gaspar, con cédula de ciudadanía 0850034687, autora del trabajo de investigación titulado: Diseño de una solución tecnológica basada en femtoceldas para mejorar la cobertura móvil de espacios interiores en la universidad nacional de Chimborazo campus Édison Riera, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autora de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 6 de enero del 2026.



Conny Lisbeth Bolaños Gaspar

C.I: 0850034687

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quién suscribe, **Daniel Antonio Santillán Haro** catedrático adscrito a la Facultad de **Ingeniería**, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado **“Diseño de una solución tecnológica basada en femtoceldas para mejorar la cobertura móvil de espacios interiores en la Universidad Nacional de Chimborazo campus Édison Riera”**, bajo la autoría de **Conny Lisbeth Bolaños Gaspar**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 20 días del mes de noviembre de 2025.



Ing. Daniel Antonio Santillán Haro.

CI: 0603141052

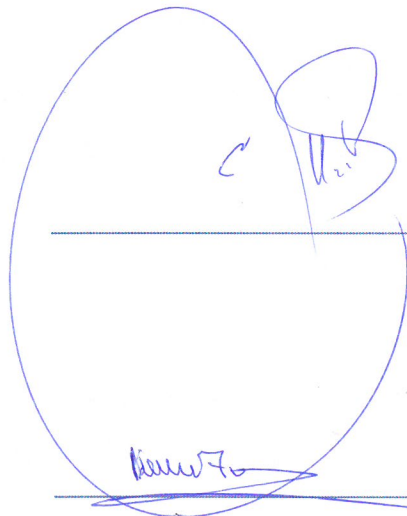
TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

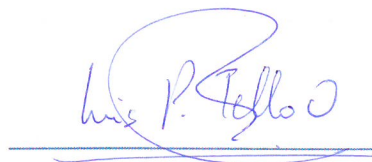
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“Diseño de una solución tecnológica basada en femtoceldas para el mejoramiento de la cobertura móvil de espacios interiores en la Universidad Nacional de Chimborazo campus Edison Riera”**, presentado por **Conny Lisbeth Bolaños Gaspar**, con cédula de identidad número **0850034687**, bajo la tutoría de PhD. Daniel Antonio Santillán Haro; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 06 de enero del 2026.

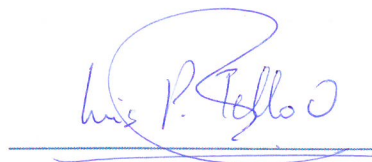
Dr. Marlon Basantes Valverde PhD.
Presidente del Tribunal de Grado



Dr. Klever Torres Rodríguez Mgs.
Miembro del Tribunal de Grado



Ing. Luis Tello Oquendo PhD.
Miembro del Tribunal de Grado





CERTIFICACIÓN

Que, **Bolaños Gaspar Conny Lisbeth** con CC: **0850034687**, estudiante de la Carrera **Telecomunicaciones**, Facultad de **ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Diseño de una solución tecnológica basada en femtoceldas para mejorar la cobertura móvil de espacios interiores en la Universidad Nacional de Chimborazo campus Édison Riera**", cumple con el **3% de similitud** y **9% de Inteligencia Artificial**, de acuerdo con el reporte del sistema Anti plagio **Compilatio**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 05 de diciembre de 2025



Firmado electrónicamente por:
**DANIEL ANTONIO
SANTILLAN HARO**
Validar únicamente con FirmaSC

PhD. Daniel Santillán Haro
TUTOR

DEDICATORIA

A mis queridos padres, por su amor incondicional, su apoyo y sus sacrificios, que han sido la base de cada uno de mis logros.

A mis amadas hijas, mi mayor inspiración, gracias por ser la luz que guía mi esfuerzo y la razón por la que nunca dejo de avanzar.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis padres por todo el apoyo que me han brindado desde el inicio de mi carrera. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación. También quiero agradecer a cada miembro de mi familia que con sus consejos me alentaban a continuar con mis metas y no rendirme jamás.

Quiero agradecer a Dios por mis amadas hijas, quienes son mi mayor inspiración y mi motor para seguir adelante todos los días. Cada logro es también para ustedes.

Quiero agradecer a mi compañero de vida, por su infinito apoyo, paciencia y comprensión durante todos estos años de carrera. Gracias por estar a mi lado en cada paso, brindándome fortaleza en los momentos difíciles y celebrando conmigo cada pequeño triunfo.

Quiero agradecer a mis compañeros, con quienes compartí momentos de esfuerzo, aprendizaje y crecimiento. Gracias por su amistad y por hacer de este viaje académico una experiencia más enriquecedora.

A todos los que de una u otra manera han sido parte de este logro, mi más sincero agradecimiento.

ÍNDICE GENERAL;

DERECHOS DE AUTORIA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
INDICE GENERAL	
INDICE DE TABLAS	
INDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	

CAPÍTULO I	16
1.1. Introducción	16
1.2. Planteamiento del problema	17
1.3. Justificación.....	17
1.4. Objetivos.....	18
1.4.1. General	18
1.4.2. Específicos.....	18
CAPÍTULO II.....	19
2. Marco teórico.....	19
2.1 Telefonía móvil.....	19
2.1.1. Generaciones tecnológicas: de 1G a 6G.....	19
2.1.2. Redes celulares y limitaciones en interiores	23
2.2 Femtoceldas	23
2.2.1. Definición y funcionamiento.....	23
2.2.2. Clasificación.....	24
2.2.3. Estandarización	25
2.2.4. Arquitectura de redes femtocelulares.....	25
2.2.5. Arquitectura interna de una femtocelda	26
2.2.6. Gestión de interferencias de radio	27

2.2.7. Implicaciones de despliegue.....	27
2.2.8. Redes heterogéneas	27
2.2.9. Interoperabilidad con otros elementos de la red	28
2.2.10. Aspectos de seguridad	29
2.2.11. Perspectiva del proveedor de servicio	30
2.2.12. Perspectiva del usuario final	30
2.3 Marco legal	31
2.3.1. Aspectos reglamentarios	31
2.3.2. Constitución de la República del Ecuador	31
2.4 Estado del arte	32
2.4.1. Uso de femtoceldas para resolver el problema de cobertura de telefonía móvil en espacios interiores a nivel mundial.....	32
2.4.2. Uso de femtoceldas para resolver el problema de cobertura de telefonía móvil en espacios interiores en Ecuador.	32
2.4.3. Soluciones que las operadoras en el Ecuador brindan a los clientes individuales cuando estos tienen problemas de cobertura.....	33
CAPÍTULO III	34
3. Metodología	34
3.1. Tipo y diseño de investigación	34
3.2. Método de investigación	34
3.3. Diseño del proceso de investigación	34
3.4. Técnicas de recolección de datos	36
3.5. Población de estudio	36
3.6. Operacionalización de las variables.....	36
3.7.1. Variable dependiente.....	36
3.7.2. Variable independiente.....	36
3.7. Procesamiento y análisis de datos	37
3.8. Etapas de desarrollo	37
3.8.1. Fase 1: Recolección de la información	37
3.8.2. Fase 2: Simulación de la cobertura móvil desde macrocelda (situación actual).....	37
3.8.3. Fase 3: Simulación de la cobertura móvil desde femtoceldas	38

3.8.4. Fase 4: Estudio de factibilidad de implementación de femtoceldas para mejorar la cobertura de telefonía móvil	38
3.8.5. Fase 5: Análisis comparativo de resultados	38
3.9. Desarrollo	38
3.9.1. Mediciones de Intensidad de señal.....	38
3.9.2. Factibilidad de implementación de femtoceldas	40
3.9.3. Simulación en Matlab.....	42
3.9.4. Análisis Estadístico	44
CAPÍTULO IV.	45
4. Resultados y discusión	45
4.1. Resultados de las simulaciones de Matlab	45
4.2. Análisis descriptivo de la variable intensidad de señal	46
4.3 Prueba de hipótesis	51
CAPÍTULO V.	53
Conclusiones	53
Recomendaciones	53
Bibliografía.....	55
ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Problemas comunes en la cobertura móvil.	23
Tabla 2. Características generales de las femtoceldas.	24
Tabla 3. Clasificación de los tipos de femtoceldas.	25
Tabla 4. Aspectos de seguridad en femtoceldas	30
Tabla 5. Funcionalidad del proyecto de investigación dado por etapas.	35
Tabla 6. Operacionalización de las variables dependientes.	36
Tabla 7. Operacionalización de las variables independientes.	36
Tabla 8. Gestión de datos y resultados del análisis estadístico	44
Tabla 9. Resumen del procesamiento de casos en el software SPSS análisis de rendimiento.	47
Tabla 10. Análisis descriptivo de la intensidad de señal registrada tanto en la macrocelda como en la femtocelda.	47
Tabla 11. Prueba de normalidad de los valores medidos.	50
Tabla 12. Contraste de hipótesis Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes.	52
Tabla 13. Mediciones de intensidad de señal obtenidas en las simulaciones de cobertura.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la telefonía móvil en términos de servicio.	19
Figura 2. Estándares que se encuentran en la generación 1G.	20
Figura 3. Estándares de la generación 2G.	20
Figura 4. Estándares y modos inmersos en la generación 3G.	21
Figura 5. Beneficios de la generación 4G LTE.	21
Figura 6. Características de la generación 5G.	22
Figura 7. Características de la generación 6G.	22
Figura 8. Femtocelda de Nokia Smart Node.	24
Figura 9. Esquema de la arquitectura de redes femtocelulares.	26
Figura 10. Arquitectura interna de una femtocelda.	26
Figura 11. Representación esquemática de una red heterogénea.	28
Figura 12. Compatibilidad de una femtocelda con componentes de la red de telefonía móvil.	29
Figura 13. Diagrama de desarrollo del procesamiento de datos.	37
Figura 14. Menú principal y configuración de la aplicación Net monitor.	38
Figura 15. Recorrido de medición con la aplicación Netmonitor.	39
Figura 16. Exportar en extensión KML para su procesamiento y tabulación.	40
Figura 17. Archivo.xlsx generado con los datos obtenidos en Netmonitor.	40
Figura 18. Plano estructural del bloque B de ingeniería. La unidad de medida es metros.	41
Figura 19. Parámetros de la macrocelda en la simulación.	42
Figura 20. Cálculo del RSS en 30 puntos del plano	43
Figura 21. Parámetros de la femtocelda en la simulación.	43
Figura 22. Medir intensidad de señal con femtoceldas en los mismos 30 puntos.	44
Figura 23. Mapa de cobertura desde la macrocelda.	45
Figura 24. Mapa de cobertura desde la femtocelda.	46
Figura 25. Comparación entre la intensidad de señal de una macrocelda y una femtocelda.	48
Figura 26. Histograma de la intensidad de señal recibida desde la macrocelda.	48
Figura 27. Histograma de la intensidad de señal recibida desde la femtocelda.	49
Figura 28. Comparación de la intensidad de señal entre la macrocelda y la femtocelda.	50

Figura 29. Parámetros de configuración de la macrocelda.	59
Figura 30. Parámetros técnicos de la femtocelda para la simulación.	60

RESUMEN

En esta investigación se diseña una solución tecnológica fundamentada en femtoceldas para optimizar la cobertura de telefonía móvil en los espacios cerrados del bloque B de la facultad de ingeniería en la Universidad Nacional de Chimborazo. La problemática que se aborda es la baja calidad de la señal que se tiene dentro del área de estudio debido a los materiales de construcción y la lejanía de las antenas principales. Para resolver esta problemática se analizó la cobertura mediante simulaciones primero obteniendo la señal móvil desde macrocelda y luego integrando femtoceldas para así poder contribuir a una conectividad más eficiente en este entorno.

El estudio se orientó de manera cuantitativa con un enfoque descriptivo y un diseño experimental. En este contexto, se llevaron a cabo múltiples mediciones de la intensidad de la señal dentro del área de análisis mediante simulaciones realizadas en Matlab. Los datos recopilados fueron analizados con herramientas como Excel y SPSS con el objetivo de comparar la cobertura actual con la cobertura estimada a través de femtoceldas.

Los resultados indicaron una mejora notable en la intensidad de la señal que pasó de un promedio de -94.35 dBm con la macrocelda a -68.26 dBm con las femtocelda. El análisis estadístico confirmó que las variaciones entre los dos escenarios son significativas, lo que sostiene que las femtoceldas ayudan a mejorar la cobertura en interiores.

Los resultados respaldan la idea de que la incorporación de femtoceldas es una solución para mejorar la cobertura móvil en espacios cerrados elevando la calidad del servicio sin grandes inversiones en infraestructura. Dicha tecnología también puede ser implementada en otros entornos educativos o institucionales que enfrenten situaciones similares.

Palabras claves: Femtoceldas, Interferencia de señal, Cobertura móvil en interiores, Redes celulares.

ABSTRACT

This research designs a technological solution based on femtocells to improve mobile phone coverage in the enclosed spaces of Block B at Faculty of Engineering at National University of Chimborazo. The problem addressed is the low signal quality within the study area due to the construction materials and the distance from the main antennas. To solve this problem, coverage was analyzed through simulations, first obtaining the mobile signal from a macrocell and then integrating femtocells to contribute to more efficient connectivity in this environment.

The study was quantitatively oriented with a descriptive approach and experimental design. In this context, multiple measurements of signal intensity were conducted within the analysis area using simulations performed in Matlab. The collected data were analyzed with tools such as Excel and SPSS to compare the current coverage with the coverage estimated using femtocells. The results showed a notable improvement in signal strength, which decreased from an average of -94.35 dBm with the macrocell to -68.26 dBm with the femtocell. Statistical analysis confirmed that the variations between the two scenarios are significant, supporting the idea that femtocells help improve indoor coverage.

The findings lend credence to the notion that femtocell integration can enhance mobile coverage in confined areas and improve service quality without requiring large infrastructure investments. This technology can also be implemented in other educational or institutional environments facing similar situations.

Keywords: Femtocells, Signal interference, Indoor mobile coverage, Cellular networks.

Reviewed by:



Mgtr. Mishell Salao Espinoza

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0650151566

CAPÍTULO I

1.1. Introducción

En la sociedad actual comunicarnos se ha vuelto una necesidad básica, es por ello por lo que constantemente se busca mejorar las telecomunicaciones. La telefonía móvil juega un papel fundamental en esta área no solo en comunicación informal, sino que también en emergencias o eventos significativos. Esta tecnología ha ido evolucionando con el pasar de los tiempos, pero así mismo han surgido limitantes o problemas principalmente relacionados con la cobertura. Por ello, se realizan constantemente investigaciones y estudios que permitan mejorar esta problemática [1].

En grandes empresas o instituciones la cobertura móvil juega un papel importante no solo para la comunicación sino también a la hora de tener que notificar algún accidente suceso o aviso importante. Ahí surge esta investigación en donde se busca mejorar la cobertura móvil en la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo mediante el uso de las femtoceldas.

La femtocelda es una estación base de dimensiones reducidas y baja potencia que generalmente se enlaza con la red del proveedor mediante una conexión de banda ancha por cable. Este tipo de dispositivo ayuda a los operadores a mejorar la cobertura en espacios interiores y al mismo tiempo, contribuye a disminuir la carga de comunicación en las estaciones bases cercanas [2]. Considerando esto, en esta investigación se realiza una propuesta para la implementación de femtoceldas en el bloque B de la facultad de ingeniería mediante simulaciones en MatLab y procesos estadísticos, con el propósito de modelar el comportamiento de la señal y analizar los beneficios que esta tecnología podría aportar en la cobertura del área de estudio.

La estructura de este estudio se organiza en varios capítulos. El Capítulo 1 presenta el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos que guían el estudio. El Capítulo 2 proporciona un marco teórico que examina los principios de la telefonía móvil, las particularidades de las femtoceldas y los aspectos normativos pertinentes. El Capítulo 3 detalla la metodología empleada, especificando el tipo de investigación, los métodos aplicados para la recolección y análisis de datos, así como las herramientas de simulación utilizadas. Finalmente, el capítulo 4 presenta los resultados y el análisis comparativo entre la cobertura de la macrocelda y la femtocelda, seguido de las conclusiones y recomendaciones que sintetizan los hallazgos más relevantes del estudio.

1.2. Planteamiento del problema

Los teléfonos móviles se han convertido en dispositivos esenciales para poder comunicarse, obtener información y realizar gestiones importantes. Sin embargo, muchas personas tienen dificultades para mantener una conexión estable dentro de los edificios, lo que afecta negativamente a su productividad [3].

Este problema se debe en gran medida a los materiales utilizados en la construcción de los edificios modernos, como el aislamiento térmico y acústico, que impiden que las señales móviles entren en espacios cerrados. Asimismo, la ubicación de las antenas de telecomunicaciones junto con el aumento en la demanda de los usuarios en ciertas áreas agrava esta problemática, resultando en una cobertura deficiente [4].

La carencia de una señal móvil suficiente en espacios cerrados puede resultar en la pérdida de llamadas, una reducción en la velocidad de datos y complicaciones para utilizar servicios personales en línea. Este problema impacta no solo en la comunicación entre individuos, sino también en la realización de tareas laborales y educativas que requieren una conexión estable [5]. Los estudiantes, profesores y administradores dependen de estos dispositivos no sólo para comunicarse sino también para acceder a plataformas educativas, gestionar tareas y mantenerse informados [6].

Ante esta problemática es necesario explorar soluciones técnicas para mejorar la cobertura móvil en interiores para garantizar una comunicación eficiente y continua a los usuarios. Una alternativa innovadora para abordar esta problemática que se ha implementado en otras partes del mundo son las femtoceldas, que ayudan a mejorar la cobertura móvil en espacios cerrados sin necesidad de instalaciones a gran escala ni altos costos. Estas soluciones han demostrado ser eficaces en edificios universitarios, hospitales y oficinas, permitiendo comunicaciones más fluidas y estables [7].

1.3. Justificación

En muchos lugares cerrados como edificios y centros educativos es común que la señal sea débil e incluso inexistente. Esto genera frustración y limita el uso de herramientas digitales especialmente cuando se necesita una conexión estable para acceder a servicios en línea [5].

Uno de los principales motivos de esta baja cobertura es que los materiales de construcción como el hormigón, el metal y los vidrios especiales los cuales bloquean la señal. Además, si muchas personas usan el servicio móvil al mismo tiempo se puede producir una saturación de la red lo que reduce aún más la calidad de la señal [4].

Debido a lo mencionado anteriormente, se vuelve necesario encontrar soluciones que permitan mejorar la conectividad dentro de los espacios cerrados. Entre las alternativas disponibles hay tecnologías que permiten ampliar la señal dentro de los edificios y

asegurar una conexión más estable para los usuarios. Esto tiene un gran valor en entornos educativos donde cada vez más actividades dependen del acceso a plataformas digitales, clases virtuales o recursos en línea [8].

El impacto social de una robusta señal en interiores es amplio, permite que estudiantes y docentes puedan trabajar sin interrupciones lo que mejora el rendimiento académico y reduce la desigualdad en el acceso a la tecnología. Además, mejora el acceso a servicios prioritarios debido a que en caso de emergencia se puede contactar con mayor facilidad a los servicios de ayuda. Finalmente, una sólida conexión móvil posibilita que los integrantes de una comunidad educativa se involucren de manera activa en la formación, la investigación y la gestión administrativa, estos aspectos son esenciales para una educación de calidad [6].

Debido a estos motivos, el objetivo de este estudio es ofrecer una solución tecnológica que optimice la señal en espacios cerrados, promoviendo el acceso a la educación digital y favoreciendo el avance social a través de una conectividad más equitativa y asequible.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

- Diseñar una solución tecnológica basada en femtoceldas para mejorar la cobertura móvil de espacios interiores en la Universidad Nacional de Chimborazo campus Edison Riera.

1.4.2. Específicos

- Realizar un estudio bibliográfico sobre el uso de femtoceldas para resolver el problema de cobertura de telefonía móvil en espacios interiores en Ecuador.
- Investigar las soluciones que las operadoras en el Ecuador brindan a los clientes individuales cuando estos tienen problemas de cobertura.
- Elaborar un estudio de factibilidad de implementación de femtoceldas para mejorar la cobertura de telefonía móvil.
- Desarrollar una propuesta para mejorar la cobertura de espacios interiores de la Universidad Nacional de Chimborazo específicamente en la facultad de ingeniería (bloque B)

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1 Telefonía móvil

La telefonía móvil es una forma de comunicación que permite realizar llamadas, enviar mensajes o conectarse a internet sin necesidad de una conexión fija. A diferencia de las líneas telefónicas convencionales estos dispositivos operan a través de una red de antenas distribuidas en diversas ubicaciones las cuales transmiten y reciben señales garantizando que las llamadas, mensajes y datos sean enviados a su destino incluso cuando la persona está en movimiento [9].

Esta forma de comunicación ha experimentado un notable desarrollo desde su creación. En sus primeras etapas se limitaba a realizar y recibir llamadas. Actualmente el teléfono móvil ha ampliado sus funciones permitiendo a los usuarios navegar por Internet, interactuar en redes sociales, realizar videollamadas e incluso gestionar otros dispositivos. Todo esto ha sido factible gracias a los avances en la tecnología de las redes de telefonía móvil que han incrementado la rapidez, estabilidad y seguridad de las conexiones [10].

2.1.1. Generaciones tecnológicas: de 1G a 6G

El desarrollo de la telefonía móvil ha pasado por diferentes etapas las cuales llamamos generaciones. Cada generación ha logrado avances importantes mejorando la calidad de las comunicaciones, la velocidad de transmisión de datos y la usabilidad de los dispositivos móviles [11]. En la Figura 1, se puede observar la evolución de la telefonía móvil destacando los avances significativos de cada generación.



Figura 1. Evolución de la telefonía móvil en términos de servicio.

- Primera Generación (1G): La primera generación de tecnología móvil conocida como 1G, apareció en la década de 1980 y se basaba en sistemas analógicos con redes de conmutación por circuitos. Su principal función era permitir llamadas de voz utilizando una técnica llamada Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA). Esta tecnología operaba en frecuencias cercanas a los 800-900 MHz con canales que ofrecían un ancho de banda de apenas 30 KHz. Entre sus principales desventajas estaban la baja capacidad de usuarios, la mala calidad de audio, el alto consumo de batería y las interferencias por ruido. Sin embargo, como se muestra en

la Figura 2, esta generación destacaba por la sencillez de su infraestructura, ya que no requería una red compleja para su funcionamiento [12].



Figura 2. Estándares que se encuentran en la generación 1G.

- Segunda Generación (2G): La tecnología 2G marcó un avance importante en las telecomunicaciones a partir de la década de 1990. En la Figura 3 se puede observar los estándares de esta tecnología que permitió la introducción de servicios de datos, aunque su uso comercial aún era limitado. También se mejoró la calidad de las llamadas reduciendo notablemente el ruido de fondo. Uno de los cambios más importantes fue la implementación de mecanismos de cifrado digital lo que incrementó la seguridad en las comunicaciones móviles [13].

Estándares de la 2G



Figura 3. Estándares de la generación 2G.

- Tercera Generación (3G): La tecnología 3G fue introducida en el año 2000 con el propósito de perfeccionar la calidad de las llamadas, hacer más eficiente la transmisión de datos, garantizar un servicio más estable y reforzar la seguridad en las comunicaciones móviles [14]. En la Figura 4 se observa los estándares y modos tecnológicos inmersos en esta generación.



Figura 4. Estándares y modos inmersos en la generación 3G.

- Cuarta Generación (4G): Aproximadamente desde el año 2010 la tecnología 4G trajo consigo una mejora considerable en la velocidad de conexión a diferencia de las demás generaciones. Esto permitió el uso eficiente de servicios como la reproducción de videos en alta definición, los videojuegos en línea y diversas aplicaciones que demandan un gran consumo de datos. En la Figura 5 se puede observar las características más destacadas de la tecnología 4G LTE que se consolidó como la más adoptada ofreciendo a los usuarios una navegación más rápida y estable [15].



Figura 5. Beneficios de la generación 4G LTE.

- Quinta Generación (5G): La tecnología 5G, que actualmente se encuentra en fase de despliegue en distintos países, ofrece velocidades de transferencia mucho mayores, tiempos de respuesta casi instantáneos y la posibilidad de conectar numerosos dispositivos al mismo tiempo. La Figura 6 ilustra las características que hacen a esta generación adecuada para aplicaciones avanzadas como el Internet de las Cosas, los autos autónomos y las infraestructuras de ciudades inteligentes [16]



Figura 6. Características de la generación 5G.

- Sexta Generación (6G): La sexta generación de tecnología de comunicación aún se encuentra en fase de desarrollo, pero se anticipa que se convertirá en un sistema capaz de integrar tanto comunicaciones como pensado dentro de una única red. Se prevé que logre velocidades cercanas a los terabits por segundo y que utilice inteligencia artificial para su autoadministración. En la Figura 7 se describe las características de esta generación que abrirá la puerta a servicios inmersivos, tales como hologramas en tiempo real y el desarrollo de ciudades plenamente inteligentes [17].



Figura 7. Características de la generación 6G.

2.1.2. Redes celulares y limitaciones en interiores

A pesar de los progresos tecnológicos, la cobertura de telefonía móvil continúa enfrentando desafíos importantes. Uno de los inconvenientes más comunes es la dificultad que tienen las señales para penetrar en espacios cerrados, esta situación es provocada por la utilización de materiales como el hormigón, el vidrio tratado y el metal que pueden obstaculizar las ondas de radio [18].

La Tabla 1 presenta un análisis más detallado de los problemas de cobertura móvil más frecuentes que pueden observarse en una red y cuáles son las posibles repercusiones que estos podían tener en los usuarios.

Problema	Descripción	Impacto en el usuario
Dificultad de penetración	Las paredes gruesas, vidrios polarizados o estructuras metálicas debilitan la señal en interiores.	Señal débil o nula en casas, oficinas y universidades.
Congestión de red	Muchas personas conectadas al mismo tiempo saturan la red sobre todo en zonas urbanas.	Llamadas fallidas, lentitud en internet, fallos en mensajería.
Cobertura rural deficiente	Las zonas alejadas suelen tener poca inversión en infraestructura móvil.	Poca o ninguna señal fuera de áreas urbanas.
Condiciones climáticas	Lluvia intensa, tormentas o niebla pueden interferir temporalmente con la señal.	Conexión inestable o intermitente durante fenómenos climáticos.
Mala planificación de red	Ubicación inadecuada de torres o falta de antenas de refuerzo.	Zonas sin cobertura incluso dentro de las ciudades.

Tabla 1. Problemas comunes en la cobertura móvil.

2.2 Femtoceldas

2.2.1. Definición y funcionamiento

Las femtoceldas son pequeños aparatos diseñados para mejorar la señal de la red móvil en interiores ya sea en oficinas, casas o entornos educativos. Su funcionamiento se basa en la creación de una conexión con el operador de telefonía móvil utilizando una conexión de internet de alta velocidad, lo que genera una señal celular exclusiva en un área determinada. Esto permite a los usuarios disfrutar de una experiencia superior tanto en llamadas como en navegación sobre todo en zonas donde la señal es deficiente [2]. En la Figura 8 se puede observar el modelo de femtocelda más reciente lanzado por la compañía Nokia, este modelo se denomina Smart Node.



Figura 8. Femtocelda de Nokia Smart Node

A continuación, en la Tabla 2 se presentan las características técnicas y operativas más relevantes de las femtoceldas, subrayando su utilización en espacios interiores, su método de conexión a la red móvil, así como las ventajas que aportan en comparación con otras soluciones de cobertura.

Característica	Descripción
Ubicación común	Interiores (hogares, oficinas, aulas)
Rango de cobertura	Entre 10 y 30 metros
Conexión a la red móvil	A través de internet residencial o corporativo
Usuarios permitidos	Limitado a números autorizados
Beneficios principales	Mejor calidad de señal, menos llamadas caídas, mayor velocidad
Desventajas	Requiere buena conexión a internet; posible interferencia

Tabla 2. Características generales de las femtoceldas.

2.2.2. Clasificación

Las femtoceldas se pueden clasificar según diversos parámetros como el tipo de acceso, la cantidad de usuarios que pueden soportar o el contexto de su instalación. Esta clasificación ayuda a comprender su adaptabilidad en diferentes situaciones abarcando desde espacios domésticos hasta escenarios corporativos [19]. La Tabla 3 presenta un resumen de los diferentes tipos de clasificaciones que existen para las femtoceldas y sus principales características.

	Tipo de Femtocelda	Características principales
Acceso	Abierto	Acceso libre a cualquier usuario del operador
	Cerrado	Acceso restringido mediante lista autorizada
	Híbrido	Acceso mixto con prioridad a usuarios registrados
Capacidad de usuarios	Residencial	4 a 8 usuarios simultáneos
	Empresarial	Hasta 32 usuarios
	Pública	Uso en espacios de gran afluencia
Entorno de instalación	Interior	Instalación en hogares u oficinas
	Exterior	Para áreas sin cobertura macro adecuada

Tabla 3. Clasificación de los tipos de femtoceldas.

2.2.3. Estandarización

La homogenización de las Femtoceldas ha sido fundamental para su incorporación eficaz a las redes de móviles actuales. Las instituciones de estandarización, como es el caso del Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP), han establecido requisitos de funcionamiento que aseguran la fiabilidad y la eficiencia de estas pequeñas bases de telefonía móvil en conjunto con infraestructura de las redes macro [20].

Por otra parte, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) también ha reconocido las femtoceldas como un medio eficaz para mejorar la cobertura y la calidad del servicio especialmente en espacios cerrados alineándolas con los objetivos de conectividad universal y eficiente en zonas urbanas y rurales [21].

2.2.4. Arquitectura de redes femtocelulares

Una red femtocelular normal se integra por diversos elementos esenciales que colaboran para ofrecer una conectividad móvil de excelente calidad. La Figura 9 ilustra la estructura de una red de femtoceldas en la que la femtocelda establece su enlace a la red del operador de telefonía móvil mediante un router doméstico y una conexión a internet. Este enlace transita a través de una puerta de enlace de seguridad que salvaguarda la comunicación y es administrado por un sistema específico para gestionar femtoceldas. Por último, el flujo de datos se canaliza hacia la red central del operador móvil facilitando así el ofrecimiento de servicios móviles con una cobertura superior en espacios cerrados [22].

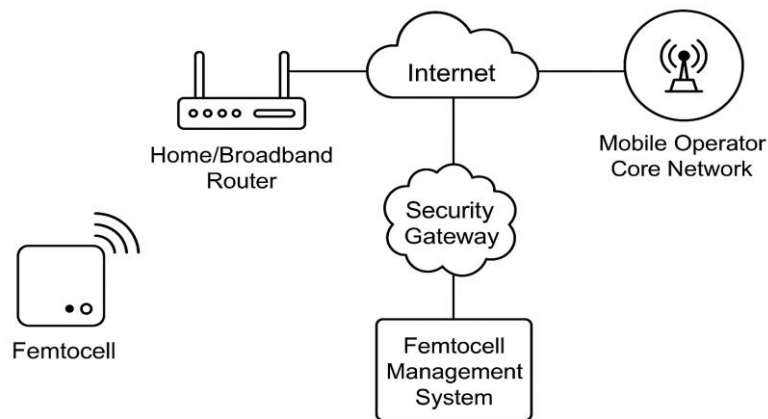


Figura 9. Esquema de la arquitectura de redes femtocelulares.

2.2.5. Arquitectura interna de una femtocelda

La estructura interna de una femtocelda está formada por diversos módulos integrados que facilitan al operador la provisión de servicios de conectividad móvil en un área específica aprovechando la red de banda ancha ya disponible [23].

En la Figura 10 se ilustra la configuración interna de una femtocelda. Se puede apreciar que este dispositivo está compuesto por elementos esenciales tales como la unidad de procesamiento, la antena destinada a la transmisión y recepción, así como los módulos que establecen la conexión con la red del operador mediante un enrutador doméstico.

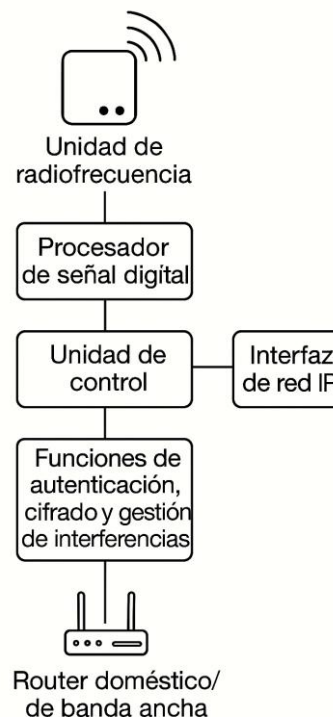


Figura 10. Arquitectura interna de una femtocelda.

2.2.6. Gestión de interferencias de radio

Uno de los desafíos más importantes en el despliegue de femtoceldas es la gestión de las interferencias de radio especialmente al instalarlas muy cerca unas de otras o dentro del área de cobertura de una macrocelda [24].

Para solucionar este tipo de inconvenientes se implementan diversas técnicas una de las más comunes es el control de potencia la cual regula automáticamente la intensidad de la señal emitida por las femtoceldas en función de su entorno. Otra táctica empleada es utilizar diferentes frecuencias entre las femtoceldas y la red central lo que minimiza el riesgo de interferencia directa [25].

Además, la mayoría de las redes modernas incorporan sistemas de autogestión que permiten a las femtoceldas ajustar inteligentemente sus parámetros para adaptarse al entorno y resolver conflictos con otras celdas [26].

2.2.7. Implicaciones de despliegue

La implementación de redes femtocelulares conlleva una variedad de aspectos técnicos, operativos y regulatorios que requieren una atención cuidadosa para asegurar su eficacia y viabilidad en el entorno de las redes móviles modernas [27].

Uno de los aspectos más relevantes es la estrategia para situar las femtoceldas, la instalación debe tener en cuenta barreras físicas como muros, interferencias electromagnéticas y la proximidad a otras celdas. Una colocación inadecuada puede resultar en áreas con mala señal o interferencias con la red macro y entre femtoceldas cercanas [28].

Desde el aspecto técnico uno de los desafíos clave es garantizar la adecuada integración de las femtoceldas con la red del proveedor de servicios. Esto implica realizar una correcta configuración del acceso que utilice conexiones a internet de alta velocidad y un sistema de autenticación eficaz [29].

En el ámbito económico las femtoceldas constituyen una opción económica tanto para los proveedores como para los usuarios. Para los operadores su uso reduce costos de infraestructura ya que no requieren torres o estaciones base grandes en espacios interiores. Para los usuarios especialmente en zonas con deficiente cobertura representan una mejora significativa en la calidad del servicio con una inversión mínima [30].

2.2.8. Redes heterogéneas

Las redes heterogéneas también conocidas como HetNets (por sus siglas en inglés) representan una solución innovadora utilizada por los operadores de telefonía móvil para optimizar la calidad de la señal especialmente en zonas donde la cobertura es a menudo inadecuada [31].

Este tipo de infraestructura de red integra una variedad de antenas y estaciones base. Por ejemplo, se combinan las tradicionales torres grandes llamadas macroceldas con estaciones más pequeñas como femtoceldas, picoceldas y microceldas [32].

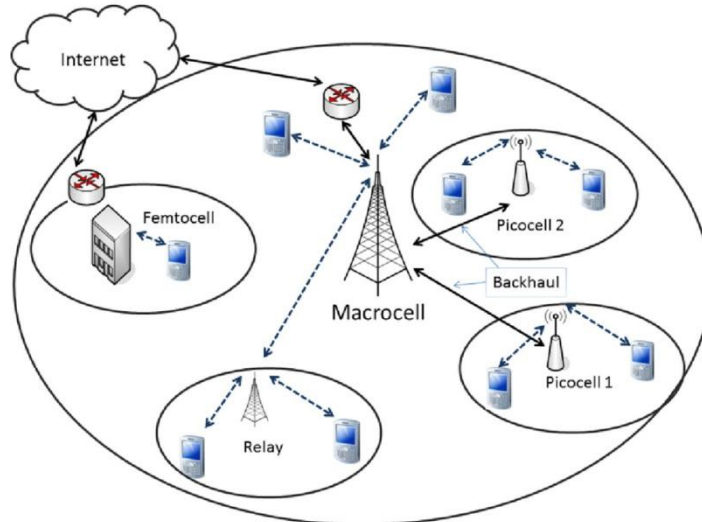


Figura 11. Representación esquemática de una red heterogénea.

La Figura 11 muestra un caso común de una red heterogénea en la cual las macroceldas proporcionan una cobertura extensa. Por otro lado, las pequeñas celdas como las femtoceldas se colocan en lugares cerrados. Esto contribuye a mejorar el rendimiento del sistema, disminuir la congestión y maximizar el aprovechamiento del espectro.

Una de las ventajas más destacadas de las redes heterogéneas es su capacidad para mejorar la distribución de los recursos lo que permite que un mayor número de usuarios estén conectados sin comprometer la velocidad o la calidad del servicio. Adicionalmente, son más eficientes en términos de energía y optimizan el uso del espectro de frecuencias disponible [32].

2.2.9. Interoperabilidad con otros elementos de la red

La interoperabilidad se refiere a la habilidad de una femtocelda para colaborar de manera eficiente con otros componentes de la red móvil que incluye estaciones base tradicionales, así como administradores de redes y servidores encargados del procesamiento de llamadas y datos [33]. En la Figura 12 se muestra el funcionamiento de una femtocelda ubicada en un espacio cerrado la cual se conecta con teléfonos móviles cercanos y con otros componentes clave de la red.

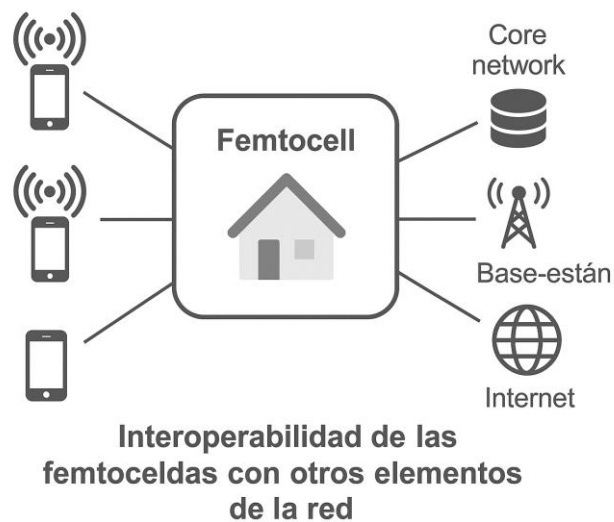


Figura 12. Compatibilidad de una femtocelda con componentes de la red de telefonía móvil.

La transferencia de señal es un aspecto clave de la interoperabilidad ya que permite una transición sin problemas entre femtoceldas y macroceldas. Esta función es especialmente crítica cuando los usuarios entran o salen de edificios. Una falta de coordinación adecuada entre los diversos elementos puede resultar en problemas como interrupciones en el servicio, baja calidad en las llamadas o pérdida de datos [34].

2.2.10. Aspectos de seguridad

La protección en las redes femtocelulares es crucial ya que estos dispositivos pueden ser susceptibles a amenazas al conectarse a internet si no cuentan con las medidas de seguridad adecuadas. Es importante proteger tanto las conexiones de los usuarios como la red del operador para evitar el acceso no autorizado y garantizar la confidencialidad de los datos [35].

A continuación, la Tabla 5 resume estos mecanismos de seguridad con su respectiva descripción para la implementación segura de estas tecnologías.

Aspecto de seguridad	Descripción
Control de acceso (ACL)	Solo los dispositivos autorizados pueden conectarse a la femtocelda mediante listas blancas o negras.
Cifrado de datos	Uso de técnicas de cifrado de datos para proteger la comunicación entre la femtocelda y la red del operador.
Autenticación de usuario	Verificación de identidad de cada usuario antes de permitir el acceso a la red.
Actualización de	Instalación automática de parches de seguridad y mejoras de

firmware	software por parte del proveedor para prevenir vulnerabilidades.
Protección frente a ataques externos	Implementación de firewalls, túneles seguros y monitoreo de tráfico para evitar ataques como denegación de servicio (DoS).
Aislamiento de tráfico	Separación del tráfico de red del usuario respecto al de la femtocelda para prevenir filtraciones de datos.

Tabla 4. Aspectos de seguridad en femtoceldas

2.2.11. Perspectiva del proveedor de servicio

Desde la perspectiva de los operadores móviles, las femtoceldas representan una alternativa eficaz para ampliar la cobertura y mejorar la calidad del servicio en edificios evitando la necesidad de inversiones significativas en infraestructura de red macrocelular. Estas estaciones base compactas permiten una distribución más eficiente del tráfico de datos móviles mejorando la utilización del espectro y reduciendo la saturación de la red central [36].

Una de las ventajas más significativas para los proveedores es la posibilidad de instalar femtoceldas en zonas con alta concentración de usuarios como oficinas, universidades o residencias lo que mejora significativamente la experiencia del usuario final. Además, este enfoque específico permite una gestión más eficiente de los recursos de la red lo que se traduce en menos interferencias, mayores velocidades de conexión y un uso óptimo del espectro disponible [37].

Sumado a esto, las femtoceldas pueden permitir a los proveedores desarrollar nuevos modelos de negocio como servicios personalizados de conectividad en interiores, redes privadas para empresas o planes diferenciados según los perfiles de usuario [37].

Además, según los informes del Small Cell Forum, los operadores han comenzado a preferir estas soluciones no únicamente por motivos técnicos sino también porque les permiten adaptarse de manera más eficiente a las demandas de los usuarios modernos [11].

2.2.12. Perspectiva del usuario final

Desde la perspectiva del usuario, las femtoceldas son principalmente buscadas por su capacidad para proporcionar una mejor cobertura y señales de mayor calidad en espacios interiores donde las antenas convencionales suelen ser menos efectivas. Su instalación sencillísima las hace atractivas, se conectan al router doméstico y de forma automática se integran a los dispositivos personales sin requerir instalación técnica especializada [38].

Una encuesta realizada por Parks Associates y el Femto Forum en Estados Unidos reveló que tras una presentación sobre femtoceldas el 56 % de los encuestados mostró mayor

interés en comprarlas destacando beneficios como una mejor señal en interiores mayor duración de la batería y mayor velocidad de internet [39].

De acuerdo con un estudio realizado por Global Growth Insights en enero de 2024 el 57 % de los participantes en la encuesta reportó haber experimentado interrupciones en las llamadas o una lentitud en la conexión de datos en sus hogares [40].

Sin embargo, algunos usuarios mencionan que el rendimiento de las femtoceldas puede verse afectado por la calidad de su conexión a internet doméstica. Una conexión inestable podría limitar las capacidades de las femtoceldas. Por lo tanto, la satisfacción general está relacionada tanto con la femtocelda en sí como con la infraestructura que la respalda [41].

2.3 Marco legal

Las leyes actuales en Ecuador dictan las directrices para la implementación de femtoceldas, garantizando que su evolución esté en concordancia con la gestión del espectro, los derechos de comunicación de la población y los principios establecidos en nuestra Constitución y normativas nacionales.

2.3.1. Aspectos reglamentarios

Una de las regulaciones más importantes es la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT) que se encuentra en vigor desde 2015. Esta legislación establece que todos los servicios que utilizan el espectro radioeléctrico necesitan una autorización o título habilitante que debe ser proporcionado por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). Dado que las femtoceldas funcionan en frecuencias que pertenecen al espectro es necesario que sean homologadas y en ciertas situaciones también reciban la autorización de esta agencia [42].

Asimismo, ARCOTEL tiene el deber de elaborar resoluciones técnicas que garanticen que dispositivos como las femtoceldas no provoquen interferencias nocivas y se ajusten a los estándares requeridos. En el año 2025 ARCOTEL dio a conocer nuevas resoluciones que actualizan los criterios para la homologación de equipos de telecomunicaciones abarcando aquellos utilizados en redes privadas tales como las femtoceldas [43].

2.3.2. Constitución de la República del Ecuador

En el Artículo 16 de la Constitución de la República del Ecuador se establece que “todas las personas ya sea de manera individual o colectiva tienen derecho acceder en igualdad de circunstancias al uso de las frecuencias del espectro radioeléctrico para la operación de estaciones de radio y televisión, ya sean públicas, privadas o comunitarias, así como a bandas libres para la explotación de redes inalámbricas” [44].

2.4 Estado del arte

2.4.1. Uso de femtoceldas para resolver el problema de cobertura de telefonía móvil en espacios interiores a nivel mundial.

A nivel global el uso de femtoceldas ha aumentado ya que estos dispositivos han sido investigados e implementados como una solución efectiva para abordar los problemas relacionados con la cobertura móvil.

En 2020 se llevó a cabo una investigación titulada "Acerca de los retos y la evaluación del rendimiento de las femtoceldas en redes ultradensas" que examinó el funcionamiento de las femtoceldas en un entorno de comunicación simulado. Los hallazgos mostraron que si se instalan adecuadamente estas pequeñas estaciones son efectivas para incrementar la cobertura y facilitar el acceso de los usuarios en interiores. Además, el estudio destacó que podrían presentarse inconvenientes como interferencias o sobrecarga si se agrupan demasiadas unidades, aunque estas complicaciones pueden evitarse mediante una planificación adecuada del despliegue [45].

Por otra parte, en una investigación realizada en 2024 titulada "Cobertura interior mejorada con femtoceldas en redes 5G a una frecuencia de 3500 MHz mediante software de propagación de ondas de radio" se empleó un software de simulación para analizar diversas configuraciones de instalación de femtoceldas en un edificio grande. Los resultados mostraron que la instalación de únicamente dos femtoceldas en ubicaciones estratégicas era suficiente para proporcionar una señal excelente en el interior del edificio. La potencia obtenida fue de -25.60 dBm y la calidad de la señal evaluada en función de su relación con la interferencia resultó ser muy positiva. Este experimento evidenció que no es necesario llenar un espacio con dispositivos, sino que es fundamental posicionarlos correctamente [46].

2.4.2. Uso de femtoceldas para resolver el problema de cobertura de telefonía móvil en espacios interiores en Ecuador.

En Ecuador el uso de femtoceldas para optimizar la señal de telefonía móvil en espacios cerrados ha sido poco investigado. Sin embargo, estudios recientes han evidenciado su efectividad. Un ejemplo de esto es un estudio realizado en el año 2023 titulado "Medición y simulación de conmutación de la red 4G LTE a 5G mediante una femtocelda en la zona centro de Riobamba". Esta investigación mostró que al instalar una femtocelda en un lugar estratégico dentro de un edificio de Riobamba se logra una notable mejora en la señal móvil facilitando la transición de 4G a 5G lo que resulta en una conexión más estable y libre de interrupciones. Este análisis respalda la idea de que las femtoceldas pueden ofrecer una solución eficaz y accesible para aumentar la cobertura en interiores particularmente en áreas urbanas donde las estructuras edilicias afectan la señal exterior [47].

2.4.3. Soluciones que las operadoras en el Ecuador brindan a los clientes individuales cuando estos tienen problemas de cobertura.

A nivel nacional las compañías de telefonía móvil como Claro, Movistar y CNT han desarrollado diversas opciones para asistir a aquellos clientes que enfrentan dificultades con la señal en interiores. Una de las soluciones más frecuentes es la posibilidad de realizar llamadas por medio de Wi-Fi lo que permite a los usuarios hacer y recibir llamadas utilizando su conexión a internet en lugar de depender únicamente de la cobertura de la red móvil. Asimismo, Claro pone a disposición de sus usuarios dispositivos como módems portátiles que facilitan una mejor conexión en residencias y pequeños negocios. Las operadoras también brindan asesoramiento sobre la ubicación óptima de los aparatos dentro del hogar para optimizar la recepción [48] [49].

Por otra parte, en áreas rurales CNT ha establecido convenios para compartir su infraestructura con otras empresas lo que ha resultado en una expansión de la cobertura en lugares donde anteriormente era limitada. Estas iniciativas están diseñadas para ajustarse a las necesidades reales de los usuarios y optimizar su experiencia de conectividad evitando recurrir a opciones costosas o complicadas [50].

CAPÍTULO III

3. Metodología

3.1. Tipo y diseño de investigación

Este proyecto se caracteriza por ser una investigación de tipo descriptiva ya que busca detallar cómo se presenta el problema de cobertura de señal móvil en interiores y analizar cómo una solución basada en femtoceldas puede ayudar a mejorarlo. El diseño del estudio es experimental pues no se manipulan variables ni se implementan cambios reales, sino que se analizan situaciones existentes. Para esto se hará una revisión de información técnica sobre las femtoceldas, se identificarán espacios con problemas de cobertura en el primer piso del bloque B en la facultad de ingeniería y se propondrá una solución mediante simulación para modelar cómo se comporta la señal antes y después de la instalación de femtoceldas. De esta manera, se podrá estudiar el posible impacto de la solución sin necesidad de aplicarla físicamente.

3.2. Método de investigación

La investigación actual se sitúa dentro del paradigma cuantitativo pues se fundamenta en la recopilación y el análisis de datos numéricos que están relacionados con la intensidad de la señal en diversas ubicaciones del primer piso del bloque B. También se clasifica como un estudio aplicado ya que su objetivo principal es ofrecer una solución técnica a un problema concreto que es la insuficiencia de cobertura de señal móvil en espacios cerrados. Esta metodología permite evaluar la eficacia de la solución propuesta tecnológicamente sin alterar directamente el entorno real.

3.3. Diseño del proceso de investigación

Para explicar el proceso de investigación se enfatizan tres procesos clave, tal como se muestra en la Tabla 5. Inicialmente se llevan a cabo las mediciones necesarias para evaluar la deficiencia y la cobertura actual. Luego se avanza a la fase de recolección de los parámetros de la macrocelda y femtocelda. Finalmente, en la tercera fase se genera el diseño de una solución tecnológica basada en femtoceldas con el objetivo de optimizar la cobertura móvil.








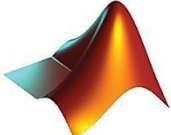


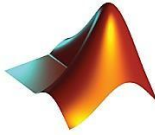



Diseño del proceso de investigación		
<p>Toma de medidas de cobertura móvil</p>  <p>Software de simulación</p>   <p>Toma de medidas</p>   <p>Desarrollo</p>	<p>Simulación de cobertura sin femtoceldas</p>  <p>Modelo de simulación y especificaciones técnicas</p>   <p>Software de simulación</p>   <p>Diseño y desarrollo.</p>	<p>Simulación de cobertura y diseño de red con femtoceldas</p>  <p>Software de simulación</p>   <p>Diseño de la solución tecnológica con femtoceldas</p> 
<p>Se realizará la medición de la intensidad de señal en diferentes puntos del bloque B de ingeniería, los datos serán exportados a EXCEL.</p>	<p>La simulación de la femtocelda se desarrollará en función a las especificaciones técnicas del Indoor NR Remote Radio Unit (RRU) Model: 52434. Al momento del desarrollo de este trabajo de investigación las femtoceldas se encuentran descontinuas.</p>	<p>La simulación de la cobertura móvil desde femtoceldas mediante el software Matlab nos permitirá conocer el comportamiento y las mejoras que se obtienen.</p>

Tabla 5. Funcionalidad del proyecto de investigación dado por etapas.

3.4. Técnicas de recolección de datos

Se utilizarán diversas técnicas que permitan conocer tanto el estado actual de la cobertura móvil en el interior del bloque B de ingeniería como la experiencia de los usuarios. Una de las principales herramientas será la observación directa, mediante la cual se identificarán los puntos del edificio donde la señal presenta deficiencias. Adicionalmente se emplearán aplicaciones móviles que permiten medir la intensidad de la señal con el fin de registrar datos objetivos sobre la cobertura en distintas zonas del bloque B de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

3.5. Población de estudio

La población de estudio de esta investigación está constituida por las 30 mediciones de intensidad de señal realizadas en distintos puntos del primer piso del bloque B de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo. Estas mediciones recogen la información necesaria para evaluar el nivel de cobertura en el área de análisis. Dado que se trabajó con la totalidad de los datos disponibles no fue necesario seleccionar un tamaño de muestra pues se consideró a la población completa como objeto de estudio.

3.6. Operacionalización de las variables

3.7.1. Variable dependiente

Variables	Concepto	Indicadores
Intensidad de Señal	Es la mayor intensidad de señal alcanzada por el terminal móvil en un área específica.	<ul style="list-style-type: none">• Excelente• Normal• Baja• Sin señal

Tabla 6. Operacionalización de las variables dependientes.

3.7.2. Variable independiente

Variables	Concepto	Indicadores
Ubicación	Ubicación se refiere al lugar o posición geográfica donde se encuentra un dispositivo móvil en un momento dado	<ul style="list-style-type: none">• Espacios abiertos• Espacios cerrados

Tabla 7. Operacionalización de las variables independientes

3.7. Procesamiento y análisis de datos

En la Figura 13 se muestra el proceso de desarrollo de la investigación, abarcando desde la recopilación de datos y la evaluación en el bloque B, hasta la realización de las simulaciones desde la macrocelda y las femtoceldas además de la evaluación final de los resultados.

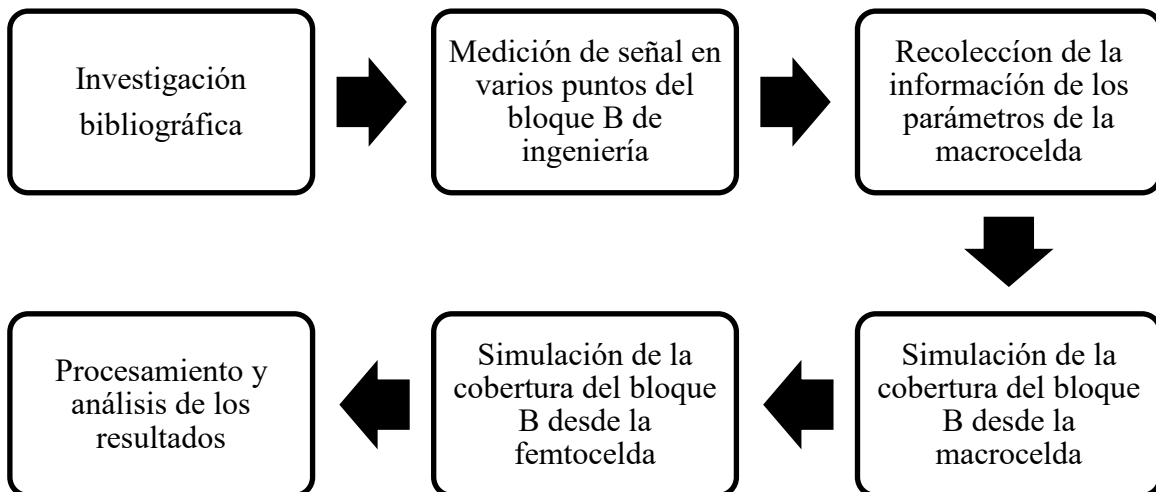


Figura 13. Diagrama de desarrollo del procesamiento de datos.

3.8. Etapas de desarrollo

3.8.1. Fase 1: Recolección de la información

En esta fase se realizó una revisión técnica sobre tecnologías de acceso móvil, limitaciones de cobertura en interiores y la utilización de femtoceldas como alternativa de mejora. La recopilación de la información se enfocó en documentos científicos, normas del 3GPP, recomendaciones de la UIT y publicaciones académicas. Además, se identificó el área de estudio realizando un levantamiento básico de la estructura física del espacio a través de un plano estructural en AutoCAD.

3.8.2. Fase 2: Simulación de la cobertura móvil desde macrocelda (situación actual)

Con el fin de representar la condición actual de cobertura móvil en el edificio se desarrolló una simulación en MATLAB considerando una macrocelda exterior como única fuente de señal. Se utilizó un modelo de propagación logarítmico para calcular la intensidad de señal recibida en cada punto del plano considerando factores como la atenuación por distancia y penetración en muros. Se seleccionaron 30 puntos manualmente dentro del plano arquitectónico en los cuales se registraron los niveles de señal.

3.8.3. Fase 3: Simulación de la cobertura móvil desde femtoceldas

En esta etapa se propuso una solución tecnológica basada en femtoceldas. Se ubicaron virtualmente las femtoceldas en posiciones estratégicas dentro del edificio considerando zonas previamente detectadas con mala cobertura. Se utilizó el mismo modelo de propagación para simular la cobertura generada por las femtoceldas en los mismos 30 puntos definidos en la fase anterior.

3.8.4. Fase 4: Estudio de factibilidad de implementación de femtoceldas para mejorar la cobertura de telefonía móvil

En esta fase se evaluó la factibilidad técnica de implementar femtoceldas como solución en espacios interiores se consideraron factores como el tipo de edificación, las distancias entre dispositivos, el acceso a conexión de red para las femtoceldas.

3.8.5. Fase 5: Análisis comparativo de resultados

Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre las dos simulaciones. Se evaluaron los niveles de señal recibida en los mismos 30 puntos del plano antes y después de implementar la solución con femtoceldas.

3.9.Desarrollo

3.9.1. Mediciones de Intensidad de señal

Para realizar las mediciones de intensidad de señal y comprobar la cobertura es necesario primero configurar la aplicación Netmonitor tal como se aprecia en la Figura 14. Dentro del menú principal se deben habilitar las opciones “Mostrar diagrama de señal”, “Mostrar celdas vecinas” y “Mostrar información de ubicación GPS” ya que esto permitirá visualizar en pantalla todos los parámetros correspondientes a la red que se está evaluando.

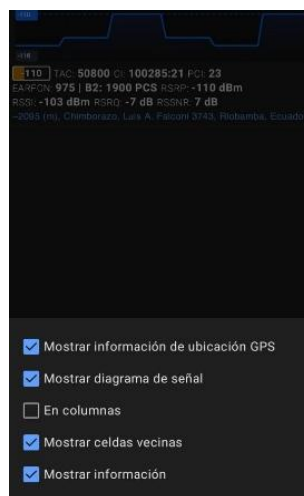


Figura 14. Menú principal y configuración de la aplicación Net monitor.

Para efectuar las mediciones es necesario seguir ciertas recomendaciones:

- Encender el GPS para garantizar un funcionamiento correcto y registrar el trayecto recorrido.
- Posteriormente, abrir la aplicación Net Monitor, en la Figura 15 se observa la ubicación de las macroceldas más cercanas.
- Realizar el desplazamiento por el área donde se quiere analizar la calidad de la señal del operador móvil, observando tanto la ubicación como la conexión con las estaciones base en cada instante.
- Es importante considerar que las conexiones con las estaciones base pueden variar aun repitiendo el mismo recorrido en diferentes momentos o días. Esto ocurre porque las estaciones base administran las conexiones según el tráfico que manejan, la congestión en la red y otros factores, pudiendo redirigir la conexión hacia otra estación que presente menor carga.

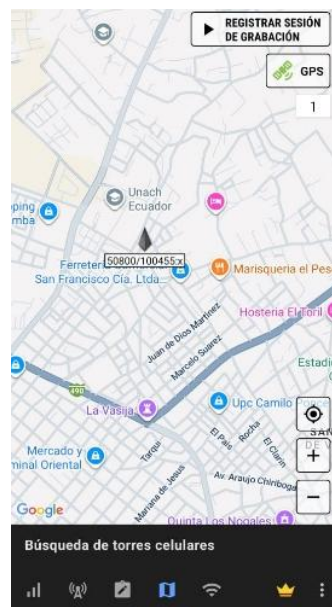


Figura 15. Recorrido de medición con la aplicación Netmonitor

Al finalizar el recorrido, se ingresa al menú para crear un archivo con extensión KML tal como se muestra en la Figura 16. Es importante recordar que para poder exportar este archivo la sesión del recorrido debe haber sido registrada previamente por la propia aplicación.

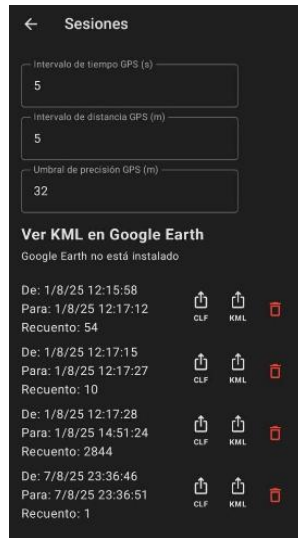


Figura 16. Exportar en extensión KML para su procesamiento y tabulación.

El archivo KML creado con NetMonitor puede abrirse en Excel en formato de tabla. Se puede observar los datos del archivo KML en la Figura 17. Además, es posible consultar datos como el identificador del controlador de red de radio, el instante exacto en que se efectuaron las mediciones, así como la fecha y hora correspondientes a cada registro.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	latitude	longitude	color	opacity	width	scale	sym	name	desc	kml_folder			
2	0.6	http://www.g	-106 LAC: 50800 CID: 100212:11 RNC: 0 PSC: 54 ACCURACY: 1 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:56:04										
3	0.6	http://www.g	-107 LAC: 50800 CID: 100212:11 RNC: 0 PSC: 54 ACCURACY: 2 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 13:01:01										
4	0.6	http://www.g	-106 LAC: 50800 CID: 100212:11 RNC: 0 PSC: 54 ACCURACY: 1 CHANGE_TYPE: DBM TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:56:04										
5	0.6	http://www.g	-107 LAC: 50800 CID: 100212:11 RNC: 0 PSC: 54 ACCURACY: 2 CHANGE_TYPE: DBM TIMESTAMP: 1 ago 2025 13:01:01										
6	0.6	http://www.g	-107 LAC: 50800 CID: 100212:11 RNC: 0 PSC: 54 ACCURACY: 2 CHANGE_TYPE: DBM TIMESTAMP: 1 ago 2025 13:01:02										
7	0.6	http://www.g	-106 LAC: 50800 CID: 100212:11 RNC: 0 PSC: 54 ACCURACY: 1 CHANGE_TYPE: GPS TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:56:05										
8	0.6	http://www.g	-103 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 20 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:26:57										
9	0.6	http://www.g	-103 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 32 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:50:23										
10	0.6	http://www.g	-106 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 2 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:51:30										
11	0.6	http://www.g	-112 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 2 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:53:48										
12	0.6	http://www.g	-102 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 1 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:54:47										
13	0.6	http://www.g	-106 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 1 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:55:08										
14	0.6	http://www.g	-104 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 1 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:56:06										
15	0.6	http://www.g	-92 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 1 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:57:19										
16	0.6	http://www.g	-81 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 1 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 12:58:16										
17	0.6	http://www.g	-88 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 1 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 13:00:22										
18	0.6	http://www.g	-110 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 2 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 13:01:03										
19	0.6	http://www.g	-104 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 29 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 13:16:40										
20	0.6	http://www.g	-109 LAC: 50800 CID: 100212:13 RNC: 0 PSC: 56 ACCURACY: 27 CHANGE_TYPE: CELL TIMESTAMP: 1 ago 2025 13:16:42										

Figura 17. Archivo.xlsx generado con los datos obtenidos en Netmonitor.

3.9.2. Factibilidad de implementación de femtoceldas

La evaluación de la factibilidad para instalar femtoceldas en la planta baja del bloque B de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo se realizó considerando distintos aspectos prácticos. En primer lugar, se tomó en cuenta la facilidad para ubicar los dispositivos dentro del edificio, la disponibilidad de una conexión a internet estable que garantice su funcionamiento. Posteriormente, para estimar la cantidad de femtoceldas necesarias se analizó el tamaño del área a cubrir en relación con el alcance que puede ofrecer cada dispositivo en un entorno cerrado. Con este propósito se elaboró el plano del bloque B con sus dimensiones reales lo que permitió identificar de manera

precisa la superficie en la que se busca mejorar la cobertura de señal tal como se muestra en la Figura 18.

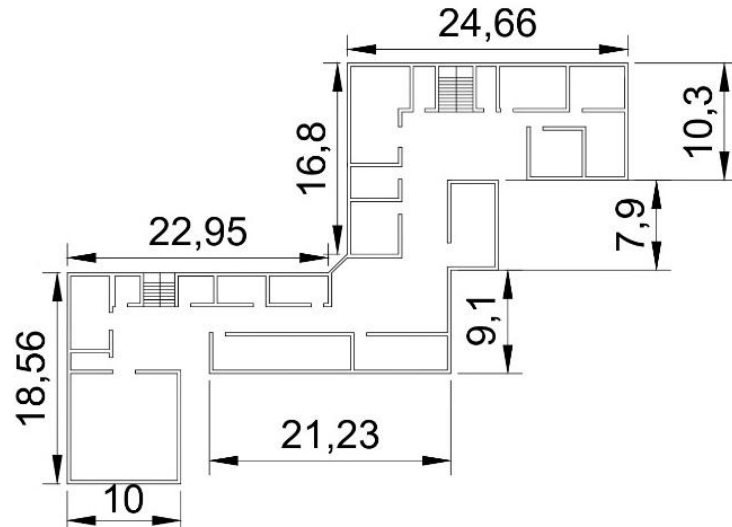


Figura 18. Plano estructural del bloque B de ingeniería. La unidad de medida es metros.

A partir del plano del bloque B y sus dimensiones se calculó un área total de aproximadamente 1120 m². De acuerdo con el informe “Soluciones inalámbricas de alta capacidad para interiores: picoceldas o femtoceldas” en el cual se menciona que una femtocelda en ambientes interiores presenta un alcance efectivo de entre 10 y 15 metros se estima que el área equivalente aproximada es de 350 a 400 m² según la disposición de aulas y pasillos [51].

De acuerdo con lo mencionado, se procedió a calcular el número de femtoceldas requerida para mejorar la cobertura de señal. El área total que se necesita cubrir es ~1120 m² y la cobertura efectiva de una femtocelda que es de 380 m².

$$N_{fem} \approx \frac{Area_{Total}}{Cobertura_{Efectiva}} \approx \frac{1120 \text{ m}^2}{380 \text{ m}^2} \approx 2,95$$

Ecuación 1

Se obtuvo que el número mínimo requerido para cubrir de manera adecuada toda el área del bloque B es de tres femtoceldas. La ubicación de cada una se definió estratégicamente, de modo que se reduzcan al máximo las zonas con baja intensidad de señal y se optimice el rendimiento de los equipos, asegurando así una cobertura uniforme en la planta baja.

3.9.3. Simulación en Matlab

Para analizar la cobertura de señal móvil en el primer piso del bloque B de la facultad de ingeniería se llevaron a cabo simulaciones mediante el software Matlab. Estas simulaciones permitieron observar el comportamiento de la señal en diferentes condiciones comparando la situación actual sin femtoceldas con una propuesta de mejora utilizando estas unidades dentro del edificio. Para observar las especificaciones técnicas de la macrocelda cercana al área de estudio la cual se utilizó para definir los parámetros de la macrocelda en la simulación ver Anexo 1.

```
% Parámetros por banda (valores realistas para Claro EC)
switch BANDA
    case "B28" % 700 MHz: mejor penetración indoor
        f_MHz = 700; % frecuencia
        potencia_macro = 40; % dBm (≈ 20 W por sector)
        ganancia_macro = 15; % dBi (antena 65° típica)
        n_macro = 3.4; % exponente camino urbano macro
        atenuacion_penetracion = 20; % dB (indoor 1er piso)
    case "B2" % 1900 MHz: capacidad
        f_MHz = 1900;
        potencia_macro = 40; % dBm
        ganancia_macro = 16; % dBi (antena similar, algo mayor a 1900)
        n_macro = 3.4; % mayor pérdida en 1900 MHz
        atenuacion_penetracion = 20; % dB
    otherwise
        error('BANDA no válida. Usa "B28" o "B2".');
end
```

Figura 19. Parámetros de la macrocelda en la simulación.

La Figura 19 presenta un bloque de código donde se establecen los parámetros de simulación de la macrocelda para dos frecuencias móviles empleadas en el Ecuador por el operador Claro. En la primera parte se configuran los valores de la banda 700 MHz, destacada por su capacidad de penetrar en interiores, mientras que en la segunda se definen los de la banda 1900 MHz, que ofrece mayor capacidad de tráfico, aunque sufre más pérdidas en espacios cerrados. Entre los parámetros definidos se incluyen la potencia de transmisión, la ganancia de la antena, el exponente de propagación y la atenuación al atravesar paredes y muros. Este esquema de programación permite que el sistema seleccione de manera automática los valores correspondientes según la banda escogida, lo que posibilita representar con mayor realismo las condiciones de cobertura dentro del bloque B de la facultad de ingeniería.

```

% ----- Selección de puntos -----
fprintf('Haz clic en %d puntos del plano (macroceldas)\n', N_PUNTOS);
[x_clicks, y_clicks] = ginput(N_PUNTOS);
x_clicks = round(x_clicks);
y_clicks = round(y_clicks);

% Medir RSS en los puntos
rss_macro = zeros(N_PUNTOS,1);
for i = 1:N_PUNTOS
    rss_macro(i) = RSS_macro(y_clicks(i), x_clicks(i));
    plot(x_clicks(i), y_clicks(i), 'bx', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth',1.5);
    text(x_clicks(i)+10, y_clicks(i), sprintf('P%d',i), 'Color', 'blue', 'FontSize', 9);
end

% ----- Guardar puntos para otra simulación -----
save('puntos_seleccionados.mat', 'x_clicks', 'y_clicks');

```

Figura 20. Cálculo del RSS en 30 puntos del plano

En la Figura 20 se muestra en el código del primer escenario en el cual se modeló la cobertura móvil partiendo de una fuente externa de señal, similar a una antena macrocelular ubicada fuera del edificio. La señal fue proyectada sobre el plano del primer piso del bloque B de ingeniería donde se seleccionaron treinta puntos distribuidos a lo largo del plano y se registró la intensidad de señal en decibelios. Estos datos fueron exportados a una hoja de cálculo para facilitar su análisis.

```

% ----- Parámetros de femtoceldas -----
% Coordenadas [x,y] en el plano (ajusta según ubicación en aulas)
femtoceldas = [
    500, 820;    % Femto 1
    1060, 450;   % Femto 2
    900, 750     % Femto 3
];

% Potencia de transmisión y antena
potencia_tx = 20;    % dBm (≈100 mW)
ganancia = 2;        % dBi (antena omnidireccional integrada)

% Propagación
f_MHz = 3500;        % frecuencia 3.5 GHz (NR n78)
PL0 = 32.44 + 20*log10(f_MHz) - 60; % FSPL @ 1 m (≈41 dB en 3.5 GHz)
n = 2.2;              % exponente indoor (bueno); prueba 2.5 para peor escenario

```

Figura 21. Parámetros de la femtocelda en la simulación.

La Figura 21 ilustra la parte del código donde se establecen las ubicaciones y características de las femtoceldas en el plano del Bloque B. En esta parte se definen tres femtoceldas en posiciones estratégicas para cubrir un área determinada y en conjunto puedan abarcar la mayor parte del área del plano, además se definen los valores de potencia y ganancia de la antena. También se incorpora la frecuencia de operación en 3.5 GHz y un modelo de propagación adaptado a interiores lo que permite representar de manera realista el comportamiento de la señal dentro del edificio. Para observar las especificaciones técnicas del dispositivo que se utilizó para definir los parámetros de la femtocelda en la simulación ver Anexo 2.

```

% ----- Cargar puntos guardados -----
load('puntos_seleccionados.mat'); % x_clicks, y_clicks

% ----- Medir RSS en los mismos puntos -----
rss_femto = zeros(length(x_clicks),1);
for i = 1:length(x_clicks)
    rss_femto(i) = RSS_total(y_clicks(i), x_clicks(i));
    plot(x_clicks(i), y_clicks(i), 'bx', 'MarkerSize', 8);
    text(x_clicks(i)+10, y_clicks(i), ['P' num2str(i)], 'Color', 'blue');
end

% ----- Crear y exportar tabla -----
T_femto = table((1:length(x_clicks)), x_clicks, y_clicks, rss_femto, ...
    'VariableNames', {'Punto','X','Y','RSS_femtocelda_dBm'});
writetable(T_femto, 'RSS_Femtoceldas.xlsx');
disp('Archivo RSS_Femtoceldas.xlsx exportado.');
```

Figura 22. Medir intensidad de señal con femtoceldas en los mismos 30 puntos.

En el código de la Figura 22 se muestra que al igual que en la primera simulación se tomaron mediciones en los mismos treinta puntos para comparar los valores obtenidos antes y después de colocar las femtoceldas. Los resultados de la intensidad de señal fueron exportados a una hoja de cálculo diferente para realizar un análisis comparativo.

3.9.4. Análisis Estadístico

El programa SPSS constituye una herramienta ampliamente utilizada en el ámbito de la investigación y el análisis de datos. Su diseño permite que los usuarios realicen estudios estadísticos de distinta complejidad de manera accesible y organizada facilitando la obtención de resultados que apoyan la interpretación y la toma de decisiones dentro de un proceso investigativo. Se puede observar un resumen de los datos organizados en el SPSS previamente de ser analizados en la Tabla 8, todas las mediciones de intensidad de señal calculadas en las simulaciones se presentan en el Anexo 3.

Intensidad de señal	Tipo Antena
-97,2766	Macrocelda
-96,9003	Macrocelda
-95,582	Macrocelda
-95,8601	Macrocelda
-71,0431	Femtocelda
-65,1229	Femtocelda
-65,9293	Femtocelda
-67,1635	Femtocelda

Tabla 8. Gestión de datos y resultados del análisis estadístico

CAPÍTULO IV.

4. Resultados y discusión

4.1. Resultados de las simulaciones de Matlab

Con el propósito de evaluar el comportamiento de la cobertura en espacios interiores se desarrollaron simulaciones en Matlab utilizando el plano arquitectónico del primer piso del bloque B de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH). Para este análisis se consideraron dos escenarios, la cobertura proporcionada por la macrocelda existente y la cobertura generada mediante la inclusión de femtoceldas como solución tecnológica. Para evidenciar las mejoras que se obtuvo en la intensidad de señal con la femtocelda se procedió a realizar los mapas de cobertura de cada simulación.

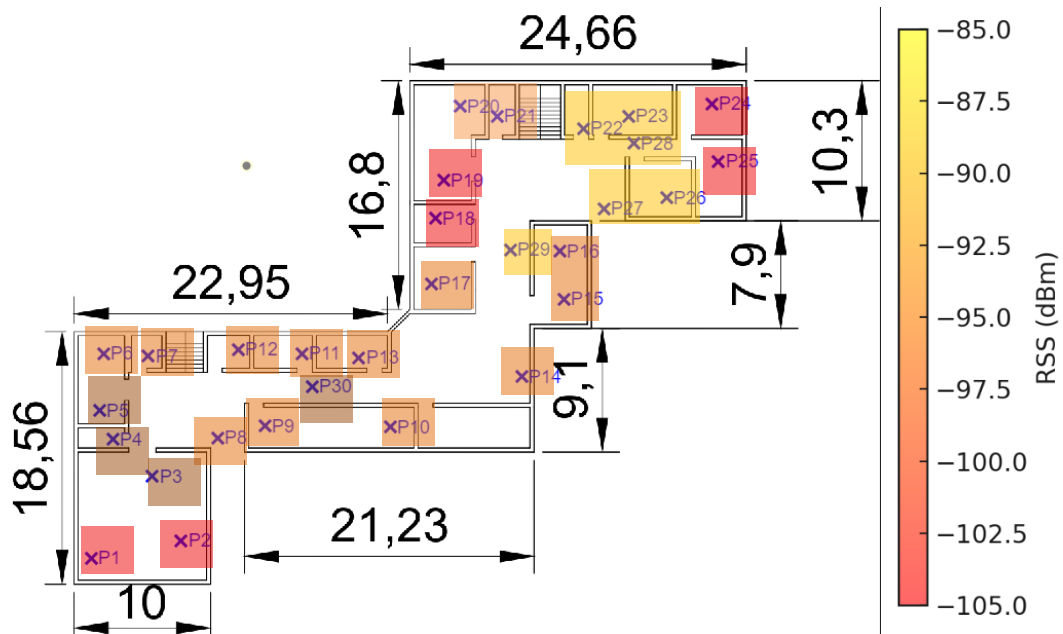


Figura 23. Mapa de cobertura desde la macrocelda.

El mapa de cobertura desde la macrocelda en el primer piso del bloque B de la UNACH se puede apreciar en la Figura 23, en esta se observa que los valores de intensidad de señal en los 30 puntos de medición presentan niveles entre -85 y -105 dBm. Esto refleja un alto nivel de atenuación por penetración de muros y obstáculos lo cual confirma que la macrocelda exterior no garantiza una cobertura adecuada en interiores y refuerza la necesidad de implementar soluciones complementarias para mejorar la cobertura móvil en interiores.

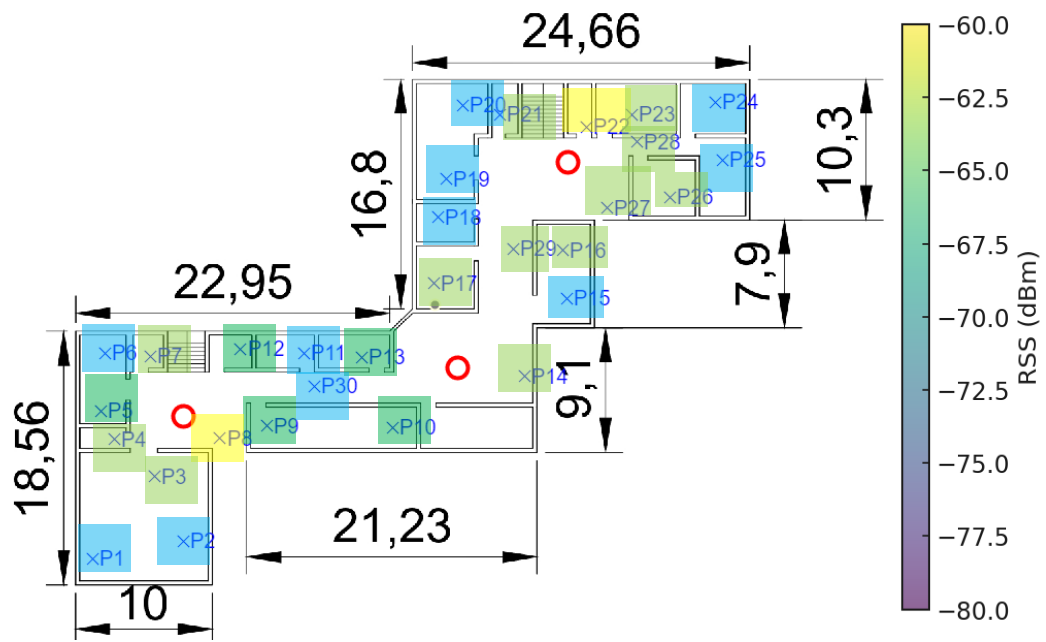


Figura 24. Mapa de cobertura desde la femtocelda.

Por otra parte, en la Figura 24 se observa el mapa de cobertura de la segunda simulación en la cual se consideró la instalación de femtoceldas en puntos estratégicos del edificio. Los resultados muestran una mejora sustancial en los niveles de intensidad de señal alcanzando valores superiores a -75 dBm en la mayoría de los puntos de medición. Esta diferencia evidencia que el despliegue de femtoceldas permite compensar las pérdidas por penetración y reducir el exponente de propagación garantizando así una mejor calidad de servicio en el interior del bloque.

4.2. Análisis descriptivo de la variable intensidad de señal

En este apartado se exponen los resultados estadísticos comparativos de la intensidad de señal registrada a partir de una macrocelda y de una femtocelda, con el fin de mostrar las diferencias en el nivel de cobertura que cada una de estas tecnologías proporciona.

Una Hipótesis se define por:

H_0 = los datos siguen una distribución normal.

H_α = los datos no siguen una distribución normal

Si $n > 50$ se aplica Kolmogorov-Smirnova

Si $n \leq 50$ se aplica Shapiro – Wilk

Si p – valor < 0.05 , se rechaza H_0

Si p – valor ≥ 0.05 , se acepta H_0 y se rechaza H_α

		Válido		Total	
		N	Porcentaje	N	Porcentaje
Intensidad de Señal	Macrocelda	30	100%	30	100%
	Femtocelda	30	100%	30	100%

Tabla 9. Resumen del procesamiento de casos en el software SPSS análisis de rendimiento.

En la Tabla 9 se indica el resumen del procesamiento de datos. Se tomaron un total de 30 mediciones de intensidad de señal para la macrocelda y 30 mediciones para la femtocelda. En ambos casos la totalidad de los datos registrados fueron válidos, no se presentaron valores perdidos ni descartados.

Descriptivos				
	Tipo de antena		Estadístico	Error estándar
Intensidad De Señal	Macrocelda	Media	-94.3557506	.63736347
		Mediana	-94.8448850	
		Varianza	12.187	
		Desv. estándar	3.49098352	
		Mínimo	-100.55164	
		Máximo	-87.95775	
		Rango	12.59389	
	Femtocelda	Media	-68.2681122	.62633209
		Mediana	-67.7272474	
		Varianza	11.769	
		Desv. estándar	3,43056213	
		Mínimo	-73.95631	
		Máximo	-60.21377	
		Rango	13.74253	

Tabla 10. Análisis descriptivo de la intensidad de señal registrada tanto en la macrocelda como en la femtocelda.

El análisis descriptivo de la intensidad de señal registrada tanto en la macrocelda como en la femtocelda se presenta en la Tabla 10. En el caso de la macrocelda, la intensidad de señal promedio se ubicó alrededor de -94 dBm. Los valores se concentraron en un rango relativamente estrecho con una desviación estándar de 3.5 dBm y una variación que osciló entre -100.5 dBm y -87.9 dBm. Esto muestra que, aunque la señal fue débil, en general su comportamiento resultó bastante uniforme en los distintos puntos evaluados.

Por su parte, en la femtocelda se observó un promedio de -68 dBm lo que representa una mejora notable frente a la macrocelda. Sin embargo, la dispersión de los datos fue mayor ya que la desviación estándar alcanzó los 3.4 dBm y los valores oscilaron entre -73.9 dBm y -60.2 dBm con un rango de más de 13 unidades. Esto refleja que la femtocelda brindó una señal más fuerte, aunque con ligeras diferencias en los puntos de medición.

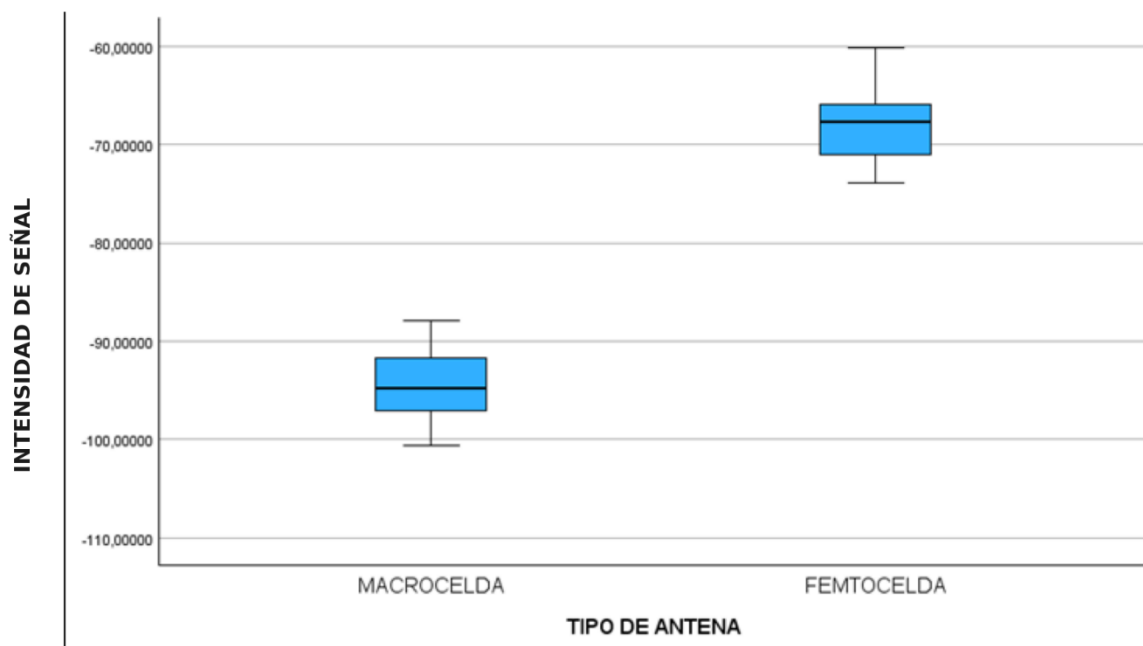


Figura 25. Comparación entre la intensidad de señal de una macrocelda y una femtocelda.

Los resultados de la simulación se presentan en la Figura 25 donde se compara el comportamiento de la intensidad de señal en una macrocelda y en una femtocelda. En el caso de la macrocelda se aprecia que los valores de señal se concentran en la parte inferior del gráfico cercanos a -95 dBm con un rango bastante reducido. Esto refleja que la cobertura es débil, pero al mismo tiempo uniforme ya que las diferencias entre los distintos puntos de medición son mínimas.

Por otra parte, en la femtocelda los datos muestran una señal promedio cercana a -70 dBm lo que representa una mejora significativa respecto a la macrocelda. Sin embargo, en este caso la dispersión es mayor lo que indica que en algunas zonas la cobertura fue mucho más fuerte y en otras ligeramente más baja, aunque en general siempre superior a la proporcionada por la macrocelda.

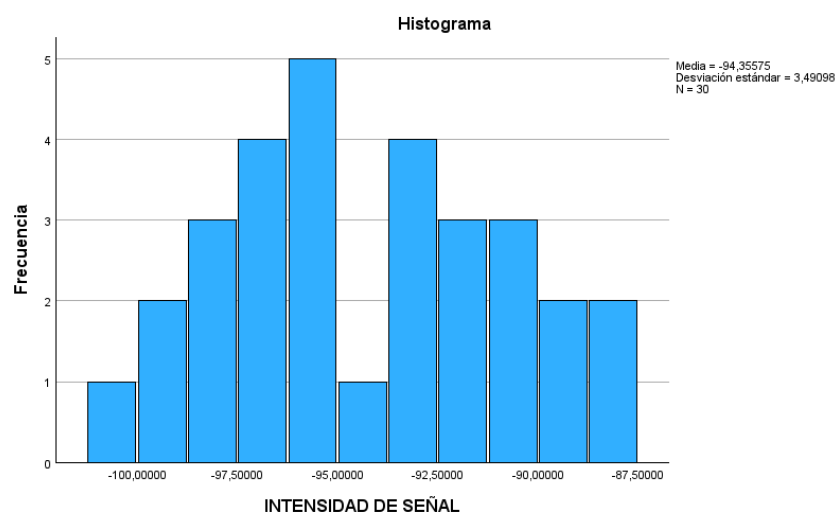


Figura 26. Histograma de la intensidad de señal recibida desde la macrocelda.

La Figura 26 muestra cómo se distribuyen los valores de intensidad en las 30 mediciones registradas. El eje horizontal refleja los niveles de intensidad que van aproximadamente desde -101 dBm hasta -88 dBm mientras que el eje vertical indica la frecuencia con la que aparecen dichos valores.

Se observa que la mayor parte de los registros se concentran entre -95 dBm siendo este el rango con la frecuencia más alta registrada. Esto coincide con la media reportada en los estadísticos descriptivos que fue de -94,36 dBm y con la mediana cercana a este valor. Aunque la mayoría de las observaciones se concentran en torno al promedio también existen valores más extremos hacia los lados lo que refleja cierta dispersión en los datos. La desviación estándar de aproximadamente 3,5 dBm respalda esta variabilidad moderada.

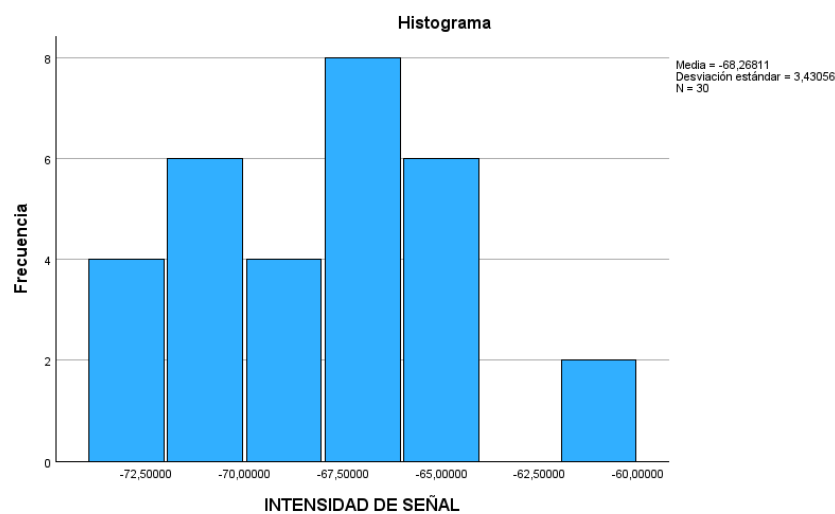


Figura 27. Histograma de la intensidad de señal recibida desde la femtocelda.

En la Figura 27 se puede observar el histograma correspondiente a la femtocelda en la cual se muestra que la mayoría de las mediciones de intensidad de señal se concentran en un rango cercano a los -70 dBm y -65 dBm donde se encuentran los valores más frecuentes. El punto central de la distribución se ubica en una media de -68 dBm lo que evidencia que la señal que provee la femtocelda resulta más fuerte que la obtenida en la macrocelda.

La dispersión de los datos es más amplia que en el caso anterior ya que la desviación estándar es de 3.4 dBm lo que indica mayor variabilidad en las mediciones. Esto se ve reflejado en la presencia de un valor atípico que se encuentra muy por encima de la mayoría de los registros cercano a -60 dBm lo que muestra que en ciertos puntos la señal alcanzó niveles notablemente superiores.

Pruebas de normalidad							
	Tipo de antena	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Intensidad De Señal	Macrocelda	.149	30	.088	.921	30	.029
	Femtocelda	.169	30	.028	.789	30	<.001

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 11. Prueba de normalidad de los valores medidos.

La Tabla 11 presenta los resultados de las pruebas de normalidad aplicadas a los datos de intensidad de señal obtenidos tanto en la macrocelda como en la femtocelda. Dado que el número de datos es menor a 50, la prueba más adecuada para ser utilizada en este caso de estudio es Shapiro-Wilk. Los resultados muestran que, en el caso de la macrocelda, el estadístico de Shapiro-Wilk arrojó un valor de significancia de 0.029 mientras que para la femtocelda fue menor a 0.001. En ambos escenarios los valores son inferiores al nivel crítico de 0.05 lo que implica que los datos no siguen una distribución normal.

Por esta razón, se optó por emplear pruebas no paramétricas que no dependen de la distribución de los datos y permiten comparar medianas entre grupos independientes. En particular se utilizó la prueba U de Mann-Whitney la cual resulta adecuada para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la intensidad de señal registrada con la macrocelda y con la femtocelda.

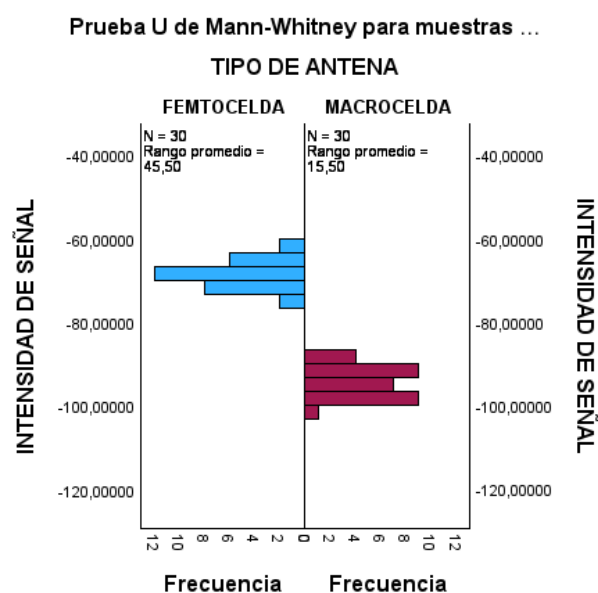


Figura 28. Comparación de la intensidad de señal entre la macrocelda y la femtocelda.

La Figura 28 muestra los resultados de la prueba U de Mann-Whitney aplicada para comparar la intensidad de señal entre la macrocelda y la femtocelda. En ambos casos se analizaron 30 mediciones, pero los rangos promedios revelan una clara diferencia en el caso de la femtocelda el rango promedio obtenido fue de 45.50 mientras que, la macrocelda presentó un rango promedio de 15.50 lo que confirma que las femtoceldas brindan mejor capacidad de cobertura dentro de los espacios interiores.

En el análisis de las medianas se evidencia que la femtocelda alcanza un valor central de -68.27 dBm mientras que la macrocelda presenta -94.36 dBm. Esta diferencia refleja que en promedio la femtocelda proporciona una señal mucho más fuerte y estable en interiores en comparación con la cobertura limitada ofrecida por la macrocelda.

La distribución de los datos muestra que la macrocelda concentra sus valores en intensidades bajas y con escasa variabilidad lo que confirma sus limitaciones al atravesar estructuras físicas. La femtocelda presenta una señal más intensa, aunque con un rango de variación más amplio lo que permite identificar tanto zonas con cobertura óptima como otras con niveles ligeramente inferiores.

4.3 Prueba de hipótesis

Después de aplicar las pruebas de normalidad a los datos se procedió a verificar la hipótesis correspondiente al estudio.

Hipótesis:

H_0 : med 1 = med 2

H_a : med 1 \neq med 2

HIPÓTESIS NULA

Las medianas de las medidas de intensidad de señal obtenidas a partir de las simulaciones desde la macrocelda y de la femtocelda no presentan diferencias significativas por lo que se consideran estadísticamente iguales.

HIPÓTESIS ALTERNATIVA

Las medianas de las medidas de intensidad de señal obtenidas a partir de las simulaciones desde la macrocelda y de la femtocelda presentan diferencias significativas por lo que se consideran estadísticamente diferentes.

Resumen de contrastes de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig. ^{a,b}	Decisión
1	Las medianas de las variables intensidad de señal es la misma para la macrocelda y la femtocelda.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	<.001	Rechaza la hipótesis nula.
a. El nivel de significación es de .050.				
b. Se muestra la significancia asintótica.				

Tabla 12. Contraste de hipótesis Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes.

La Tabla 12 contrasta las hipótesis y resume los resultados de la prueba U de Mann-Whitney aplicada a las mediciones de intensidad de señal registradas en la macrocelda y la femtocelda mediante las simulaciones. La hipótesis nula planteaba que las medianas de las medidas de intensidad de señal obtenidas a partir de las simulaciones desde la macrocelda y de la femtocelda no presentan diferencias significativas por lo que se consideran estadísticamente iguales. Sin embargo, el valor de significancia obtenido fue menor a 0.001 muy inferior al umbral de 0.05 establecido como criterio de decisión. De acuerdo con este resultado se procede a rechazar la hipótesis nula lo que confirma que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medidas de intensidad de señal de la macrocelda y la femtocelda. En consecuencia, se valida que el desempeño de ambas tecnologías no es equivalente. Esto refuerza la evidencia de que las femtoceldas ofrecen una mejora sustancial en la cobertura interior del área de estudio frente a las macroceldas debido a que la intensidad de señal percibida por los usuarios es mayor en el escenario de estudio.

CAPÍTULO V.

Conclusiones

En conclusión, las operadoras móviles del Ecuador han implementado alternativas prácticas para atender los problemas de cobertura en interiores. Entre las más destacadas se encuentran las llamadas mediante Wi-Fi, el uso de dispositivos de refuerzo y los convenios de infraestructura en zonas rurales. Estas acciones demuestran el compromiso por optimizar la experiencia de conexión de los usuarios y al mismo tiempo buscan asegurar un servicio más sólido y accesible.

El análisis realizado permitió determinar que considerando el área total estudiada y el alcance promedio de cada femtocelda se requieren al menos tres dispositivos para garantizar una cobertura completa y uniforme. La ubicación estratégica de estos dispositivos asegura una distribución eficiente de la señal, reduciendo zonas con baja recepción y mejorando significativamente la calidad del servicio móvil en el interior del edificio.

Los resultados demostraron que las femtoceldas constituyen una solución tecnológica eficaz para mejorar la cobertura móvil en espacios interiores, donde la señal proveniente de macroceldas externas presenta altos niveles de atenuación debido a muros y estructuras de hormigón.

Las simulaciones demostraron que la señal proveniente de la macrocelda exterior no logra cubrir adecuadamente los espacios interiores presentando altos niveles de pérdida. En cambio, la incorporación de femtoceldas permitió mejorar de forma notable la intensidad de la señal y garantizar una cobertura más uniforme en toda el área analizada.

Recomendaciones

Se recomienda que en futuras investigaciones se incorpore la implementación de femtoceldas en el área de estudio con el propósito de validar y ajustar los resultados de las simulaciones. Esto permitiría caracterizar con mayor precisión el comportamiento de la señal dentro de los espacios interiores.

Es recomendable analizar la interacción entre macroceldas y femtoceldas con el fin de establecer estrategias que reduzcan interferencias y garanticen una gestión eficiente de la red. De igual forma, se recomienda evaluar la factibilidad de integrar tecnologías emergentes como small cells para determinar su compatibilidad y potencial de mejora en la cobertura móvil.

Para lograr una mejor cobertura y evitar interferencias entre femtoceldas se sugiere utilizar programas especializados que ayuden a definir los lugares más adecuados para instalar las

femtoceldas. Con esto se garantizaría una señal más estable y un funcionamiento más eficiente dentro del área de estudio.

La implementación de esta tecnología podría ser replicable en otros entornos educativos o empresariales que enfrenten problemas similares de conectividad contribuyendo al desarrollo de soluciones tecnológicas sostenibles y de bajo costo en el ámbito de las telecomunicaciones.

Bibliografía

- [1] J. E. Á. C. M. M. T. Z. K. M. Z. Oscar Stalin Baque Pinargote, «Revisión sistemática de la literatura sobre espectro radioeléctrico en la cobertura de red 5G y su aporte en el desarrollo de las ciudades inteligentes,» *RECIAMUC*, vol. 6, nº 4, pp. 169-182, 2022.
- [2] C. Albarrán, «RedesTelecom,» 28 Mayo 2025. [En línea]. Available: <https://www.redestelecom.es/conectividad/que-es-una-small-cell-y-como-funcionan-casos-de-uso/>. [Último acceso: 2025 junio 4].
- [3] O. C. y. D. C.-D. CA Gutierrez, «5G y más allá: Pasado, presente y futuro de las comunicaciones móviles,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, pp. 1702-1736, 2021.
- [4] «Cellnex,» 08 octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.cellnex.com/es/trends/como-disponer-de-una-buena-cobertura-movil-en-mi-edificio/>. [Último acceso: 21 mayo 2023].
- [5] «Exem.fr,» 14 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.exem.fr/es/conciliar-la-conectividad-y-la-exposicion-a-las-ondas-de-radio-en-el-lugar-de-trabajo/>. [Último acceso: 20 junio 2025].
- [6] P. A. E. Cevallos, «Desarrollo de competencias digitales en docentes y estudiantes: retos y oportunidades,» *RIG*, vol. 2, nº 2, p. 55–67, 2023.
- [7] R. E. y. A. O. S. USIADE, «FEMTOCELLS TECHNOLOGY DEPLOYMENT FOR IMPROVED QUALITY OF SERVICE IN MOBILE COMMUNICATION SYSTEM,» *GPH-International Journal of Applied Science*, vol. 7, nº 5, pp. 42-55, 2024.
- [8] R. J. y. Z. U. MN Alam, «Optimización del orden de transmisión de enlace ascendente/descendente basada en redes neuronales de Hopfield para femtoceldas TDD dinámicas en interiores,» *IEEE Access*, vol. 11, pp. 85414-85425, 2023.
- [9] E. Koivusalo, *Comunicaciones convergentes: evolución de la telefonía a Internet móvil 5G*, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2023.
- [10] K. M. Z. y. T. M. M. P. J. R. López Rebolledo, «El avance tecnológico en la telefonía móvil,» *UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, vol. 6, nº 3, p. 49–57, 2021.
- [11] «Small Cell Forum,» 3 julio 2024. [En línea]. Available: <https://www.smallcellforum.org/press-releases/scf-market-forecast-report-highlights-technology-choices-to-maximize-5g-benefits-and-roi/>. [Último acceso: 23 Junio 2025].
- [12] S. Secgin, «Comunicación celular y sistemas 1G,» de *Evolución de los ecosistemas de comunicación inalámbrica*, Wiley-IEEE Press, 2023, pp. 51-56.
- [13] K. Pahlavan, «9 tecnologías inalámbricas celulares 2G–6G,» de *Comprensión de las*

redes de comunicaciones: para aplicaciones cibernéticas emergentes, River Publishers, 2021, pp. 471-513.

- [14] S. Secgin, «Sistemas 3G,» de *Evolución de los ecosistemas de comunicación inalámbrica*, Wiley-IEEE Press, 2023, pp. 65-69.
- [15] D. C. y. Š. Paulikas, «Evaluación de la QoE de la transmisión de video de enlace ascendente en redes celulares 4G y 5G mediante mediciones reales,» *IEEE Access*, vol. 13, pp. 53996-54018, 2025.
- [16] N. R. F. S. A. I. F. A. M. J. M. Z. WSHMW Ahmad, «5G Technology: Towards Dynamic Spectrum Sharing Using Cognitive Radio Networks,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14460-14488, 2020.
- [17] T. H. O. T. A. T. y. M. L.-A. H. Pennanen, «6G: La red inteligente de todo,» *IEEE Access*, vol. 13, pp. 1319-1421, 2025.
- [18] M. H. M. S. I. M. M. F. & K. S. Qasim, «5G Cellular Networks: Coverage Analysis in the Presence of Inter-Cell Interference and Intentional Jammers,» *Electronics*.
- [19] A. García, «Xataka Móvil,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.xatakamovil.com/conectividad/femtoceldas-mejorando-la-cobertura-movil-en-interiores>. [Último acceso: 2 junio 2025].
- [20] «3rd Generation Partnership Project (3GPP),» 2022. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org>. [Último acceso: 7 junio 2025].
- [21] «ITU-R M.2083-0,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.itu.int>. [Último acceso: 7 junio 2025].
- [22] W. W. K. Y. C. K. M. y. X. G. Z. Liu, «Maximización de la tasa de transmisión para redes de femtoceldas de acceso híbrido con restricciones de interrupción basadas en el mecanismo de incentivos de precios,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, nº 6, pp. 6699-6708, 2020.
- [23] S. V. y. S. V. P. Shinde, «Estudio de la arquitectura de femtoceldas para la evolución a largo plazo (Lte): Red avanzada,» *Revista Internacional de Innovaciones en Investigación y Tecnología de Ingeniería*, pp. 1-6, 2015.
- [24] X. C. Z. L. y. X. L. S. Yan, «Gestión de interferencias en redes integradas espaciales y terrestres 6G: Desafíos y enfoques,» *Intelligent and Converged Networks*, vol. 1, nº 3, pp. 271-280, 2020.
- [25] D. K. P. D. e. al., «Comparative Analysis of Macro-Femto Networks Interference Mitigation Techniques,» *Int. J. Wireless and Microwave Technologies*, vol. 12, nº 6, p. 14–24, 2022.
- [26] S. A. y. H. Sinky, «Power and Radio Resource Management in Femtocell Networks for Interference Mitigation,» *Sensors*, vol. 21, nº 14, p. 4843, 2021.
- [27] P. H. L. X. y. A.-H. E. C.-J. Liu, «Identificación de interferencias entre femtoceldas y gestión de recursos,» *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 19, nº 1, pp. 116-129, 2020.
- [28] H.-C. W. S.-H. F. C. W. S. L. y. L. Z. K. Yan, «Localización de interferencias en

- femtoceldas en interiores,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, n° 8, pp. 5176-5187, 2020.
- [29] G. A. K. O. Y. Adekogba, «Interference Reduction Scheme for Femtocell Ultra-Dense-Network: Concept and Research Challenges,» *Revista de Ingeniería y Tecnología para Aplicaciones Industriales*, vol. 10, n° 49, pp. 144-158, Marzo 2024.
- [30] «Small Cell Forum,» 28 abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.smallcellforum.org/docs/private-cellular-networks-with-small-cells/>. [Último acceso: 12 junio 2025].
- [31] C. H. J. Z. y. L. C. H. Zhang, «Mecanismo de gestión de recursos de virtualización con reconocimiento de QoS en redes heterogéneas de backhaul 5G,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 19479-19489, 2020.
- [32] F. A. y. M. S. A. Mehmood, «researchgate,» diciembre 2020. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/344448949_Survey_on_Femtocell_Handover_Management_in_Dense_Heterogeneous_5G_Networks. [Último acceso: 15 junio 2025].
- [33] B. P. P. C. y. K. A. R. Jaramillo, «Repositorio UTPL,» 2020. [En línea]. Available: <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/26199>. [Último acceso: 16 Junio 2025].
- [34] M. B. R. y. T. J. J. A. U. Rehman, «A Survey of Handover Management in Mobile HetNets: Current Challenges and Future Directions,» *Applied Sciences*, vol. 13, n° 5, 2023.
- [35] A. G. Méndez, «ADSLZone,» Enero 2025. [En línea]. Available: <https://www.adslzone.net/noticias/seguridad/vulnerabilidades-lte-5g-redes/>. [Último acceso: 16 junio 2025].
- [36] M. T. M. R. y. G. -M. M. B. Agarwal, «Mitigación del impacto de la interferencia entre niveles en la calidad de las redes celulares heterogéneas,» *45.ª Conferencia IEEE sobre redes informáticas locales (LCN) de 2020*, pp. 497-502, 2020.
- [37] M. M. e. al, «Mejora del rendimiento del sistema en interiores mediante el diseño de femtoceldas considerando la gestión de interferencias y movilidad,» *1.º Taller y Conferencia Anual de Computación y Comunicación (CCWC) del IEEE de 2021*, pp. 1204-1209, 2021.
- [38] «Wikipedia,» septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Femtocelda>. [Último acceso: 6 junio 2025].
- [39] D. & A. M. & H. A. & W. A. Rianti, «Enhanced Indoor Coverage with Femtocells in 5G Networks at 3500 Mhz Frequency using Radiowave Propagation Software,» *Journal of Information Technology and Its Utilization*, vol. 7, n° 1, pp. 37-45, 2024.
- [40] «Global Growth Insights,» Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/small-cells-and-femtocells-market-111388?>. [Último acceso: 23 Junio 2025].
- [41] «AT&T Business,» 2020. [En línea]. Available:

- <https://www.business.att.com/learn/articles/what-is-a-femtocell-a-guide-to-improving-coverage.html?>. [Último acceso: 23 Junio 2025].
- [42] «Ley Organica de las Telecomunicaciones,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/Ley-Org%C3%A1nica-de-Telecomunicaciones.pdf>. [Último acceso: 23 Junio 2025].
- [43] «ARCOTEL,» abril 2025. [En línea]. Available: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2025/04/PROYECTO-RESOLUCION-AMPLIACION-PPCE_FMpotencianormal-signed-signed-signed.pdf. [Último acceso: 23 junio 2025].
- [44] 2008. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/slideshow/constitucion-del-ecuador-2008-62065170/62065170>. [Último acceso: 23 Junio 2025].
- [45] A. A. G. F. S. N. H. R. N. Mohd Nordin, «Acerca de los retos y la evaluación del rendimiento de las femtoceldas en redes ultradensas,» *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 9, nº 4, p. 5172–5177, 2020.
- [46] M. A. A. A. H. A. W. Desi Rianti, «Enhanced Indoor Coverage with Femtocells in 5G Networks at 3500 MHz Frequency using Radiowave Propagation Software,» *JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGY AND ITS UTILIZATION*, vol. 7, nº 1, 2024.
- [47] E. N. R. Escobar, «Repositorio Universidad Nacional de Chimborazo,» 2023. [En línea]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/11950>. [Último acceso: 12 agosto 2024].
- [48] «Claro,» [En línea]. Available: <https://www.claro.com.ec/personas/servicios/servicios-moviles/postpago/vowifi/>. [Último acceso: 2 Julio 2025].
- [49] «Movistar,» [En línea]. Available: <https://www.movistar.es/atencion-cliente/llamadas-wifi>. [Último acceso: 2 Julio 2025].
- [50] «ARCOLTEL,» 15 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2024/02/2019-11-05-Convenio-CNT-SAMM.pdf>. [Último acceso: 2 Julio 2015].
- [51] Fujitsu, «Fujitsu,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.fujitsu.com/us/imagesgig5/High-Capacity-Indoor-Wireless.pdf?>. [Último acceso: 15 septiembre 2025].

ANEXOS

Anexo 1

La figura 29 muestra los parámetros obtenidos con la aplicación Cell Mapper, los cuales fueron utilizados para configurar la simulación de la cobertura desde la macrocelda. Entre los valores más relevantes se incluyen la potencia de señal recibida, la calidad de señal, la intensidad en dBm, las bandas de frecuencia empleadas y los identificadores de celda correspondientes a los operadores Movistar y Claro. Estos registros permitieron contar con datos reales de las estaciones base cercanas al área de estudio.

eNB 14685:0 - FDD LTE		-97 dBm
MCC: 740	MNC: 0	TAC: 31244
Duplexing	FDD	
LTE Reference Signal Received Power	-97 dBm	
LTE Reference Signal Received Quality	-13 dB	
LTE Receive Signal Strength	-85 dBm	
Band Name	PCS blocks A-F	
RX Frequency	1940.0 MHz	
Band Number	2	
TX Frequency	1860.0 MHz	
LTE Cell Identity	3759360	
(EA/UA/A)RFCN	700	
LTE Physical Cell Identity	35	
Provider	Movistar	
eNB 100285:21 - FDD LTE		-105 dBm
MCC: 740	MNC: 1	TAC: 50800
Duplexing	FDD	
LTE Reference Signal Received Power	-105 dBm	
LTE Reference Signal Received Quality	-14 dB	
LTE Receive Signal Strength	-91 dBm	
Band Name	PCS blocks A-F	
RX Frequency	1967.5 MHz	
Band Number	2	
TX Frequency	1887.5 MHz	
LTE Cell Identity	25672981	
(EA/UA/A)RFCN	975	
LTE Physical Cell Identity	23	
Provider	CLARO	
UNKNOWN - FDD LTE		-101 dBm
MCC: ?	MNC: ?	TAC: 65535
Duplexing	FDD	
LTE Reference Signal Received Power	-101 dBm	
LTE Reference Signal Received Quality	-17 dB	
LTE Receive Signal Strength	-85 dBm	
Band Name	PCS blocks A-F	
RX Frequency	1940.0 MHz	

Figura 29. Parámetros de configuración de la macrocelda.

Anexo 2

La Figura 30 muestra las características técnicas de una femtocelda, en este caso es el Indoor NR Remote Radio Unit (RRU) Model: 52434. Estos parámetros fueron tomados como referencia para el diseño y la simulación de la femtocelda, asegurando que el trabajo se base en datos reales, precisos y representativos de las condiciones actuales del entorno tecnológico.

I SPECIFICATION

TECHNOLOGY	
Standard	LTE/NR
LTE Mode	TDD, FDD
RF Standard	3GPP 38.104 / Category B
Frequency Bands	LTE: - B48 (3550 MHz – 3700 MHz) NR: - N41 (2496 MHz – 2690 MHz) - N78 (3300 MHz – 3600 MHz) LTE+NR: - B3(Ul): 1710MHz-1785MHz, DL: 1805MHz-1880MHz) + N41 (2496MHz – 2690MHz) - B3(Ul): 1710MHz-1785MHz, DL: 1805MHz-1880MHz) + N78 (3300MHz – 3600MHz)*
Channel Bandwidth	LTE: 5/10/15/20 MHz NR: 100MHz
IBW	Maximum 100MHz
OBW	LTE: 40MHz NR: 100MHz
Carrier Config.	LTE: Maximum 2 carriers NR: 1 carrier
Multiplexing	DL: 2x2 or 4x4
INTERFACE	
Interface Type	CPRI
Data Interface	1 x 10GE optical fiber interface (SFP+), LC 1 x 10GE Ethernet interface (RJ-45)
Power Supply	-40VDC ~ -57 VDC, nominal -48VDC or 48V PoE++ power supply, comply with IEEE 802.3bt standard
LED Indicators	2 x status LED: RUN/PWR
LINK BUDGET	
Antenna	4T4R built-in high gain antenna 3dBi@N41 4dBi@N78 4dBi@B48 1.5dBi@B3
Max Output Power	24 dBm / channel x 4 channels
Rx Sensitivity	LTE: -102 dBm NR: -94 dBm

Figura 30. Parámetros técnicos de la femtocelda para la simulación.

Anexo 3

La Tabla 13 contiene los valores obtenidos en las simulaciones de cobertura tanto de la macrocelda como de la femtocelda. En ella se registran las intensidades de señal expresadas en dBm, de este modo, la tabla permite observar de manera comparativa cómo la femtocelda mejora significativamente la intensidad de señal en el área analizada, frente a la macrocelda.

RSS_femtocelda_dBm	RSS_macrocella_dBm
-73.95630683	-100.5516403
-71.04307564	-99.75672727
-65.12285978	-98.84974765
-65.9226077	-98.50207154
-67.1634762	-98.12199174
-69.0199957	-97.07069776
-65.39013345	-96.70587825

-60.7402879	-97.76153123
-67.20616795	-97.27655381
-67.6907565	-96.90026102
-71.83396105	-95.582029
-67.71165714	-95.8600701
-68.66530336	-95.45165193
-65.10289844	-95.88296818
-71.3987036	-94.23811815
-67.69424629	-93.00170972
-67.74283763	-93.52097302
-72.19084629	-91.69552337
-70.86380713	-90.5168889
-70.64317389	-87.95774827
-67.16217654	-88.4499691
-60.21377272	-89.60450941
-66.77234056	-89.80059197
-73.37494897	-90.82785974
-73.07088589	-92.36303883
-69.64122078	-92.56920607
-64.01345229	-92.19204382
-65.82034402	-90.68504403
-69.11334928	-92.72744282
-71.75111881	-96.24803171

Tabla 13. Mediciones de intensidad de señal obtenidas en las simulaciones de cobertura.