



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**Diseño y análisis de un enlace descendente en un sistema Cell-Free  
Massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica,  
utilizando modelamiento matemático para mejorar la eficiencia  
espectral.**

Trabajo de Titulación para optar al título

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**Autor:**

Lozano Brito Rostty Alexander

**Tutor:**

Ing. Luis Patricio Tello Oquendo, PhD.

**Riobamba, Ecuador. 2026**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Rostty Alexander Lozano Brito**, con cédula de ciudadanía **060610175-6**, autor del trabajo de investigación titulado: **“Diseño y análisis de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica, utilizando modelamiento matemático para mejorar la eficiencia espectral”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi 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 autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, el 1 de diciembre de 2025.



---

Rostty Alexander Lozano Brito

**C.I:** 060610175-6

## **DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR**

En la Ciudad de Riobamba, a los 30 días del mes de noviembre de 2025, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **LOZANO BRITO ROSTTY ALEXANDER** con CC: **060610175-6**, de la carrera **TELECOMUNICACIONES** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN** titulado **“DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN ENLACE DESCENDENTE EN UN SISTEMA CELL-FREE MASSIVE MIMO PARA COMUNICACIONES EN LA BANDA MILIMÉTRICA, UTILIZANDO MODELAMIENTO MATEMÁTICO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ESPECTRAL”**, QUE CORRESPONDE AL DOMINIO CIENTÍFICO **“TECNOLÓGICO”** y alineado a la línea de investigación **“ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES”**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



---

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo


**TUTOR PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Diseño y análisis de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica, utilizando modelamiento matemático para mejorar la eficiencia espectral**” presentado por **Rostty Alexander Lozano Brito**, con cédula de identidad número **060610175-6**, bajo la tutoría del Ing. Luis Tello Oquendo PhD; 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 el 5 de enero del 2026.

**Presidente del Tribunal de Grado**  
Deysi Vilma Inca Balseca Ms.C.



---

**Miembro del Tribunal de Grado**  
Yesenia Elizabeth Cevallos Villacrés, PhD.



---

**Miembro del Tribunal de Grado**  
Manuel Antonio Meneses Freire, PhD.



---

# CERTIFICADO ANTIPLAGIO



Dirección  
Académica  
VICERRECTORADO ACADÉMICO



## CERTIFICACIÓN

Que **LOZANO BRITO ROSTTY ALEXANDER**, con CC. **060610175-6**, estudiante de la carrera de **TELECOMUNICACIONES** de la Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado: **“DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN ENLACE DESCENDENTE EN UN SISTEMA CELL-FREE MASSIVE MIMO PARA COMUNICACIONES EN LA BANDA MILIMÉTRICA, UTILIZANDO MODELAMIENTO MATEMÁTICO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ESPECTRAL”**, cumple con el 6% de similitud y el 4% de Inteligencia Artificial, de acuerdo con el reporte del sistema Antiplagio **COMPILATION MAGISTER**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente, autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 16 de diciembre de 2025



Firmado electrónicamente por:  
**LUIS PATRICIO TELLO**  
**OQUENDO**  
Validar únicamente con FirmaEC

---

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo  
**TUTOR PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

## DEDICATORIA

*Con todo mi corazón, dedico este logro a quienes fueron mi impulso y mi mayor fortaleza a lo largo de esta travesía. A mis padres, Ramiro Lozano y Fanny Brito, por ser luz en mis días oscuros y sostén en cada caída; por su amor incondicional, sus sacrificios y por enseñarme que ningún sueño es demasiado grande cuando se lucha con el alma, quiero hacer una mención especial a mis familiares que partieron de este mundo gracias por haber creído siempre en mí, por sus enseñanzas que aún resuenan en mi corazón y por el amor que dejaron como legado*

*A mis hermanos y a mis compañeros, por su cariño sincero, su compañía que alivió el camino y por cada gesto, palabra y abrazo que me recordaron que nunca estuve solo. Su fe en mí fue ese aliento que levantó mi espíritu cuando las fuerzas parecían agotarse.*

*Este logro no es únicamente mío: pertenece a cada uno de ellos. En cada página, en cada esfuerzo y en cada avance están presentes sus voces, su apoyo incansable y el amor que me sostuvo cuando dudé. Hoy alcanzo esta meta gracias a ellos, porque caminaron conmigo, creyeron en mí y llenaron este proceso de esperanza, valentía y emoción. Con amor profundo y eterna gratitud, este triunfo se los entrego a ustedes.*

*Rostty Lozano*

## AGRADECIMIENTO

*Mis sinceros agradecimientos a cada una de las personas que me brindaron respeto, conocimientos, amistad a lo largo de este camino. A cada uno de los docentes que, con paciencia y entrega, sentaron bases sólidas y contribuyeron de manera invaluable a mi formación académica, personal y profesional.*

*Agradezco profundamente a la docente Deysi Inca quien en múltiples ocasiones y situaciones supo brindarme una mano amiga.*

*Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a mi familia, por apoyo incondicional que han permitido culminar con éxito mi tan anhelada carrera, A mi tutor PhD. Luis Patricio Tello Oquendo por su guía constante y brindarme la motivación necesaria para superar cada desafío académico.*

*Gracias también a quienes, con un consejo oportuno, una palabra de ánimo o un gesto de apoyo, hicieron que este proceso fuese más llevadero y significativo. A todos ustedes, gracias por aportar a la construcción de este profesional y por haber sido parte esencial de este logro.*

# ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	

CAPÍTULO I .....	16
1.1    Introducción.....	16
1.2 Planteamiento del problema .....	17
1.3    Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivos Generales .....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
CAPÍTULO II.....	19
2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Estado del arte .....	19
2.2. Términos y Definiciones .....	20
2.2.1. Sistema Cell-free.....	20
2.2.2. Transmisión de datos en enlace descendente.....	21
2.2.3 Modelo de Canal en la Banda Milimétrica para Cell-Free Massive MIMO.....	21
2.2.5 Principios de la Banda Milimétrica.....	22
2.2.6 Tecnología MU-MIMO .....	22
2.2.7 Eficiencia Espectral en CF-mMIMO .....	22
2.2.8 Transmisión del enlace de bajada (Downlink).....	22
2.2.9 Modelo de comunicación Downlink.....	23



2.2.10 Precoding escalable P-MMSE para el downlink .....	24
2.2.11 Ecuación general del P-MMSE escalable .....	24
2.2.12 Spectral Efficiency en el downlink con P-MMSE .....	25
2.2.14 Estructura general del sistema Cell-Free Massive MIMO .....	25
2.2.15 Estrategias de clústeres para el downlink en sistemas Cell-Free Massive MIMO ..	25
2.2.16 Comparación entre sistemas centralizados y distribuidos en Massive MIMO .....	26
CAPÍTULO III .....	27
3. METODOLOGÍA.....	27
3.1 Tipo de Investigación .....	27
3.1.1 Investigación Bibliográfica.....	27
3.1.2 Investigación Aplicada.....	27
3.1.3 Investigación de Exploratoria .....	27
3.3 Métodos y técnicas de investigación.....	28
3.3.1 Método Científico .....	28
3.3.2 Técnica de Recolección de Datos .....	28
3.3.3 Instrumentos de Recolección de Datos .....	28
3.3.4 Escenario de simulación: Estadio (DL en banda milimétrica).....	29
3.4 Población.....	30
3.5 Operacionalización de variables.....	30
3.5.1 Variable independiente .....	30
3.5.2 Variable dependiente .....	30
3.6 Procedimiento y Análisis. ....	31
3.6.2 Parámetros de configuración del algoritmo .....	33
3.6.3 Estructura de Programación para la simulación CF-mMIMO en DL.....	34
CAPÍTULO IV .....	36
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	36
4.1 Resultados y análisis .....	36

4.1.2 Resultados y análisis de la SE en función del número de Sitios Celulares (C) .....	36
4.1.3 Resultados y análisis de la SE en función del número de antenas por Sitios Celulares (A).....	42
4.2 Análisis Estadístico de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica, utilizando modelamiento matemático para mejorar la eficiencia espectral. ....	48
4.2.1 Prueba de Normalidad.....	48
4.2.3 Análisis ANOVA .....	50
4.2.5 Interpretación de Resultados.....	56
CAPITULO V.....	57
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	57
5.1 Conclusiones.....	57
5.2 Recomendaciones.....	59
BIBLIOGRAFÍA .....	60
ANEXOS .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Sistema Massive MIMO celular. ....	20
<b>Figura 2:</b> Topología de comunicación para un Enlace Descendente. ....	21
<b>Figura 3:</b> Arquitectura centrada hacia un dispositivo.....	22
<b>Figura 4:</b> Ejemplo de agrupaciones de cooperación dinámica en una red sin células con un gran número de sitios celulares.....	23
<b>Figura 5.</b> Diagrama de flujo del desarrollo del proyecto de Investigación. ....	31
<b>Figura 6.</b> Diagrama de flujo principal sobre la estructura del algoritmo para un sistema CF-mMIMO de un enlace descendente. ....	34
<b>Figura 7.</b> Flujograma del Algoritmo de Simulación del Enlace DL con Precoding P-MMSE. ....	35
<b>Figura 8.</b> Diagrama del proceso de simulación y parámetros del sistema CF-mMIMO para los resultados de la SE.....	36
<b>Figura 9.</b> Estructura Jerárquica de las Combinaciones de Simulación según A, C y U.....	37
<b>Figura 10.</b> Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25:25:150\}$ ), usando 100 usuarios indicando una creciente SE. ....	38
<b>Figura 11.</b> Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25:25:150\}$ ), usando 200 usuarios indicando una creciente SE. ....	39
<b>Figura 12.</b> Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25:25:150\}$ ), usando 300 usuarios indicando una creciente SE. ....	40
<b>Figura 13.</b> Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25:25:150\}$ ), usando 400 usuarios indicando una creciente SE. ....	41
<b>Figura 14.</b> Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25:25:150\}$ ), usando 500 usuarios indicando una creciente SE. ....	42
<b>Figura 15.</b> Resultados: SE vs número de usuarios para $\{4,8,16,32\}$ antenas por C, $\{25,50,75,100,150\}$ C y $\{100\}$ Usuarios.....	43
<b>Figura 16.</b> Resultados: SE vs número de usuarios para $\{4,8,16,32\}$ antenas por C, $\{25,50,75,100,150\}$ C y $\{200\}$ Usuarios.....	44
<b>Figura 17.</b> Resultados: SE vs número de usuarios para $\{4,8,16,32\}$ antenas por C, $\{25,50,75,100,150\}$ C y $\{300\}$ Usuarios.....	45
<b>Figura 18.</b> Resultados: SE vs número de usuarios para $\{4,8,16,32\}$ antenas por C, $\{25,50,75,100,150\}$ C y $\{400\}$ Usuarios.....	46
<b>Figura 19.</b> Resultados: SE vs número de usuarios para $\{4,8,16,32\}$ antenas por C, $\{25,50,75,100,150\}$ C y $\{500\}$ Usuarios.....	47
<b>Figura 20.</b> Gráfico de medias: efecto del número de sitios celulares (L) y la cantidad de usuarios (K) en la eficiencia espectral (SE) del sistema, considerando $N = 32$ antenas.....	51
<b>Figura 21.</b> Diagrama de cajas de la Eficiencia Espectral (SE) vs el número de sitios celulares (C) en función de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica.....	52
<b>Figura 22.</b> Diagrama de cajas de la Eficiencia Espectral (SE) vs el número de antenas (A) en función de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica.....	53

**Figura 23.** Diagrama de cajas de la Eficiencia Espectral (SE) vs el número de usuarios (U) en función de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica..... 54

**Figura 24.** Diagrama de Flujo del procedimiento y análisis estadístico del diseño de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO ..... 55

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Estimación del esfuerzo computacional requerido, en términos de multiplicaciones complejas, para atender a un usuario típico bajo diversos métodos de combinación durante un bloque de coherencia. ....	24
<b>Tabla 2.</b> Herramientas e instrumentos para la Recolección de Datos.....	28
<b>Tabla 3.</b> Configuración del entorno de simulación: estadio (C, A, U y canal).....	29
<b>Tabla 4.</b> Variables de investigación.....	30
<b>Tabla 5.</b> Parámetros predeterminados de la simulación para el sistema CF-mMIMO.....	33
<b>Tabla 6.</b> Configuración de las variables independientes en distintos escenarios para el análisis general de la SE en Sistemas CF-mMIMO. ....	48
<b>Tabla 7.</b> Preparación de datos para el análisis global de la SE en CF-mMIMO (variando C, A y U).....	48
<b>Tabla 8.</b> Pruebas de normalidad para la SE según C y U en el sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en DL .....	49
<b>Tabla 9.</b> Pruebas de normalidad para la SE según C y U en el sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en DL .....	49
<b>Tabla 10.</b> Análisis ANOVA de tres factores C, A y U en la SE en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en DL .....	50

## RESUMEN

La tecnología Cell-Free Massive MIMO (CF-mMIMO) constituye una evolución fundamental dentro de las redes inalámbricas avanzadas. A diferencia de los sistemas celulares tradicionales basados en celdas fijas, CF-mMIMO elimina las fronteras entre celdas y distribuye una gran cantidad de sitios celulares a lo largo del área de cobertura. Estos operan de manera coordinada mediante una unidad central, proporcionando mayor uniformidad de servicio, reducción de interferencias y un uso más eficiente del espectro. Su arquitectura distribuida permite atender a todos los usuarios con calidad similar, incluso en zonas alejadas o altamente congestionadas, convirtiéndola en una tecnología clave para escenarios donde la densidad, confiabilidad y rendimiento deben mantenerse elevados.

Bajo este marco, se desarrolló un modelo de simulación del sistema CF-mMIMO en el enlace descendente de comunicación, orientado a estudiar su comportamiento en función de tres variables principales: número de sitios celulares, cantidad de antenas por punto de acceso y usuarios atendidos simultáneamente. La simulación fue implementada bajo condiciones realistas, incorporando procesos de propagación, distribución espacial, densificación de infraestructura y operación conjunta de los puntos de acceso.

Los resultados permitieron validar el comportamiento del sistema, demostrando que incrementar la densidad de sitios celulares y el número de antenas mejora significativamente el rendimiento, mientras que la variación de usuarios no genera cambios sustanciales. En conjunto, el modelo desarrollado constituye una base sólida para futuras investigaciones y posibles despliegues reales de esta tecnología en redes de próxima generación.

**Palabras claves:** Cell-Free Massive MIMO; Eficiencia Espectral; Redes; Arquitectura Distribuida; Sitios Celulares; Enlace Descendente; Antenas; Eficiencia Espectral.

## ABSTRACT

Cell-Free Massive MIMO (CF-mMIMO) technology represents a fundamental evolution in advanced wireless networks. Unlike traditional cellular systems based on fixed cells, CF-mMIMO eliminates cell boundaries and distributes a large number of cell sites across the coverage area. They operate in a coordinated manner through a central unit, providing greater service uniformity, reduced interference, and more efficient spectrum use. Its distributed architecture enables it to serve all users with similar quality, even in remote or highly congested areas, making it a key technology for scenarios where density, reliability, and performance must remain high.

Within this framework, a simulation model of the CF-mMIMO system was developed for the downlink communication, aimed at studying its behavior as a function of three main variables: the number of cell sites, the number of antennas per access point, and the number of users served simultaneously. The simulation was implemented under realistic conditions, incorporating propagation processes, spatial distribution, infrastructure densification, and joint operation of the access points.

The results validated the system's behavior, demonstrating that increasing cell site density and the number of antennas significantly improves performance, while varying the number of users does not produce substantial changes. Overall, the developed model provides a solid foundation for future research and potential real-world deployments of this technology in next-generation networks.

**Keywords:** Cell-Free Massive MIMO; Spectral Efficiency; Wireless Networks; Distributed Architecture; Cellular Sites; Downlink; Antennas.



**Reviewed by:**

Mgs. Jessica María Gauranga Lema

**ENGLISH PROFESSOR**

C.C. 0606012607

# CAPÍTULO I

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las redes inalámbricas emplean predominantemente un modelo celular, el cual organiza la infraestructura en grupos de celdas, cada una equipada con una estación base que actúa como punto de acceso a Internet. Estas estaciones definen áreas específicas de cobertura, permitiendo que los usuarios ubicados dentro de los límites de una celda accedan directamente al servicio proporcionado por su estación base correspondiente [1].

Una de las grandes ventajas de este esquema permite la reutilización de frecuencias entre celdas distintas, lo que maximiza el aprovechamiento del espectro disponible. Sin embargo, cuando estaciones base cercanas utilizan frecuencias iguales, pueden producir interferencias que afecten la calidad del servicio. Para mitigar este efecto, se define una distancia mínima conocida como un perímetro de reutilización entre celdas que operan en la misma banda de frecuencias [2].

Antes de la llegada de Cell-Free Massive MIMO, las tecnologías predominantes incluían las redes celulares tradicionales con arquitecturas macro-cell, small-cell y sistemas MIMO convencionales, donde las antenas se concentraban en estaciones base fijas. Estas redes solían concentrar sus antenas en estaciones bases fijas, lo que generaba ciertas limitaciones. En cambio, CellFree Massive MIMO distribuye un gran número de antenas de forma cooperativa sobre una amplia área sin celdas definidas, lo que mejora significativamente la eficiencia espectral al reducir la interferencia y ofrecer una mejor calidad de servicio uniforme a todos los usuarios [4].

A pesar de su eficiencia histórica, el modelo celular presenta limitaciones frente al creciente número de dispositivos conectados y a la demanda de mayor velocidad, cobertura y confiabilidad. En escenarios densamente poblados, como entornos suburbanos o urbanos, estas limitaciones se vuelven más evidentes, ya que las estaciones base pueden saturarse fácilmente y generar zonas con cobertura deficiente o interferencias elevadas. Ante esta situación, se vuelve imprescindible explorar arquitecturas alternativas que superen las restricciones del modelo celular tradicional y optimicen la eficiencia del espectro radioeléctrico [6]. Una de las alternativas emergentes es la arquitectura cell-free massive MIMO, la cual elimina la dependencia de estaciones base centralizadas y adopta una configuración distribuida. Este modelo se basa en el despliegue masivo de puntos de acceso o unidades de antenas distribuidas estratégicamente en un área, con el objetivo de ofrecer un servicio uniforme y de alta calidad.

Una característica distintiva de este enfoque es que la cantidad de estaciones base desplegadas excede ampliamente al número de usuarios, lo que incrementa la eficiencia espectral, mejora la calidad del servicio y proporciona una cobertura homogénea, superando las limitaciones de las celdas tradicionales [5].

El presente trabajo tiene como finalidad analizar, diseñar y simular un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica (mmWave), haciendo énfasis en entornos suburbanos densos. En ese contexto, se evaluará la relación entre los usuarios y



la cantidad de antenas necesarias para mantener el rendimiento del sistema. La primera fase del estudio consiste en modelar matemáticamente el sistema considerando variables como la posición y densidad de antenas el número de usuarios concurrentes.

En una segunda fase, se identifican las configuraciones que permiten maximizar la eficiencia espectral y reducir la interferencia, con la finalidad de lograr una conectividad robusta.

en la tercera fase, se procedió a la simulación y análisis de distintos escenarios, evaluando el comportamiento del sistema bajo variaciones en la densidad de antenas, usuarios y topologías de red. Finalmente, en la fase cuatro, se evaluó el rendimiento global del sistema cell-free massive MIMO en términos de eficiencia espectral.

Esta investigación es relevante, ya que los sistemas cell-free massive MIMO en mmWave tienen el potencial de transformar la infraestructura de comunicación, ofreciendo conectividad más rápida, fiable y adaptable en contextos de alta densidad poblacional [7].

## 1.2 Planteamiento del problema

Las tecnologías 3G y 4G, fundamentadas en arquitecturas celulares tradicionales, enfrentan importantes limitaciones en términos de cobertura y calidad del servicio. Estas redes se estructuran mediante áreas de cobertura conocidas como celdas, cada una gestionada por una estación base que opera como punto de acceso para los usuarios dentro de su alcance [8]. Aunque este modelo ha sido clave para la expansión de las comunicaciones inalámbricas, su diseño centralizado plantea desafíos significativos, especialmente en entornos con alta densidad de usuarios o terrenos de topografía compleja, donde las capacidades de la red pueden verse comprometidas.

En redes celulares tradicionales, los usuarios que se desplazan entre celdas pueden experimentar interrupciones en el servicio debido al proceso de handover (transferencia de conexión), especialmente en casos de alta velocidad, como en trenes o vehículos en movimiento. Un ejemplo real de esta problemática es la experiencia de desconexiones frecuentes en redes 4G. Este problema afecta aplicaciones críticas como llamadas VoIP o videoconferencias. Para abordar estas limitaciones, arquitecturas emergentes como cell-free massive MIMO y redes híbridas están ganando relevancia. La distribución de antenas en lugar de estaciones base centralizadas mejora la cobertura y reduce las interferencias en áreas densamente pobladas.

Este trabajo surge la necesidad de **diseñar y analizar un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica, utilizando modelamiento matemático para mejorar la eficiencia espectral**, al permitir que múltiples antenas trabajen cooperativamente para atender a los usuarios, reduciendo las interferencias y optimizando el uso del espectro además se podrá evaluar los parámetros en base a distintas topologías de red buscando el rendimiento del sistema en comparación entre modelos teóricos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1. Objetivos Generales**

Diseñar y analizar un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica, utilizando modelamiento matemático para mejorar la eficiencia espectral.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Desarrollar un modelo matemático detallado del enlace descendente en un sistema cellfree massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica que incluya la representación de los efectos de la propagación, ajustado para usuarios desplegados arbitrariamente en el área de cobertura y estaciones base que tienen un número determinado de antenas.
- Determinar la eficiencia espectral como métrica de análisis del sistema para replicar las condiciones teóricas del modelo matemático.
- Evaluar el rendimiento del sistema cell-free massive MIMO en términos de eficiencia espectral para diversas topologías de red.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detalla los trabajos analizados para proyectar un enfoque con respecto a la tecnología Cell-free massive MIMO, además de proporcionar conceptos para comprender el propósito relacionado con el proyecto.

#### 2.1. Estado del arte

En el artículo "Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems" de los autores Emil Björnson y Luca Sanguinetti [5], se introduce un marco para la implementación escalable de sistemas MIMO masivos sin celdas. En las redes celulares tradicionales, se forman celdas autónomas, lo que provoca problemas de interferencia. El MIMO masivo libre de celdas se propone como una solución, donde múltiples sitios celulares distribuidos sirven conjuntamente a los usuarios sin formar celdas. Dentro de las investigaciones que proponen incluyen algoritmos escalables para el acceso inicial, la asignación de pilotos y la formación de clusters, que adaptan los métodos estándar de estimación de canales, pre-codificación y combinación para ser escalables. Esta tecnología ayuda a mejorar las redes inalámbricas, ya que permite una mayor cobertura debido a que emitimos señal inalámbrica simultáneamente con varias antenas que tiene el router o punto de acceso WiFi, gracias al MIMO, conseguiremos algo más de cobertura que si solamente tuviéramos una antena.

Diversos estudios relacionados con la tecnología MIMO se han llevado a cabo. Por ejemplo, en [6] se analiza el diseño de un sistema de antenas MIMO para una plataforma de un UAV (vehículo aéreo no tripulado), utilizando Modos Característicos (CM, por sus siglas en inglés) como herramienta principal para mejorar los parámetros de transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz. A través del análisis de ángulos característicos, se identificaron los modos electromagnéticos más relevantes, junto con sus respectivas corrientes características y diagramas de radiación. Se observó que el coeficiente de transmisión se deterioraba cuando las antenas eran trasladadas, lo que evidenció la importancia de una colocación estratégica.

En el documento citado [7], titulado “Estudio y evaluación del rendimiento de las técnicas MIMO y BEAMFLEX para diseño de una red inalámbrica para el campus norte de la Universidad Nacional de Chimborazo”, se expone evaluar el rendimiento de las tecnologías inalámbricas MIMO y BeamFlex implementadas en los campus Norte y La Dolorosa de la Universidad Nacional de Chimborazo, respectivamente. Se analizaron datos reales proporcionados por la universidad, enfocándose en tres parámetros clave: canal, cliente y ruido, tomados durante horas pico desde los puntos de acceso. Los resultados revelan que MIMO ofrece un mejor rendimiento en términos de eficiencia espectral y consumo de energía, lo que respalda su recomendación para futuras implementaciones en nuevas edificaciones del campus Norte, con el objetivo de garantizar una red inalámbrica más estable, segura y eficiente para los usuarios móviles y fijos.

De manera similar el artículo [8], aborda la necesidad de satisfacer la creciente demanda de usuarios, mayores tasas de datos y estrictos requerimientos de calidad de servicio (QoS) en

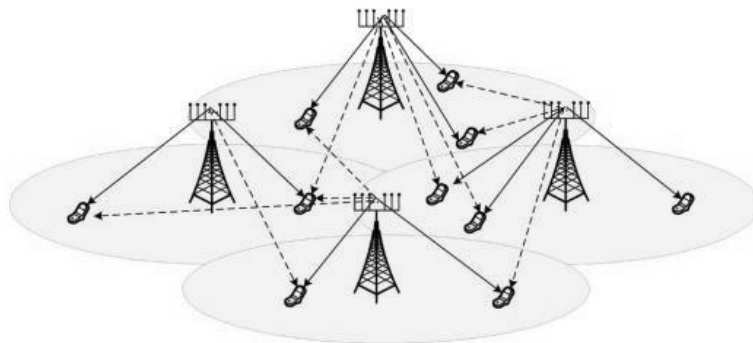
las redes más allá de la quinta generación (B5G), proponiendo un nuevo marco estructurado para el acceso masivo escalable en sistemas cell-free massive MIMO, donde múltiples puntos de acceso cooperan para atender a los usuarios mediante procesamiento coherente. La propuesta incluye un algoritmo de acceso inicial, una estrategia de decodificación de desvanecimiento a gran escala parcial (P-LSFD), dos esquemas de asignación de pilotos y una política de control de potencia fraccional. Se derivan expresiones cerradas para la eficiencia espectral (SE) usando técnicas de combinación MR y LP-MMSE, demostrando mediante simulaciones que el marco mejora significativamente el rendimiento frente a esquemas convencionales, logra escalabilidad con mínima pérdida de eficiencia y permite un balance controlado entre equidad entre usuarios y rendimiento promedio.

En el estudio reportado [9], se expone que la investigación en canales MIMO, tanto para usuarios únicos como múltiples, se ha centrado principalmente en dos problemas de optimización uno es maximizar la capacidad del sistema y el control de potencia. En el caso de MIMO multiusuario (MU-MIMO), uno de los principales desafíos es eliminar la interferencia entre canales para lo cual se utiliza la técnica de diagonalización por bloques, un método de pre-codificación lineal basado en proyecciones ortogonales.

## 2.2. Términos y Definiciones

### 2.2.1. Sistema Cell-free

Cell-free es una arquitectura de red inalámbrica avanzada que representa un salto significativo respecto a las redes celulares convencionales. A diferencia de estas, elimina las celdas tradicionales y distribuye las antenas de manera descentralizada a lo largo de toda la red. En las redes celulares clásicas, las antenas están organizadas en celdas específicas, cada una con una estación base centralizada que gestiona la comunicación en su área. En cambio, el enfoque cell-free coloca las antenas de forma distribuida, sin las limitaciones impuestas por las celdas, permitiendo que todos los puntos de la red cooperen activamente en la transmisión de datos como se puede visualizar en la Figura 1. Esto ofrece una mayor flexibilidad, escalabilidad y uniformidad en la conectividad, optimizando el rendimiento y la cobertura en entornos de alta densidad [4].

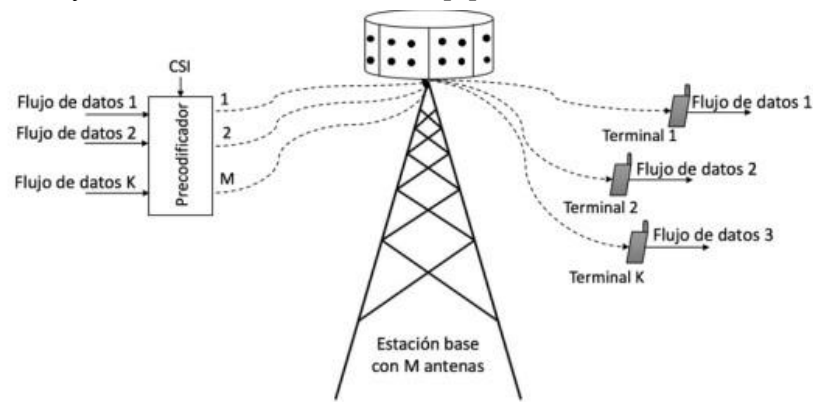


**Figura 1:** Sistema Massive MIMO celular.

**Fuente:**[11]

### 2.2.2. Transmisión de datos en enlace descendente

En el enlace descendente los Sitios Celulares (*Cell Sites*, C) están conformados por uno o varios puntos de acceso que transmite señales utilizando una matriz de antenas múltiples, mientras cada terminal móvil está equipado con una única antena recibe las señales correspondientes. En este caso, los sitios celulares emplean técnicas avanzadas de precodificación para optimizar la transmisión de datos y minimizar las interferencias entre los terminales. A diferencia del enlace ascendente, en el enlace descendente que se observa en la Figura 2 se requiere diseñar estrategias de precodificación que aprovechen las características del canal para cada usuario, permitiendo una transmisión eficiente en un entorno de múltiples usuarios. Estas estrategias no solo ayudan a reducir la interferencia entre usuarios, sino que también maximizan la relación señal a interferencia y ruido (SINR) en cada terminal. Este enfoque es crucial para garantizar un rendimiento óptimo del sistema en escenarios densos y con alta demanda de datos [5].



**Figura 2:** Topología de comunicación para un Enlace Descendente.

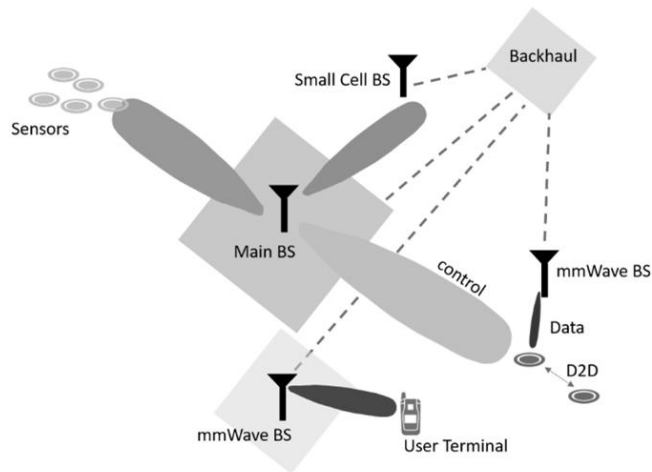
**Fuente:**[12]

### 2.2.3 Modelo de Canal en la Banda Milimétrica para Cell-Free Massive MIMO

Las redes celulares no podrían manejar conexiones tan grandes ya que los terminales de usuario en el límite de la celda sufren interferencias muy altas y, por lo tanto, su rendimiento es deficiente. Además, los sistemas celulares convencionales están diseñados principalmente para usuarios humanos. En las redes inalámbricas del futuro, se espera que las comunicaciones de tipo máquina como Internet de las cosas, Internet de todo, Smart X, etc. desempeñen un papel importante [12].

### 2.2.4 Arquitectura centrada en el dispositivo

Este enfoque tradicional, también conocido como arquitectura centrada en el dispositivo, implica que cada usuario está vinculado a una celda fija, lo que genera una mayor interferencia intercelda y una cobertura no uniforme, especialmente en escenarios densos. A medida que aumenta el número de usuarios y se incrementa la densidad de estaciones base, este modelo se vuelve menos eficiente, requiriendo cambios importantes para redes 5G y posteriores. La incorporación de bandas milimétricas, que presentan características de propagación muy distintas, agrava aún más estos desafíos, en la Figura 3 se muestra un dispositivo de usuario que se comunica intercambiando información a través de varios nodos [13].



**Figura 3:** Arquitectura centrada hacia un dispositivo.

**Fuente:**[13]

### 2.2.5 Principios de la Banda Milimétrica

El nombre de esta tecnología asociada a las comunicaciones 5G puede parecer un poco desconcertante, pero, en realidad, tiene su origen en una característica de las ondas que se encargan de transportar los datos: la frecuencia. A medida que este parámetro se incrementa podemos alcanzar mayores velocidades de transferencia, pero esta mejora tiene un precio: cuanto más alta es la frecuencia menor es su capacidad de penetración [14].

### 2.2.6 Tecnología MU-MIMO

Más allá de permitir el envío de datos de forma simultánea a varios clientes inalámbricos, también hay que indicar que aprovecha el ancho de banda al máximo. De esta forma los clientes consiguen la máxima velocidad y es algo imprescindible para utilizar determinadas aplicaciones y servicios como pueden ser las videollamadas o jugar por Internet. En definitiva, el MU-MIMO mejora a la tecnología MIMO ya que admite múltiples usuarios simultáneos (hasta 4 actualmente). En ambos casos, estamos ante una mejora de la red inalámbrica, algo tan importante hoy en día al utilizar muchos dispositivos conectados a la red sin necesidad de utilizar cables [6].

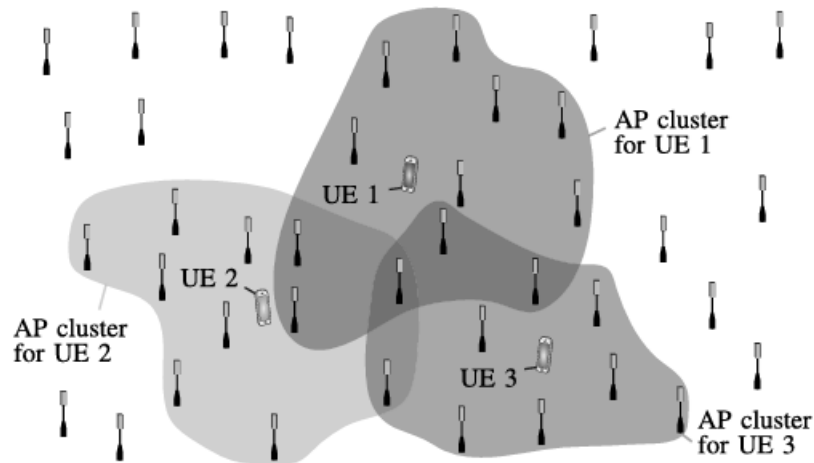
### 2.2.7 Eficiencia Espectral en CF-mMIMO

La Eficiencia Espectral (*Spectral Efficiency*, SE) se mide en bit por segundo por Hertz (bit/s/Hz) y es una métrica fundamental en el diseño y evaluación de sistemas de comunicaciones inalámbricas, ya que cuantifica la cantidad de información que puede transmitirse en un BW determinado. En redes CF-mMIMO, la SE se optimiza mediante técnicas avanzadas de procesamiento de señales, como la formación de haces (*beamforming*), que permiten maximizar la tasa de datos mientras se minimiza la interferencia entre U. Estas técnicas buscan mejorar la capacidad del sistema para transmitir más datos en el mismo espectro, lo que es crucial en entornos con alta densidad de U y recursos limitados [14].

### 2.2.8 Transmisión del enlace de bajada (Downlink)

En esta fase, los sitios celulares transmiten datos a las diferentes estaciones móviles del sistema. Para poder transmitir los datos correctamente a cada usuario, los C utilizan las estimaciones de las canales calculadas a partir de las secuencias de pilotos transmitidas por

los usuarios en la fase anterior como si fueran los canales de propagación reales. Mediante diferentes técnicas de procesamiento de señal, los C consiguen que cada usuario reciba y pueda recuperar los datos que se le envían como se puede evidenciar en la Figura 4. En este TFG la técnica de procesamiento de señal utilizada es el beamforming conjugado. Esta técnica de precodificación se basa en multiplicar los símbolos a transmitir a cada usuario por el valor complejo conjugado de la estimación del canal de dicho usuario [11].



**Figura 4:** Ejemplo de agrupaciones de cooperación dinámica en una red sin células con un gran número de sitios celulares.

**Fuente:**[11]

### 2.2.9 Modelo de comunicación Downlink

Este modelo utiliza el esquema escalable P-MMSE que se caracteriza por una arquitectura distribuida, en la cual cada punto de acceso (C) realiza la precodificación localmente, basándose únicamente en la información de canal de los usuarios que atiende. Esto permite que cada AP sirva únicamente a los usuarios más cercanos o con mejores condiciones de canal, reduciendo así la necesidad de coordinación global. Gracias a esta organización, el sistema logra maximizar el rendimiento con un procesamiento centralizado mínimo, lo cual es fundamental para su viabilidad en redes densas. Un aspecto importante es poder diferenciar cuál es el esquema más ligero computacionalmente, y por tanto más escalable en redes grandes del coste computacional expresado en términos del número de multiplicaciones complejas que deben realizarse para procesar los datos de un usuario [1].

En la tabla 1 se presenta, la estimación del canal y la combinación de cálculo vectorial varían según el esquema empleado:

**Tabla 1.** Estimación del esfuerzo computacional requerido, en términos de multiplicaciones complejas, para atender a un usuario típico bajo diversos métodos de combinación durante un bloque de coherencia.

**Fuente:** [1]

Esquema de Precodificación	Estimación del Canal	Combinación de cálculo vectorial
P-MMSE	$(A_{\mathcal{T}p} + A^2)P_u M_u $	$\frac{(A M_u )^2 + A M_u }{2}P_u + (A M_u )^2 + \frac{(A M_u )^3 - A M_u }{3}$

Donde:

$A$ : Número total de antenas por Sitio Celular (C)

$U$ : Número total de Usuarios en el sistema

$M_u$ : Conjunto de Sitios Celulares (C) que sirven al Usuario  $u$

$|M_u|$ : Representa la cardinalidad (número de C en el conjunto  $M_u$ )

$P_u$ : Potencia de transmisión asignada al Usuario  $u$

La importancia de esta tabla radica en que proporciona una base cuantitativa para evaluar la viabilidad práctica y, especialmente, la escalabilidad de cada técnica. En sistemas con un gran número de usuarios, la elección de un esquema de combinación con baja complejidad resulta fundamental para asegurar un funcionamiento eficiente sin comprometer el rendimiento del sistema.

### 2.2.10 Precoding escalable P-MMSE para el downlink

El vector de transmisión del Sitio Celular  $c$  está dado por:

$$x_c = \sum_{u=1}^u W_{c,u} \zeta u \quad (1)$$

donde:

- $\zeta u$  es la señal de datos para el usuario  $u$ , tal que  $\mathbb{E}\{|\zeta u|^2\} = \rho_u^{\text{DL}}$
- $W_{c,u} \in \mathbb{C}^N$  es el vector de precodificación aplicado por el AP  $\ell$  hacia el usuario  $u$ .

### 2.2.11 Ecuación general del P-MMSE escalable

La expresión para el vector de precodificación escalable P-MMSE es:

$$W_{c,u} = \sqrt{\frac{\rho_{c,u}^{\text{DL}}}{\mathbb{E}\{|V_{c,u}|^2\}}} V_{c,u} \quad (2)$$



donde:

$$V_{c,u} = \left( \sum_{i \in \rho u} \hat{h}_{c,u} \hat{h}_{c,u}^H + \sigma^2 I_N \right)^{-1} \hat{h}_{c,u} \quad (3)$$

- $\hat{h}_{c,u}$  es la estimación del canal entre el sitio celular  $c$  y el usuario  $u$ ,
- $\rho u$  es el conjunto de Usuarios que comparten el mismo piloto que  $u$ ,
- $\sigma^2$  es la varianza del ruido.

#### 2.2.12 Spectral Efficiency en el downlink con P-MMSE

La expresión de eficiencia espectral para el usuario, bajo el esquema P-MMSE escalable es:

$$SE_u = \left( 1 - \frac{\tau_p}{\tau_c} \right) \log_2(1 + SINR_u^{DL}) \quad (4)$$

donde:

- $\tau_p$  longitud del piloto,
- $\tau_c$  longitud del bloque de coherencia,
- $SINR_u^{DL}$  razón señal a interferencia + ruido efectivo para el downlink (calculada con base en los vectores  $Wc, u$ ).

#### 2.2.14 Estructura general del sistema Cell-Free Massive MIMO

A diferencia de las redes neuronales convencionales que cada usuario depende de una sola estación base para este tipo de sistema todos los sitios celulares trabajan de manera cooperativa logrando atender usuarios de manera simultánea. Esto elimina los límites de celdas tradicionales y permite una cobertura más uniforme, mayor fiabilidad mejorando la eficiencia espectral cualidades importantes en frecuencias milimétricas de (30–300 GHz), las señales electromagnéticas presentan mayor atenuación, dispersión y sensibilidad al bloqueo que en las bandas sub-6 GHz [28].

#### 2.2.15 Estrategias de clústeres para el downlink en sistemas Cell-Free Massive MIMO

En el enlace descendente, los sitios celulares transmiten activamente, por lo que resulta necesario asignar una determinada cantidad específica de potencia de transmisión a cada

uno. Al realizar esta asignación de potencia se complica cuando los clústeres de cooperación se solapan, es decir, cuando un mismo  $C$  pertenece a más de un conjunto de CPU o región de coordinación. En tales casos, las CPU involucradas deben cooperar estrechamente en la gestión de recursos, lo que puede reducir la escalabilidad del sistema y aumentar la complejidad de procesamiento [29].

#### **2.2.16 Comparación entre sistemas centralizados y distribuidos en Massive MIMO**

En los sistemas centralizados una única estación base equipada con un conjunto compacto de antenas es la encargada de atender a todos los usuarios dentro de su área de cobertura. Al estar las antenas muy próximas entre sí, las señales que reciben o transmiten suelen estar altamente correlacionadas si el canal presenta degradaciones hacia un usuario, es probable que afecte a gran parte del arreglo.

Por el contrario, en los sistemas distribuidos o cell-free, las antenas se ubican en distintos puntos del entorno y se coordinan entre sí para servir de forma conjunta a los usuarios.

Esta distribución espacial mejora la cobertura, reduce la interferencia y proporciona una eficiencia espectral más uniforme en el enlace descendente [30].

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Tipo de Investigación

Esta investigación se clasifica como investigación aplicada, ya que se fundamenta en la utilización de los conocimientos adquiridos durante la formación académica para diseñar y evaluar un sistema de comunicación cell-free massive MIMO orientado a la transmisión de datos en el enlace descendente. El objetivo principal del proyecto fue desarrollar y evaluar la eficiencia espectral de un sistema de comunicación cell-free massive MIMO para la transmisión de datos en el enlace descendente. Para lograrlo, se implementaron diversas metodologías de investigación en el diseño como en el análisis tomando en cuenta distintos escenarios de propagación lo que permitió una evaluación exhaustiva del rendimiento en condiciones realistas.

##### 3.1.1 Investigación Bibliográfica

La base teórica de este estudio se construyó a partir del análisis de fuentes científicas confiables, incluyendo revistas especializadas como IEEE, Scopus, Springer y Wiley, así como libros, artículos académicos y bases de datos pertenecientes a distintos repositorios académicos. La elección de estas fuentes se realizó considerando su pertinencia con el tema investigado, priorizando publicaciones con una antigüedad no mayor a cinco años. Esta decisión se tomó con el objetivo de asegurar tanto la validez como la actualidad de la información, así como la solidez de los marcos teóricos empleados.

##### 3.1.2 Investigación Aplicada

Esta investigación se clasifica como investigación aplicada, ya que se fundamenta en la utilización de los conocimientos adquiridos durante la formación académica para diseñar y evaluar un sistema de comunicación cell-free massive MIMO orientado a la transmisión de datos en el enlace descendente.

##### 3.1.3 Investigación de Exploratoria

El enfoque de investigación exploratoria resulta adecuado para examinar fenómenos que aún no han sido ampliamente estudiados, proporcionando una comprensión inicial que puede guiar estudios posteriores. En el contexto de esta tesis, este método fue particularmente valioso para abordar y analizar temas emergentes vinculados a los sistemas Cell-Free Massive MIMO.

#### 3.2 Diseño de Investigación

Al tratarse de un entorno de comunicaciones inalámbricas, el experimento se lleva a cabo mediante simulaciones computacionales que replican el comportamiento real del canal mmWave, la distribución de puntos de acceso, y las técnicas de precodificación y beamforming. En este contexto, las variables independientes incluyen parámetros como topología de red, mientras que la variable dependiente principal es la eficiencia espectral del sistema. Como se puede observar en la Figura 3 el proceso jerárquico concernientes a las fases de ejecución, la investigación se desarrolló bajo un enfoque deductivo, partiendo de modelos teóricos existentes para luego evaluarlos y optimizarlos mediante herramientas de

simulación como MATLAB. Este diseño permite validar propuestas de mejora en el rendimiento del sistema, contribuyendo al avance de las comunicaciones inalámbricas en entornos de alta densidad y frecuencias elevadas como las bandas milimétricas.

### 3.3 Métodos y técnicas de investigación

#### 3.3.1 Método Científico

El método científico se utilizó con el objetivo de identificar y analizar las relaciones entre distintos fenómenos y eventos, permitiendo así la generación de criterios fundamentados y comprobables sobre el tema investigado. En este proyecto, dicho enfoque facilitó la construcción de un modelo analítico sólido, así como la definición de estrategias para evaluar el efecto de modificar ciertos parámetros. El estudio se desarrolló mediante simulaciones en distintos escenarios, donde se implementaron diversas configuraciones de topologías de red con el fin de reproducir condiciones cercanas a la realidad. Estas configuraciones no solo permitieron validar los resultados obtenidos, sino también formular conclusiones consistentes que aportan al proceso de diseño.

#### 3.3.2 Técnica de Recolección de Datos

En el desarrollo de esta investigación, se aplicó la técnica de observación para analizar el comportamiento en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica, se utilizó un modelo de simulación que permite para mejorar la eficiencia espectral.

La implementación del código de programación permitió simular varias condiciones en las que se analizaron parámetros en los que se incluyen la topología de red para poder mejorar la eficiencia espectral, con esto fue clave para dar cumplimiento a los objetivos planteados al inicio de este estudio, aportando resultados confiables que respaldan el diseño y la optimización del sistema.

#### 3.3.3 Instrumentos de Recolección de Datos

En la Tabla 2 se detallan los instrumentos y recursos metodológicos empleados para obtener la información necesaria para el desarrollo del presente estudio.

**Tabla 2.** Herramientas e instrumentos para la Recolección de Datos.

**Fuente:** Autor

INSTRUMENTOS	DESCRIPCIÓN
Artículos Científicos	Estudio sobre mejoras en redes de acceso radio (RAN) para sistemas masivos de comunicación inalámbrica, como CF-mMIMO
	Análisis del rendimiento de sistemas Cell-Free Massive MIMO en escenarios con múltiples usuarios y alta densidad.
	Estudios sobre esquemas de combinación y su impacto en sistemas Cell-Free Massive MIMO
Software Matlab	Herramienta para la implementación del modelo de simulación del sistema CF-mMIMO, incluyendo el cálculo

### 3.3.4 Escenario de simulación: Estadio (DL en banda milimétrica)

Para evitar análisis puramente sintéticos y dotar de validez externa al diseño y evaluación del enlace descendente en CF-mMIMO sobre banda milimétrica, se adoptó como caso de estudio el escenario de un estadio: un recinto de gran aforo ( $\approx 85\,000$  asientos) con un despliegue estimado de más de 1200 sitios celulares Wi-Fi 6, en línea con el proyecto del Estadio Santiago Bernabéu reportado por Cisco–Real Madrid [31]. Es importante señalar que este valor se emplea únicamente como referencia contextual para representar un entorno hiperdenso real, y no como parámetro directo de la simulación.

En consonancia con la literatura especializada, los estudios de Cell-Free Massive MIMO trabajan con modelos escalados del entorno real con el fin de mantener manejable la complejidad computacional y centrarse en las relaciones clave entre infraestructura y usuarios. Por ejemplo, en [33] se evalúan escenarios con 400 sitios celulares y solo 20 usuarios, demostrando que la validez del análisis no depende del número absoluto de puntos de acceso, sino de la estructura distribuida del sistema, mientras que la simulación utiliza un conjunto reducido y controlado de variables experimentales: C (sitios celulares), A (antenas por sitio) y U (usuarios activos), sobre las cuales se realizan los respectivos barridos para analizar el comportamiento del precodificador P-MMSE y su impacto en la eficiencia espectral bajo condiciones de alta densidad.

**Tabla 3.** Configuración del entorno de simulación: estadio (C, A, U y canal).

**Fuente:** Autor

Parámetro	Valor base	Justificación
Sitios Celulares	25-150	Representación de uno o varios puntos de acceso.
Área de simulación	1 km <sup>2</sup>	Representación de simulación.
Antenas	4-32	Representación de las Antenas.
Usuarios	10-500	Representación de la carga de Usuarios.
Precoder	P-MMSE (cell-free)	Objetivo del estudio.
Coherencia/pilotos	( $\tau_c=200$ ), ( $\tau_p=10$ )	Consistente con simulación.
Barridos	(C, A, U)	Diseño experimental del análisis.

Como referencia para el dimensionamiento, se consideró la densificación de small cells en 4G–5G, que para 2020 ubicaba rangos de 100–350 células/km<sup>2</sup> en zonas urbanas densas y clasificaba como hiperdenso cualquier valor  $>150$  células/km<sup>2</sup>. Con 5G, el acceso a frecuencias altas (microondas y mmWave,  $>20$  GHz) abre capacidad adicional, pero la limitación de cobertura obliga a desplegar muchas small cells en interior y exterior, incrementando la capacidad a cambio de mayores requisitos de sitios, potencia y backhaul [32]. Cabe aclarar que esta guía se usó únicamente para contextualizar y validar ensayos exploratorios; no definió parámetros ni resultados finales, evitando confusiones. Este marco respalda la elección de un estadio como escenario principal y la evaluación del precodificador P-MMSE para mejorar la eficiencia espectral en CF-mMIMO sobre mmWave.

### 3.4 Población

En este tipo de investigación de carácter experimental basada en simulaciones, el tamaño de la muestra no se determina por la cantidad de sujetos observados, sino por el número de escenarios de simulación considerados. En el caso de las variables, particularmente la variable independiente correspondiente a la topología de red, se pueden evaluar diferentes configuraciones. A cada una de estas configuraciones se le puede asociar un número específico de usuarios, con el fin de analizar el impacto sobre la variable dependiente. Esto permite establecer una relación entre la cantidad de usuarios y la topología empleada, facilitando el análisis de rendimiento y comportamiento del sistema bajo distintos escenarios, a su vez estas simulaciones producen valores de eficiencia espectral que constituyen la variable de interés central en el análisis de rendimiento.

### 3.5 Operacionalización de variables

#### 3.5.1 Variable independiente

La topología de la red describe su composición, incluyendo la disposición de los nodos y las líneas de conexión, así como los algoritmos aplicados para la formación de haces.

#### 3.5.2 Variable dependiente

La eficiencia espectral del sistema de comunicación en un enlace descendente.

La tabla 4 muestra un resumen detallado de las variables de investigación seleccionadas para este proyecto, así como los indicadores, métodos y los instrumentos de medición que se ocuparán en el proceso de análisis.

**Tabla 4.** Variables de investigación

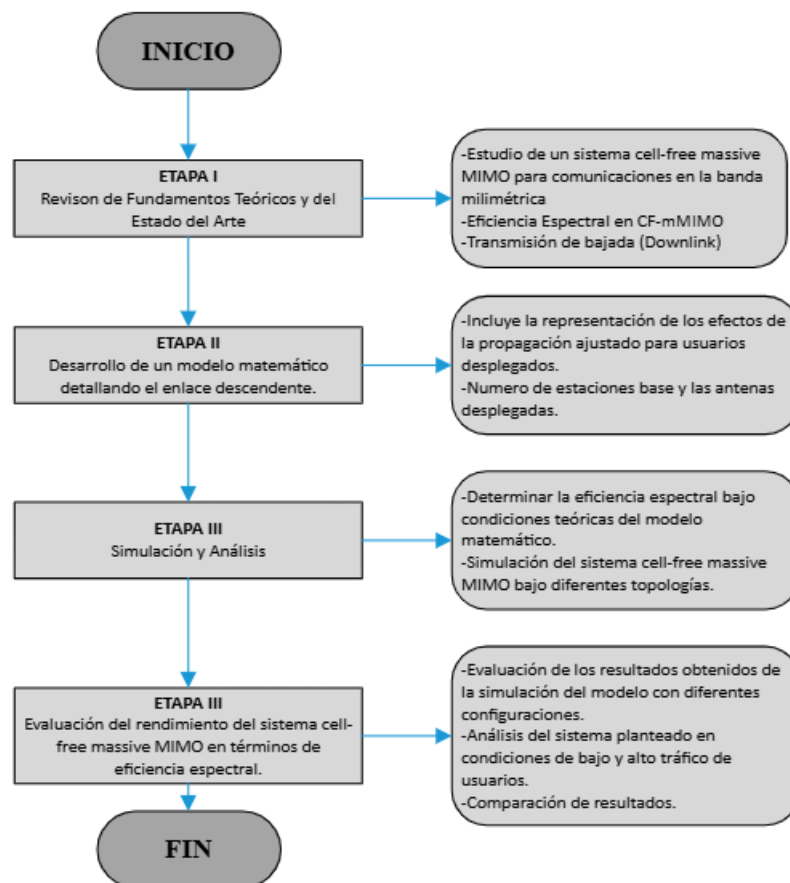
*Fuente:* Autor

Variables	Descripción	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Independiente			Observación directa a través de un modelo de simulación del mecanismo de eficiencia espectral en el enlace de subida (Matlab)
Topología de red	<ul style="list-style-type: none"><li>- Composición de red: nodos, conexiones, dispositivos, estaciones base y antenas.</li><li>- Algoritmos aplicados para la formación de haces</li><li>- Costo de implementación en recursos necesarios para instalar y operar el sistema.</li><li>- Modelos de atenuación y efecto del canal.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Número de Usuarios desplegados (U)</li><li>- Número de Antenas por Sitios Celulares (A)</li><li>- Número de Sitios Celulares (C)</li></ul>	
Dependiente			

<b>Eficiencia espectral</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de datos que el sistema puede transmitir de manera eficiente en un ancho de banda específico.</li> <li>- Área efectivamente cubierta por las antenas.</li> <li>- Rendimiento del sistema en comparación entre modelos teóricos, simulaciones y prototipos experimentales.</li> </ul>	<p>La eficiencia espectral se mide en bits por segundo por hercio (bit/s/Hz).</p>	
-----------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	--

### 3.6 Procedimiento y Análisis.

Con base en los criterios definidos en el marco teórico, los objetivos y el enfoque metodológico de la investigación, se realiza un análisis exhaustivo de los datos generados mediante las simulaciones del sistema, que serán procesados y analizados utilizando software estadístico y herramientas de simulación, se establecen cuatro etapas (Figura 5) como se detalla a continuación:



**Figura 5.** Diagrama de flujo del desarrollo del proyecto de Investigación.

**Fuente:** Autor

**ETAPA I.** Se llevó a cabo un análisis exhaustivo del estado del arte en sistemas de comunicación Cell-Free Massive MIMO, con especial atención a la optimización de la eficiencia espectral en la transmisión de datos en el enlace descendente. Esta revisión incluyó el estudio del fundamento teórico que sustenta este tipo de sistemas, así como una comparación con tecnologías similares, el análisis de arquitecturas de red distribuidas y la evaluación de estrategias de procesamiento cooperativo. Además, se revisaron trabajos relevantes de diversos autores que han contribuido significativamente al desarrollo de esta área. También se estudió algoritmos avanzados de estimación y detección, destacándose el estimador P-MMSE, el cual se utilizó como método robusto para mitigar la interferencia y mejorar el rendimiento en entornos distribuidos. Este enfoque constituye el objetivo central del presente proyecto.

**ETAPA II.** En esta etapa se desarrolló el modelo de simulación utilizando la herramienta del software MATLAB para una red Cell-Free Massive MIMO. El modelo incorporó elementos fundamentales, como la presencia de múltiples estaciones de servicio, cada una equipada con varias antenas, así como una cantidad definida de usuarios. Las CSs fueron distribuidas aleatoriamente dentro de un área geográfica de cobertura, siguiendo el esquema de despliegue característico de las redes cell-free. Además, se incluyeron aspectos clave del canal inalámbrico, tales como el desvanecimiento plano tipo Rayleigh, la pérdida por trayecto (pathloss) y las variaciones debidas a la distancia entre transmisores y receptores.

**ETAPA III.** Aquí en esta etapa, la eficiencia espectral (SE) fue evaluada considerando diversas topologías y configuraciones de red. Se incorporaron técnicas de precodificación y detección lineal, destacando el uso del esquema P-MMSE, cuyo impacto fue analizado frente a distintos niveles de correlación del canal. La simulación permitió examinar el efecto del número de estaciones distribuidas (C), la cantidad de antenas por Sitios Celulares y la densidad de usuarios (U), evidenciando mejoras en la SE como resultado del procesamiento distribuido y la cooperación entre C.

**ETAPA IV.** Se evaluó el rendimiento del enlace descendente en la red Cell-Free Massive MIMO a través de un análisis estadístico de la eficiencia espectral (SE). Se trabajó con configuraciones que mantenían constante el número de usuarios (U), pero variaban en la cantidad de estaciones cooperativas (C) y el número de antenas por usuario. Para comprobar si los cambios observados en la SE estaban relacionados de manera significativa con la arquitectura del sistema, se aplicaron pruebas estadísticas paramétricas como el análisis de varianza (ANOVA), sustentadas en la verificación previa de la normalidad de los datos. Además, se llevaron a cabo análisis post-hoc, específicamente la prueba de Tukey, que permitieron comparar entre pares distintas configuraciones de red y determinar cuáles optimizaban mejor la eficiencia espectral. Finalmente se observó que incrementar el número de antenas por estación resulta más beneficioso para el rendimiento del sistema que simplemente añadir más estaciones cooperativas.



### 3.6.2 Parámetros de configuración del algoritmo

Una vez definidas las ecuaciones para la presente simulación, se continúa a crear el algoritmo en el software Matlab. En esta etapa, se establecen las variables del escenario y se asignan los parámetros fundamentales para la simulación. Como se muestra en la Tabla 5, la configuración del sistema se define de manera dinámica, permitiendo ajustar el número de Usuarios ( $U$ ), Sitios Celulares ( $C$ ) y Antenas por Sitios Celulares ( $A$ ). Además, se consideran los parámetros del canal de propagación y las condiciones del entorno para el sistema CF-mMIMO. De esta manera se obtiene una simulación realista que refleje el comportamiento del sistema en escenarios prácticos.

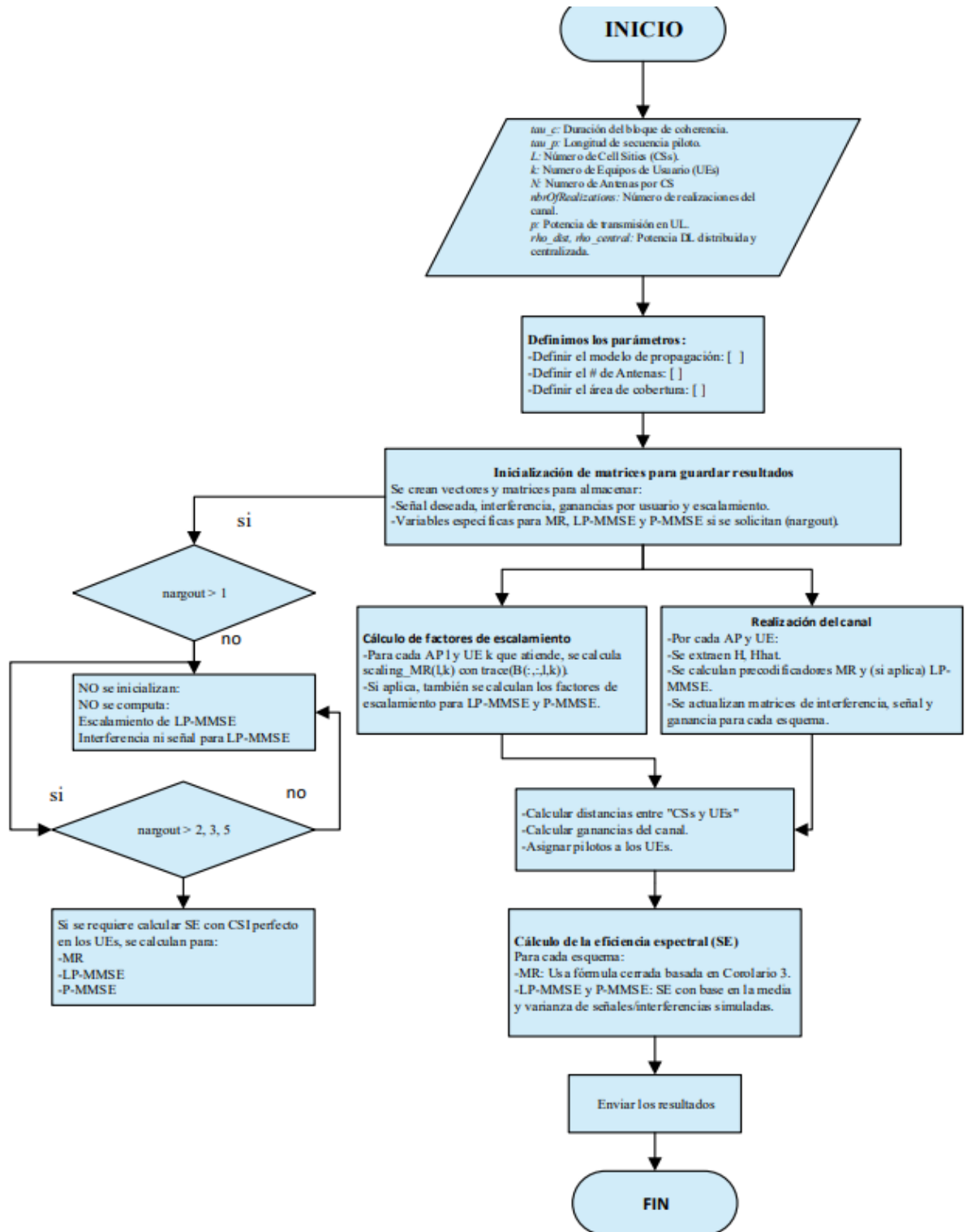
**Tabla 5.** Parámetros predeterminados de la simulación para el sistema CF-mMIMO.

*Fuente: Autor*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Eficiencia Espectral	SE	—	bit/s/Hz	Variable dependiente del estudio; se calcula en cada escenario de simulación según C, A y U.
Área de simulación	—	$1 \times 1$ km (cuadrado)	km <sup>2</sup>	areaSide = 1000 m, modo square1km.
Sitios celulares	(C)	25,50,75,100,150	—	Número total de cell-sites (fijo).
Antenas por AP	(A)	4,8,16,32	—	Arreglo por cell-site (fijo).
Usuarios activos	(U)	10:10:500	—	Barrido de 10 a 500 en pasos de 10.
Ancho de banda	$BW$	20	MHz	Ancho de banda de comunicación.
Figura de ruido	$NF$	7	dB	Figura de ruido del sistema.
Exponente de pérdida	$\alpha$	3.76	—	Exponente de pérdida de trayectoria.
Umbral de servicio	$Threshold$	-40	dB	Umbral para que un Cell-Site no maestro sirva a un UE.
Bloque de coherencia	$\tau_c$	200	—	Longitud del bloque.
Pilotos	$\tau_p$	20	—	Longitud de secuencias piloto.
Potencia DL por AP	$p$	200	mW	Potencia disponible por cada AP (constante).
Conjuntos aleatorios	—	10	—	nbrOfSetups (posiciones de C/U).
Realizaciones de canal	—	10	—	nbrOfRealizations.
Precodificador	—	P-MMSE	—	Enlace descendente.

Métrica de salida	—	$SE(\{P05\})$	bit/s/Hz	Percentil 5 (garantía 95 % de UEs).
-------------------	---	---------------	----------	-------------------------------------

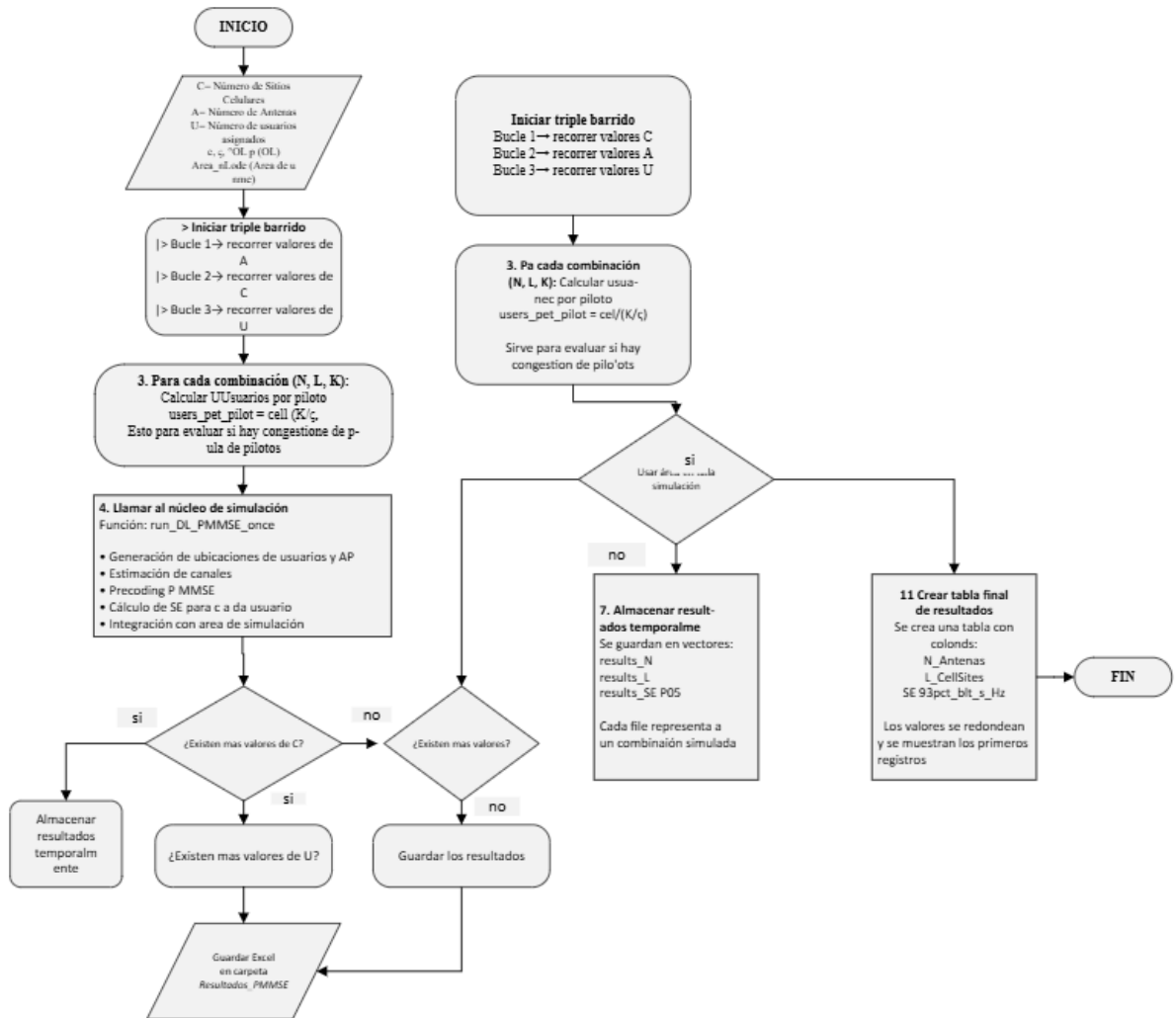
### 3.6.3 Estructura de Programación para la simulación CF-mMIMO en DL



**Figura 6.** Diagrama de flujo principal sobre la estructura del algoritmo para un sistema CF-mMIMO de un enlace descendente.

**Fuente:** Autor

A continuación se presenta el funcionamiento del algoritmo que se utilizó para desarrollar las simulaciones en un sistema CF-mMIMO de un enlace descendente como se observa en la Figura 7, el script generó automáticamente cada escenario, estimó los canales, aplicó el precodificador P-MMSE, calculó la eficiencia espectral garantizada al 95 % de los usuarios. En conjunto, este código constituyó el núcleo computacional que hizo posible evaluar el impacto de la infraestructura y la carga del sistema sobre la eficiencia espectral, proporcionando la base cuantitativa para el análisis comparativo, la validación experimental y las conclusiones obtenidas en la investigación.



**Figura 7.** Flujograma del Algoritmo de Simulación del Enlace DL con Precoding P-MMSE.

Fuente: Autor

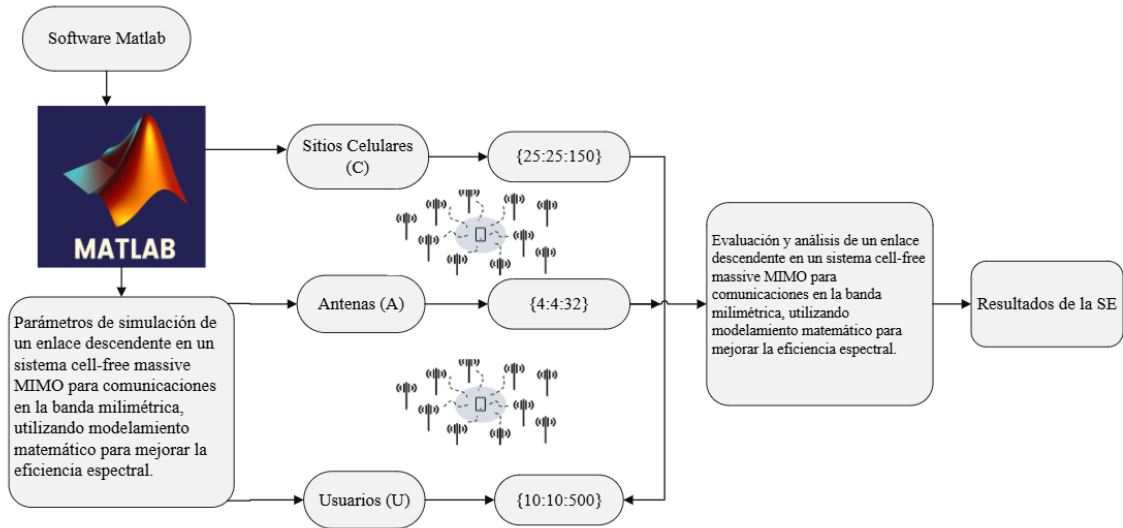
## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados y análisis

Este análisis va a determinar cómo varía la eficiencia espectral (SE) del sistema en función de distintos factores clave de diseño de una red Cell-Free Massive MIMO. Al evaluar la SE según la configuración de la topología de red, se busca identificar qué estructuras (distribución y número de sitios celulares) ofrecen un mejor aprovechamiento del espectro en diferentes escenarios geográficos. Analizando la SE frente al número de antenas por Sitios Celulares, se estudia el impacto de la densificación de antenas en la capacidad del sistema, revelando el punto óptimo entre rendimiento y complejidad. Finalmente, al observar la SE en función del número de usuarios, se evalúa la escalabilidad del sistema.

Con el objetivo de valorar el rendimiento del sistema, el estudio se dividió en tres parámetros relacionados con la configuración de la topología de red, que constituye la variable de estudio ( $U, A, C$ ) como se muestran en la Figura 8:



**Figura 8.** Diagrama del proceso de simulación y parámetros del sistema CF-mMIMO para los resultados de la SE

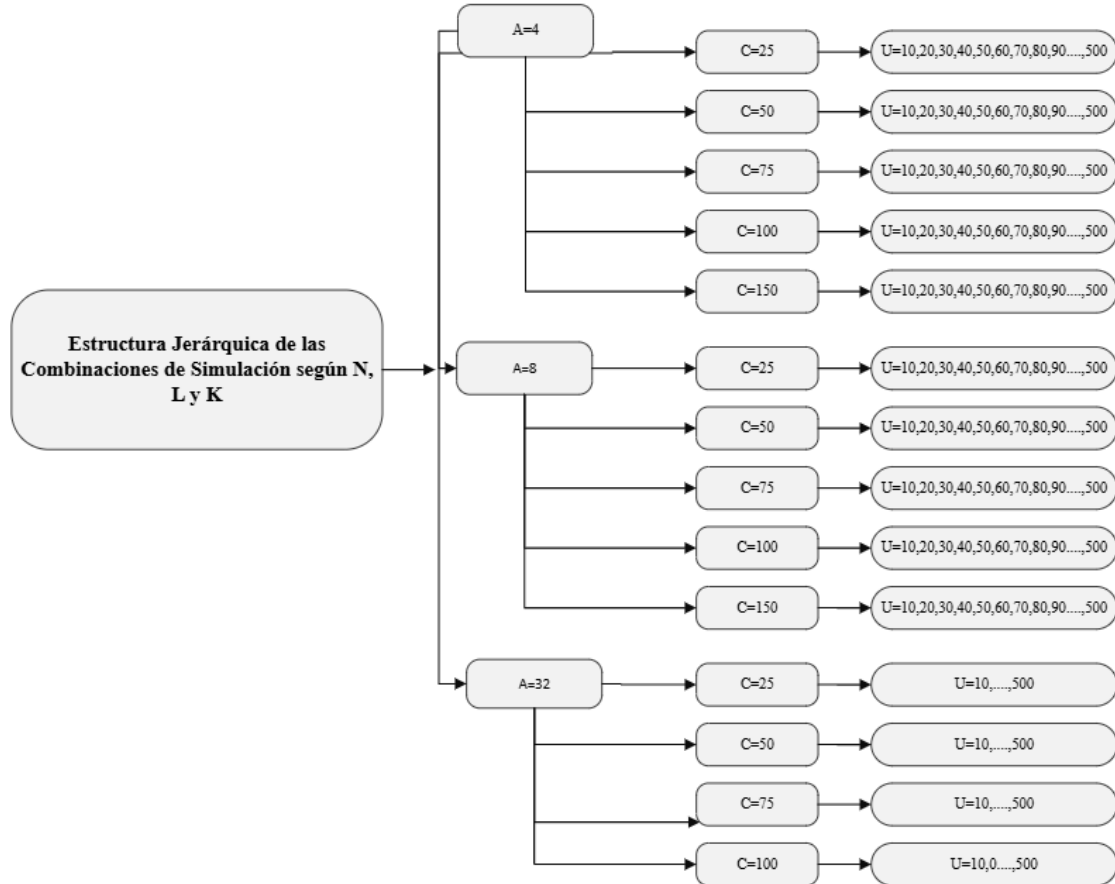
**Fuente:** Autor

- Resultados y análisis de la SE en función del número de Sitios Celulares ( $C$ )
- Resultados y análisis de la SE en función del número de Antenas por Sitios Celulares ( $A$ )

#### 4.1.2 Resultados y análisis de la SE en función del número de Sitios Celulares ( $C$ )

Como parte del análisis del rendimiento en el enlace descendente de una red Cell-Free Massive MIMO compuesta por puntos de acceso y usuarios distribuidos aleatoriamente en

un área de servicio. Emplea modelos de canal realistas con desvanecimiento correlacionado y pérdida por trayectoria para generar y estimar los canales mediante el método P-MMSE, asumiendo reciprocidad en un sistema TDD. En la Figura 9 se representa la organización jerárquica de todos los escenarios de simulación ejecutados para analizar el comportamiento de la eficiencia espectral (SE) variando tres parámetros fundamentales del sistema: el número de antenas por AP (A), el número de sitios celulares (C) y la cantidad de usuarios atendidos (U). El proceso se desarrolla de manera escalonada, iniciando con la selección de un valor de A; posteriormente, para cada A se evalúan distintos valores de C, y dentro de cada configuración de C se simulan diferentes niveles de usuarios U.



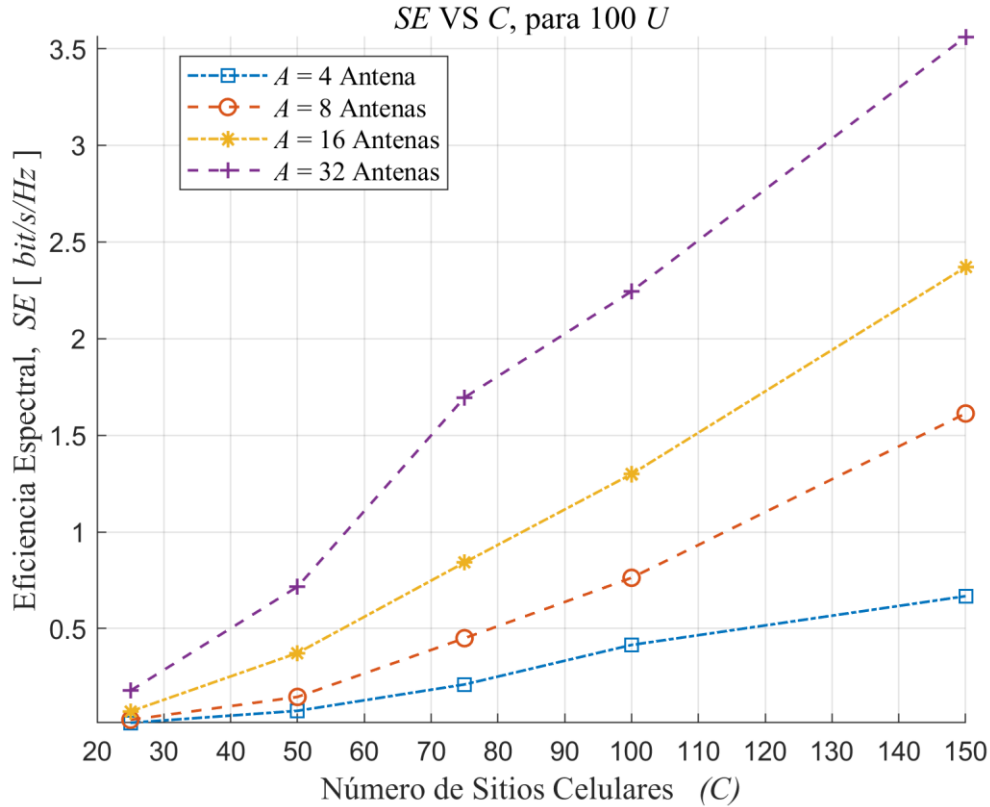
**Figura 9.** Estructura Jerárquica de las Combinaciones de Simulación según A, C y U

**Fuente:** Autor

Las simulaciones se ejecutaron en un rango completo desde 10 hasta 500 usuarios con incrementos de 10 (10:10:500), para obtener una interpretación más clara, ordenada y comparativa de los resultados se agruparon en intervalos de 100 usuarios, considerando los puntos representativos  $U = 100, 200, 300, 400$  y 500. Esta agrupación permitió describir con mayor claridad el comportamiento de la eficiencia espectral, reduciendo la dispersión visual y facilitando la identificación de patrones significativos a medida que aumentaba la carga del sistema.

La Figura 10 indicó los resultados obtenidos al efectuar la simulación considerando una carga de 100 usuarios, variando el número de sitios celulares (C) entre 25 y 150, y analizando simultáneamente cuatro configuraciones de antenas por punto de acceso,  $A = \{4, 8, 16, 32\}$ .

Los resultados mostraron un comportamiento claramente creciente: a medida que se incrementaba la infraestructura de red —ya fuera mediante una mayor densidad de sitios celulares o mediante el uso de arreglos de antenas de mayor orden— la eficiencia espectral aumentó de forma sostenida.

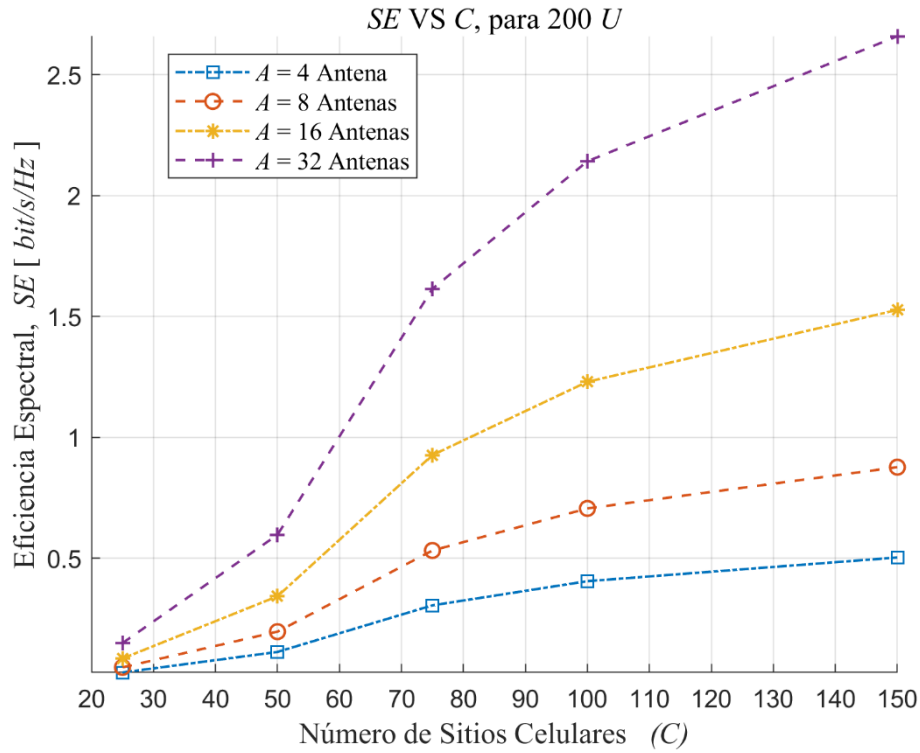


**Figura 10.** Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25:25:150\}$ ), usando 100 usuarios indicando una creciente SE.

**Fuente:** Autor

Para el primer análisis, la configuración de  $A = 4$  antenas presentaron un rendimiento limitado, alcanzando valores que fueron desde 0.0127 bit/s/Hz en  $C = 25$  hasta 0.6678 bit/s/Hz en  $C = 150$ , lo que evidenció que, con baja capacidad de antenas, el sistema no pudo explotar adecuadamente la cooperación distribuida. En el caso de  $A = 8$  antenas, se observó una mejora notable, con incrementos que partieron desde 0.0281 bit/s/Hz y alcanzaron 1.6126 bit/s/Hz, demostrando un mayor aprovechamiento del canal conforme aumentaba  $C$ . Para  $A = 16$  antenas, la tendencia se volvió más pronunciada, alcanzando un máximo de 2.3696 bit/s/Hz, lo que mostró un incremento casi lineal atribuible a la mayor ganancia espacial derivada del arreglo de antenas. Finalmente, la configuración con  $A = 32$  antenas presentaron el mejor desempeño del conjunto evaluado: la SE creció desde 0.1785 bit/s/Hz hasta 3.5615 bit/s/Hz, constituyéndose en la infraestructura más eficiente para los 100 Usuarios analizados. Para la primera grafica se incrementa tanto el número de sitios celulares como el número de antenas, siendo las configuraciones con mayor capacidad (especialmente  $N = 32$ ) las que logran el aprovechamiento más eficiente del espectro en escenarios CF-mMIMO para enlaces descendentes.

Para el siguiente caso, los resultados confirmaron que, para 200 usuarios, el sistema CF-mMIMO obtuvo un rendimiento significativamente más eficiente a medida que aumentaban tanto la densidad de sitios celulares como el número de antenas, presentando un crecimiento casi lineal en configuraciones con infraestructura elevada, tal como se mostró en la Figura 11.

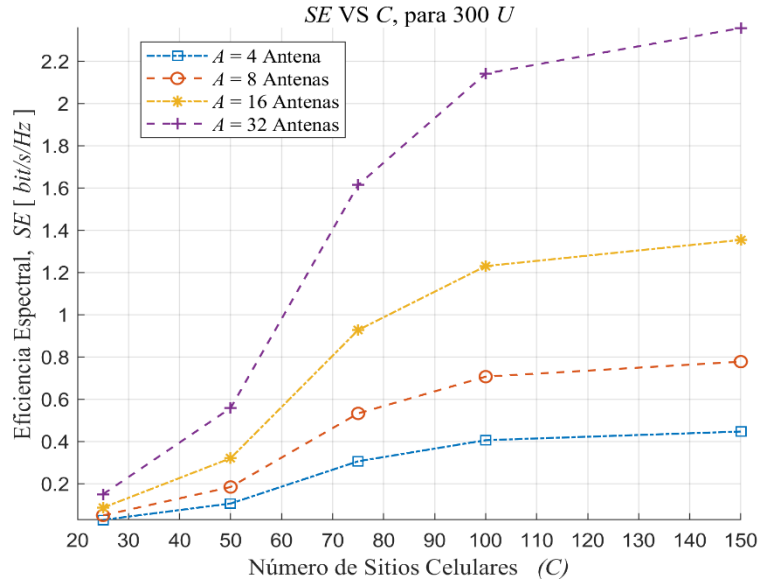


**Figura 11.** Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25:25:150\}$ ), usando 200 usuarios indicando una creciente SE.

**Fuente:** Autor

Para la configuración de  $A = 4$  antenas, la SE presentó valores modestos, aumentando desde 0.028 bit/s/Hz en  $C = 25$  hasta 0.503 bit/s/Hz en  $C = 150$ . Aunque la tendencia fue ascendente, la capacidad limitada del arreglo de antenas restringió el aprovechamiento del espectro. En el caso de  $A = 8$  antenas, se observó un crecimiento más pronunciado: la SE escaló desde 0.049 bit/s/Hz hasta 0.876 bit/s/Hz, lo que evidenció una mayor capacidad de gestión de interferencia gracias al incremento en diversidad espacial. Con  $A = 16$  antenas, el rendimiento mejoró considerablemente, alcanzando 1.526 bit/s/Hz en  $C = 150$ , lo cual indicó que el sistema logró explotar de forma más eficiente la cooperación entre los puntos de acceso y la mayor ganancia espacial disponible. Finalmente, la configuración con  $A = 32$  antenas presentaron el comportamiento más favorable: la SE pasó desde 0.149 bit/s/Hz en  $C = 25$  hasta 2.141 bit/s/Hz en  $C = 100$ , siendo la curva con la pendiente más pronunciada del conjunto evaluado. Aunque la tabla no incluyó el valor explícito para  $C = 150$ , la tendencia creciente sugirió que este nivel habría alcanzado el mayor rendimiento entre todas las combinaciones.

Bajo una carga de 300 usuarios, variando el número de sitios celulares  $C$  entre 25 hasta 150, y considerando cuatro configuraciones de antenas por punto de acceso  $A = \{4, 8, 16, 32\}$ . Los resultados muestran una tendencia creciente para todas las configuraciones, evidenciando que tanto la densificación de infraestructura como el aumento del número de antenas contribuyen positivamente al rendimiento espectral del sistema visto en la Figura 12.



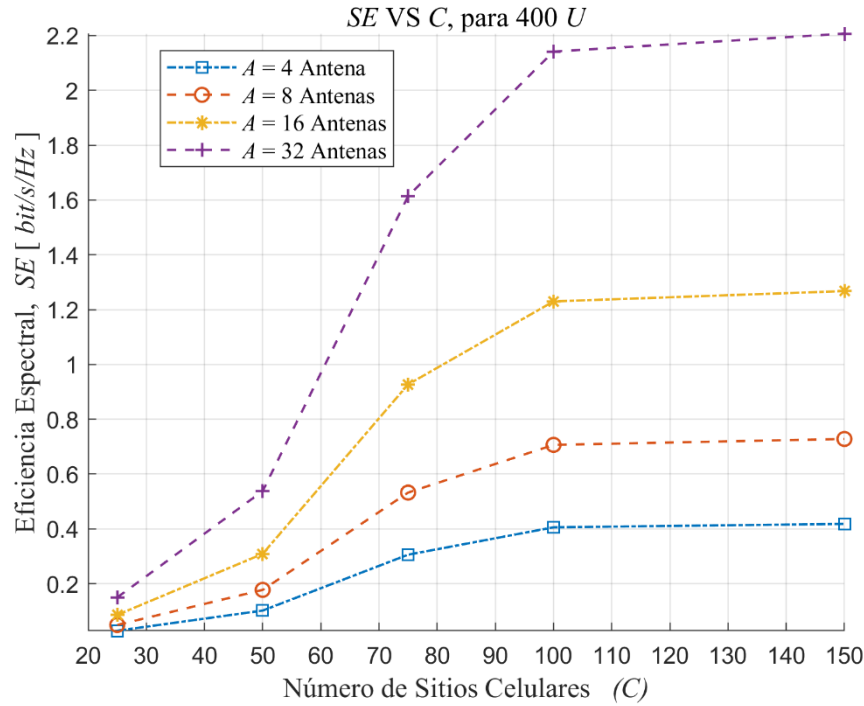
**Figura 12.** Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25:25:150\}$ ), usando 300 usuarios indicando una creciente SE.

**Fuente:** Autor

Para la configuración con  $A = 4$  antenas, la SE se mantuvo en niveles modestos, pasando de 0.028 bit/s/Hz en  $C = 25$  a 0.446 bit/s/Hz en  $C = 150$ , lo que indicó un crecimiento limitado debido a la baja capacidad espacial del arreglo. En el caso de  $A = 8$  antenas, la tendencia fue más favorable: la SE aumentó desde 0.049 bit/s/Hz hasta 0.777 bit/s/Hz, mostrando que la red comenzó a aprovechar mejor la cooperación entre sitios celulares conforme aumentaba la infraestructura. El comportamiento más significativo apareció en las configuraciones de mayor capacidad. Con  $A = 16$  antenas, la SE mejoró de forma considerable, alcanzando 1.354 bit/s/Hz en  $C = 150$ , mientras que la configuración con  $A = 32$  antenas presentaron el mejor desempeño de todo el conjunto, pasando de 0.149 bit/s/Hz en  $C = 25$  a 2.357 bit/s/Hz en  $C = 150$ . Esto confirmó que un mayor número de antenas permitió capturar con mayor precisión las características del canal y mejorar la directividad del enlace, particularmente en escenarios con carga media como 300 usuarios.

Para este cuarto análisis confirmó que para 400 usuarios la eficiencia espectral aumentó conforme creció la infraestructura, aunque con un margen más moderado en configuraciones de baja capacidad. Los mejores resultados se obtuvieron con arreglos densos de antenas (16 y 32), donde la combinación de mayor capacidad radiada y mayor densidad de sitios celulares compensó la carga del sistema que se muestra en la Figura 13.





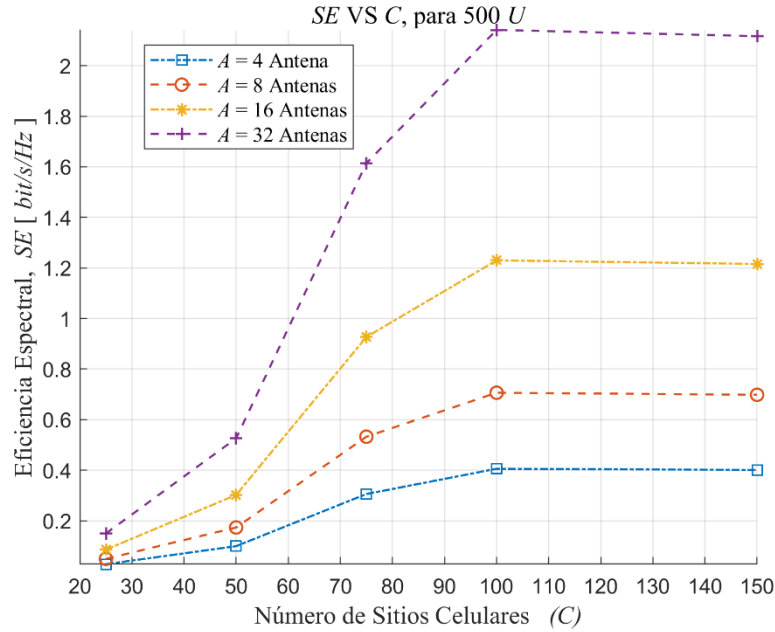
**Figura 13.** Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25: 25: 150\}$ ), usando 400 usuarios indicando una creciente SE.

**Fuente:** Autor

La SE alcanzó valores relativamente bajos, comenzando en 0.028 bit/s/Hz para  $C = 25$  y llegando únicamente a 0.418 bit/s/Hz en  $C = 150$ . Este crecimiento limitado reflejó que, con baja capacidad por punto de acceso, el sistema no logró compensar adecuadamente la interferencia generada por los 400 usuarios. En el caso de  $A = 8$  antenas, la SE presentó un comportamiento más favorable, incrementándose desde 0.049 bit/s/Hz hasta 0.728 bit/s/Hz, lo cual evidenció una mejora en la explotación de la cooperación distribuida conforme aumentaba la densidad de sitios celulares.

Las configuraciones con mayor número de antenas mostraron un desempeño significativamente superior. Con  $A = 16$  antenas, la SE aumentó desde 0.086 bit/s/Hz en  $C = 25$  hasta 1.267 bit/s/Hz en  $C = 150$ , presentando una tendencia más consistente y con una pendiente mayor. Finalmente, la configuración con  $A = 32$  antenas fue la más eficiente del conjunto, elevando la SE desde 0.149 bit/s/Hz hasta 2.207 bit/s/Hz, lo que demostró que incluso bajo cargas elevadas, el uso de grandes arreglos de antenas permitió maximizar la ganancia espacial, mejorar la precodificación y mitigar la interferencia.

Bajo cargas extremadamente altas, la eficiencia espectral solo pudo sostenerse o mejorar mediante un incremento sustancial tanto en la densidad de sitios celulares como en el número de antenas por punto de acceso, cuando operan en condiciones de máxima demanda que se probó para 500 usuarios se muestra en la Figura 14.



**Figura 14.** Resultados del número de Sitios Celulares ( $C = \{25:25:150\}$ ), usando 500 usuarios indicando una creciente SE.

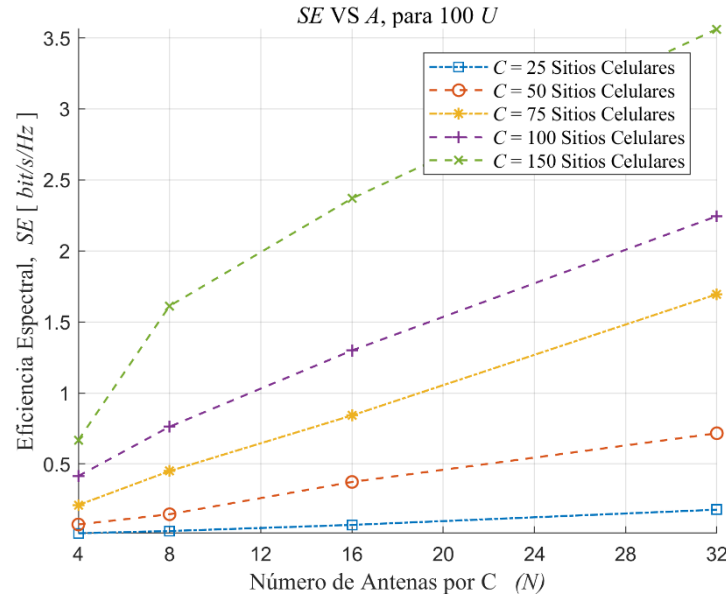
**Fuente:** Autor

En el caso de  $N = 8$  antenas, el comportamiento mejoró ligeramente, con valores que oscilaron entre 0.049 bit/s/Hz y 0.698 bit/s/Hz, mostrando un incremento moderado y más estable que el de la configuración anterior.

Por su parte,  $N = 16$  antenas presentaron una mejora más consistente: la SE escaló desde 0.086 bit/s/Hz hasta 1.215 bit/s/Hz, reflejando una mayor capacidad para manejar la interferencia interusuario gracias a la ganancia espacial adicional. Finalmente, la configuración con  $N = 32$  antenas fue nuevamente la más eficiente del conjunto. La SE alcanzó los valores más elevados, avanzando desde 0.149 bit/s/Hz en  $L = 25$  hasta 2.116 bit/s/Hz en  $L = 150$ . Si bien el crecimiento fue significativo, la pendiente resultó ligeramente menor en comparación con escenarios de menor carga, debido a que la saturación del sistema limitó el aprovechamiento total del espectro aun con infraestructuras robustas.

#### 4.1.3 Resultados y análisis de la SE en función del número de antenas por Sitios Celulares (A)

Para este análisis, también se toman como referencia las configuraciones presentadas en la Figura 15. Cada resultado obtenido se basa en las distintas configuraciones de  $C$ ,  $A$  y  $U$ . A continuación, se analizan los resultados de la SE en función del número de antenas por Sitios Celulares.



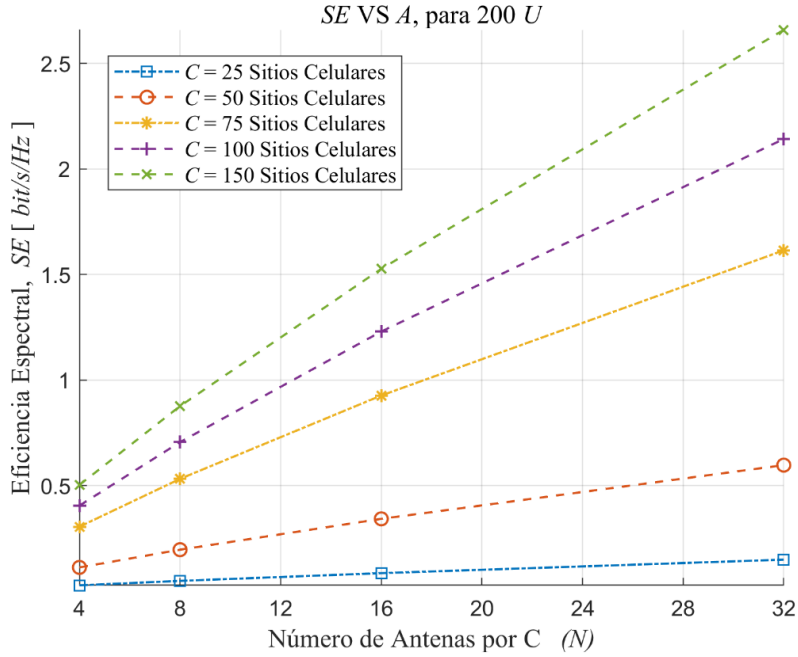
**Figura 15.** Resultados: SE vs número de usuarios para  $\{4, 8, 16, 32\}$  antenas por C,  $\{25, 50, 75, 100, 150\}$  C y  $\{100\}$  Usuarios.

**Fuente:** Autor

Para  $C = 25$  sitios celulares, el rendimiento inicial fue bajo debido a la limitada infraestructura, comenzando en 0.0127 bit/s/Hz con  $A = 4$  y alcanzando 0.1785 bit/s/Hz con  $A = 32$ . A medida que se incrementó la densidad de sitios celulares, el sistema logró explotar mejor la cooperación distribuida. Por ejemplo, con  $C = 50$ , la SE aumentó desde 0.0745 hasta 0.7164 bit/s/Hz, mientras que en  $C = 75$  la mejora se hizo más evidente, escalando de 0.2109 a 1.6952 bit/s/Hz.

Los escenarios con mayor infraestructura reflejaron el efecto más pronunciado de incrementar el número de antenas. Para  $C = 100$  sitios celulares, la SE creció desde 0.4154 hasta 2.2448 bit/s/Hz, mostrando una relación casi lineal entre  $A$  y el rendimiento espectral. Finalmente, en  $C = 150$  —la infraestructura más densa— la SE presentó los valores más altos del conjunto, aumentando desde 0.6678 bit/s/Hz para  $N = 4$  hasta un máximo de 3.5615 bit/s/Hz para  $A = 32$ , lo cual confirmó que la combinación simultánea de alta densidad de sitios celulares y grandes arreglos de antenas optimizó significativamente el desempeño del sistema.

Los resultados confirman que, para 200 usuarios, la eficiencia espectral mejora de forma contundente conforme aumenta el número de antenas, especialmente en entornos con mayor densidad de puntos de acceso que se muestra en la Figura 16.



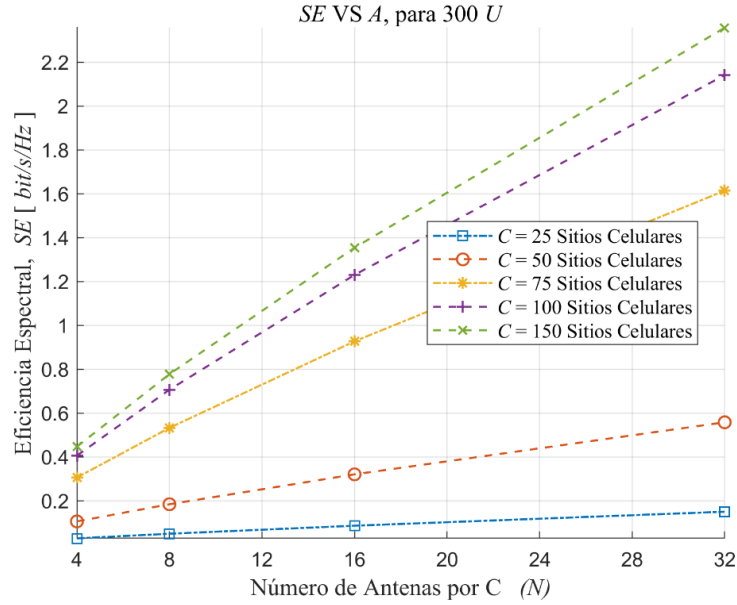
**Figura 16.** Resultados: SE vs número de usuarios para  $\{4, 8, 16, 32\}$  antenas por C,  $\{25, 50, 75, 100, 150\}$  C y  $\{200\}$  Usuarios.

**Fuente:** Autor

Para  $C = 25$  sitios celulares la infraestructura más reducida— la SE mostró valores modestos, iniciando en 0.028 bit/s/Hz con  $A = 4$  y alcanzando solo 0.149 bit/s/Hz con  $A = 32$ . No obstante, conforme aumentó la densidad de sitios celulares, la relación entre la SE y el número de antenas se volvió más pronunciada. Por ejemplo, con  $C = 50$ , la SE escaló desde 0.113 bit/s/Hz hasta 0.597 bit/s/Hz, lo que demostró que el aumento de antenas comenzó a potenciar significativamente la diversidad espacial.

El comportamiento más notable se observó en densidades mayores. Con  $C = 75$ , la SE aumentó de 0.3058 a 1.6141 bit/s/Hz, mostrando un crecimiento casi lineal respecto al número de antenas. Para  $C = 100$ , este incremento se intensificó aún más, llegando a 2.1416 bit/s/Hz con  $N = 32$ , lo que evidenció una mejora robusta en la capacidad del sistema. Finalmente, con  $C = 150$  —la mayor densidad evaluada— la SE alcanzó su valor máximo dentro del escenario, pasando de 0.5037 bit/s/Hz a 2.6586 bit/s/Hz, siendo esta la configuración más eficiente gracias a la combinación de alta densidad de sitios celulares y arreglos de antenas de gran tamaño.

Para este caso se analizó en una carga de 300 usuarios que se muestran en la Figura 17, examinando el efecto del número de antenas por punto de acceso ( $A$ ) bajo distintas densidades de sitios celulares  $C = \{25, 50, 75, 100, 150\}$ .

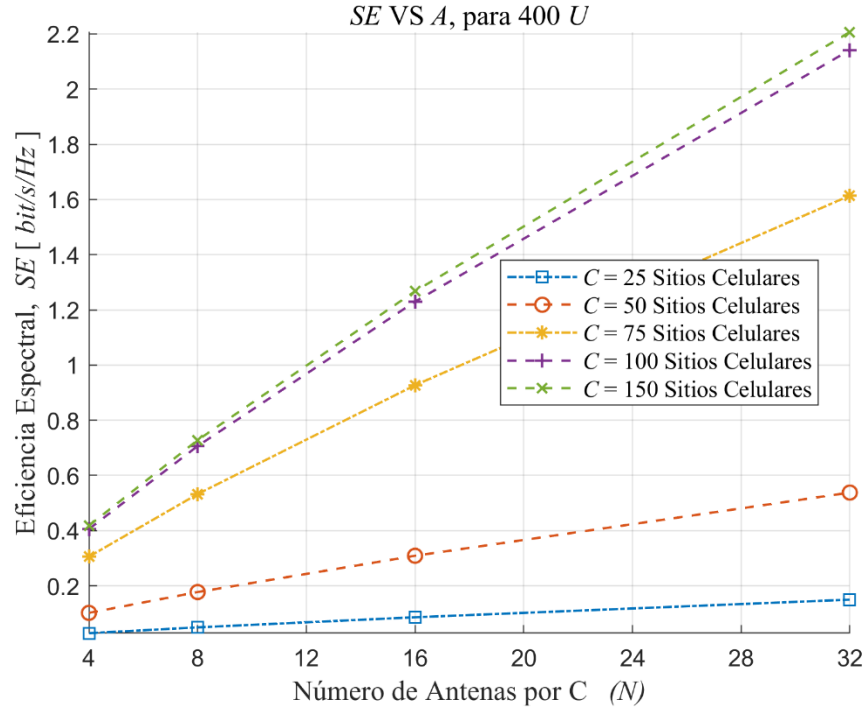


**Figura 17.** Resultados: SE vs número de usuarios para  $\{4, 8, 16, 32\}$  antenas por C,  $\{25, 50, 75, 100, 150\}$  C y  $\{300\}$  Usuarios.

**Fuente:** Autor

Los valores de SE se mantuvieron bajos debido a la limitada infraestructura disponible, aumentando desde 0.028 bit/s/Hz (con  $A = 4$ ) hasta 0.149 bit/s/Hz (con  $A = 32$ ). A medida que la densidad de sitios celulares se incrementó, la pendiente de crecimiento se volvió más evidente. En  $C = 50$ , la SE se elevó desde 0.1057 hasta 0.5577 bit/s/Hz, lo que reflejó un aumento significativo favorecido por un mayor grado de cooperación entre los puntos de acceso.

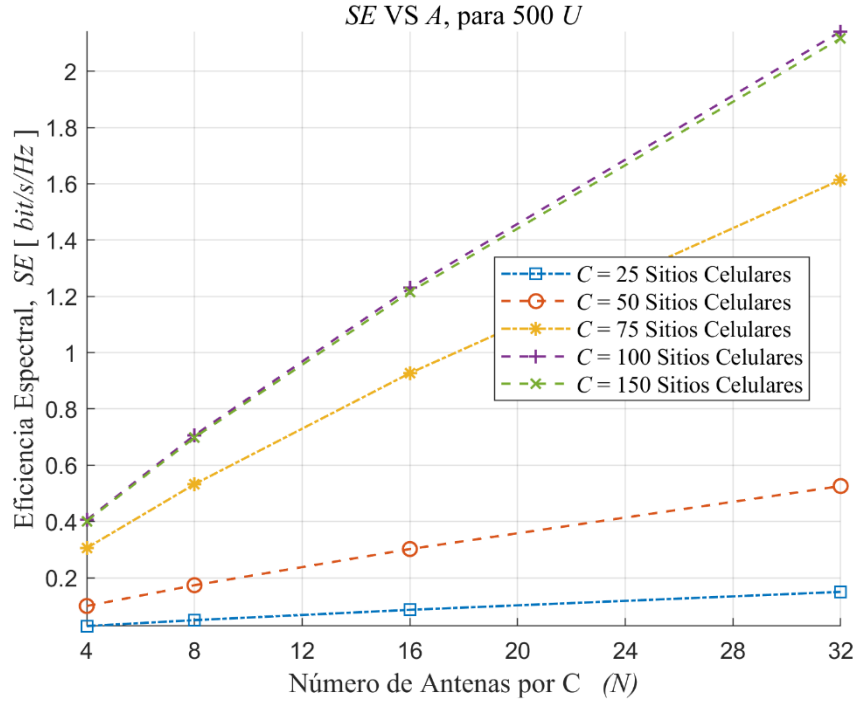
En los escenarios con infraestructura más amplia se observó el comportamiento más destacado. Para  $C = 75$ , la SE creció desde 0.3058 hasta 1.6141 bit/s/Hz, evidenciando una relación casi lineal con el número de antenas. Posteriormente, en  $C = 100$  sitios celulares, el rendimiento mejoró aún más, alcanzando 2.1416 bit/s/Hz para  $A = 32$ . Finalmente, en  $C = 150$  —la mayor densidad evaluada— se obtuvo el valor máximo dentro del conjunto, llegando a 2.3575 bit/s/Hz, lo que confirmó que la combinación de alta densidad de sitios celulares y arreglos de antenas de gran tamaño optimizó notablemente el rendimiento espectral del sistema.



**Figura 18.** Resultados: SE vs número de usuarios para  $\{4, 8, 16, 32\}$  antenas por C,  $\{25, 50, 75, 100, 150\}$  C y  $\{400\}$  Usuarios.

**Fuente:** Autor

El comportamiento más intenso se observó en densidades superiores visto en la Figura 18. Con  $C = 75$ , la SE pasó de 0.3058 a 1.6141 bit/s/Hz, mostrando una pendiente claramente más pronunciada y un efecto casi lineal asociado al aumento del número de antenas. Algo similar ocurrió en  $C = 100$ , donde la SE creció desde 0.4057 hasta 2.1416 bit/s/Hz, lo que demostró que, bajo una densidad intermedia-alta, el sistema pudo capitalizar de manera más eficiente la ganancia espacial proporcionada por arreglos de antenas de mayor tamaño. Finalmente, en  $C = 150$  la configuración más robusta evaluada— se observó el mejor desempeño del conjunto: la SE aumentó desde 0.4181 hasta 2.207 bit/s/Hz, constituyéndose en la curva de mayor eficiencia. No obstante, aunque el incremento fue significativo, la saturación propia de los 400 usuarios atenuó ligeramente el crecimiento final en comparación con escenarios de menor carga.



**Figura 19.** Resultados: SE vs número de usuarios para  $\{4, 8, 16, 32\}$  antenas por C,  $\{25, 50, 75, 100, 150\}$  C y  $\{500\}$  Usuarios.

**Fuente:** Autor

En la Figura 19 configurando un escenario con 500 usuarios cuando la densidad incrementó a  $C = 50$ , la SE mejoró de forma más perceptible, elevándose desde 0.0997 hasta 0.526 bit/s/Hz, lo que mostró una mayor capacidad del sistema para explotar la cooperación distribuida entre los puntos de acceso. El crecimiento más notable se observó en los escenarios con infraestructuras de mayor densidad. Para  $C = 75$ , la SE se incrementó desde 0.3058 hasta 1.6141 bit/s/Hz, lo que demostró que el aumento del número de antenas tuvo un impacto considerable al mejorar la ganancia espacial. En  $C = 100$ , esta tendencia se intensificó aún más, alcanzando un máximo de 2.1416 bit/s/Hz para  $A = 32$ , lo que confirmó que las configuraciones con mayor capacidad radiada lograron mitigar de manera más efectiva la interferencia distribuida.

Finalmente, para  $C = 150$  la configuración más robusta evaluada el sistema obtuvo una SE de hasta 2.1167 bit/s/Hz con  $A = 32$ . Aunque este valor fue ligeramente inferior al observado en  $C = 100$ , la curva mantuvo una pendiente positiva, lo que demostró que, incluso bajo condiciones de máxima saturación, la infraestructura densa permitió sostener niveles aceptables de eficiencia espectral. En conjunto, los resultados confirmaron que, para cargas extremadamente altas como 500 usuarios, el aumento del número de antenas continuó siendo un factor fundamental para mejorar la SE, aunque la magnitud de dicha mejora estuvo limitada por el grado de congestión del sistema.

## 4.2 Análisis Estadístico de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica, utilizando modelamiento matemático para mejorar la eficiencia espectral.

**Tabla 6.** Configuración de las variables independientes en distintos escenarios para el análisis general de la SE en Sistemas CF-mMIMO.

*Fuente: Autor*

Variables independientes	Configuraciones de distintos escenarios	Descripción
<b>A</b>	4:4:32	Numero de Antenas
<b>U</b>	10:10:500	Número de Usuarios
<b>C</b>	25,50,75,100,150	Numero de sitios celulares

Para hacer un correcto análisis de datos que recoja la eficacia de todos los escenarios desplegados mediante la simulación por medio del software Matlab, la siguiente tabla reporta la cantidad de datos utilizados lo que favorece la significancia estadística trabajando con 1000 resultados que respalda el desarrollo de la investigación.

**Tabla 7.** Preparación de datos para el análisis global de la SE en CF-mMIMO (variando C, A y U).

*Fuente: Autor*

Casos Evaluados	Variable	N	%
<b>Validos</b>	Eficiencia Espectral (SE)	1000	100,0%
<b>Perdidos</b>	Eficiencia Espectral (SE)	0	0%
<b>Total</b>	Eficiencia Espectral (SE)	1000	100,0%

Al haber evaluado todos los escenarios mencionados, como primer paso es realizar una prueba de normalidad para poder verificar la distribución de todos los datos que tenemos de cada variable, se tomó como punto de partida este método estadístico ya que va a definir el uso de datos paramétricos y no paramétricos, como tenemos tres variables correspondientes el análisis se ejerce un mayor impacto en la Eficiencia Espectral.

### 4.2.1 Prueba de Normalidad

La evaluación de normalidad fue un paso fundamental para determinar si la variable dependiente SE (Eficiencia Espectral) presentaba un comportamiento compatible con una distribución normal bajo las distintas combinaciones de usuarios, antenas y sitios celulares. Para ello, se aplicó la prueba de Kolmogorov–Smirnov (K–S), el cual contrastó la distribución empírica de los datos frente a la distribución normal teórica. Los resultados de



la prueba, presentados en las Tablas 8 y 9, mostraron p-valores superiores a 0.05 en todos los grupos analizados. Esto indicó que no se rechazó la hipótesis nula de normalidad en ninguna de las configuraciones evaluadas. En consecuencia, la distribución de los valores de SE fue estadísticamente compatible con un comportamiento normal tanto al variar el número de antenas (A) y usuarios (U), como al modificar el número de sitios celulares (C).

**Tabla 8.** Pruebas de normalidad para la SE según C y U en el sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en DL

**Fuente:** Autor

N° Usuarios [U]	N° Muestras	N° Antenas [N]				¿Normalidad?
		P_valor				
		4 A	8 A	16 A	32 A	
10 -100	40	.620	.403	.700	.893	si
110-200	40	.736	.736	.736	.736	si
210-300	40	.440	.440	.440	.440	si
310-400	40	.275	.275	.275	.275	si
410-500	40	.224	.224	.224	.224	si

En la Tabla 9 se presentan los p-valores obtenidos para cada grupo, correspondientes a los niveles de L entre 25 a 150 sitios celulares. Este comportamiento significa que los datos de SE son estables y adecuados para ser analizados mediante métodos paramétricos, ya que los valores elevados de p (por ejemplo, 0.675, 0.722 o 0.987) reflejan que no existen desviaciones significativas respecto a una distribución normal. En consecuencia, tanto los cinco rangos de usuarios como los cinco niveles de sitios celulares cumplen el supuesto de normalidad

**Tabla 9.** Pruebas de normalidad para la SE según C y U en el sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en DL

**Fuente:** Autor

N° Usuarios [U]	N° Muestras	N° Sitios Celulares [L]					¿Normalidad?
		P_valor					
		25 C	50 C	75 C	100 C	150 C	
10-100	50	.315	.520	.568	.722	.987	si
110-200	50	.675	.675	.675	.675	.675	si
210-300	50	.675	.675	.675	.675	.675	si
310-400	50	.675	.675	.675	.675	.675	si
410-500	50	.675	.675	.675	.675	.675	si

### 4.2.3 Análisis ANOVA

En este análisis, debido a que se trabajó con tres variables independientes que podían influir significativamente en los resultados como lo son el número de sitios celulares (C), el número de antenas (A) y el número de usuarios activos (U), se empleó un ANOVA de tres factores se consideró que el análisis exploratorio inicial se realizaron sobre una muestra de 1000 datos representativos, para el test ANOVA de tres factores requirió el uso del conjunto de datos completos generados por la simulación, compuesto por 30 000 , por esta razón se efectuó sobre la totalidad de los casos disponibles.

La Tabla 10 presenta los resultados del análisis ANOVA aplicado a la variable dependiente SE considerando los parámetros C, A y U como factores independientes. En ella se mostró el impacto del número de antenas dependió del nivel de usuarios presentes, y que la influencia de la densidad de sitios celulares variaba según el número de antenas disponibles. Finalmente, la interacción triple  $A \times U \times C$  también fue significativa ( $F = 80.431$ ;  $p < 0.001$ ), lo que indico es que la combinación simultánea de antenas, usuarios y sitios celulares influyo significativamente en la SE, evidenciando que el comportamiento del sistema fue altamente dependiente de la arquitectura completa y no únicamente de factores evaluados de forma aislada.

**Tabla 10.** Análisis ANOVA de tres factores C, A y U en la SE en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en DL

*Fuente: Autor*

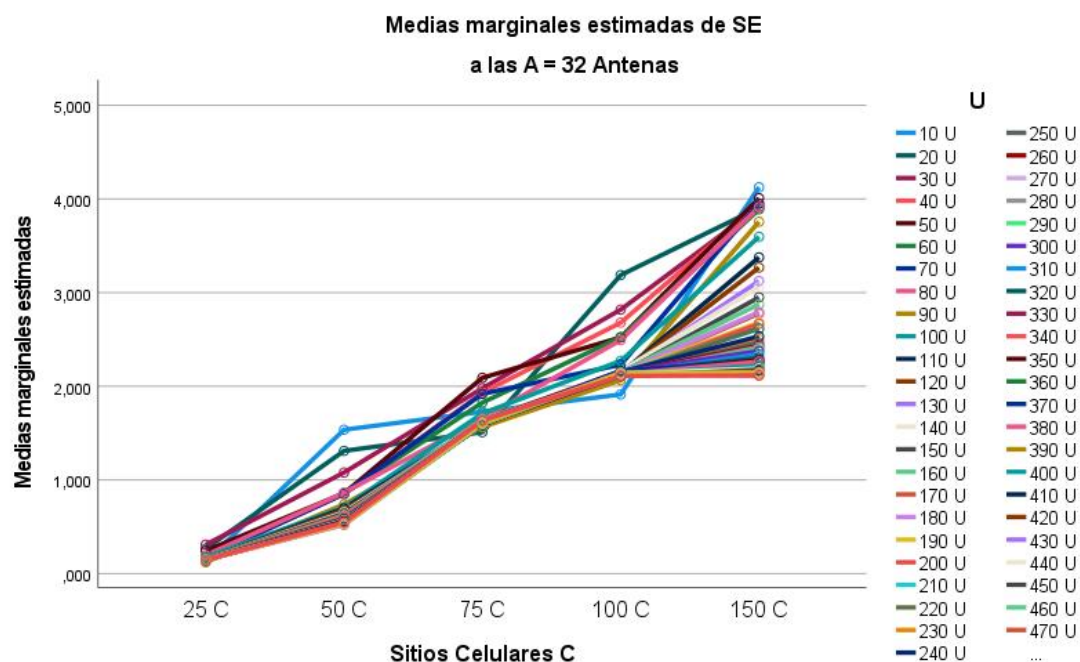
Variable dependiente: Eficiencia Espectral (SE)					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Modelo corregido</b>	18381,845 <sup>a</sup>	999	18,400	5896,209	,000
<b>Intersección</b>	18801,091	1	18801,091	6024656,932	,000
A	6094,496	3	2031,499	650977,200	,000
U	616,663	49	12,585	4032,745	,000
C	8186,992	4	2046,748	655863,794	,000
A * U	105,393	147	,717	229,744	,000
A * C	2442,998	12	203,583	65236,572	,000
U * C	787,715	196	4,019	1287,841	,000
A * U * C	147,588	588	,251	80,431	,000
Error	90,500	29000	,003		
Total	37273,436	30000			
Total corregido	18472,345	29999			
a. R al cuadrado = ,995 (R al cuadrado ajustada = ,995)					

En ese caso se definieron las siguientes hipótesis nulas ( $H_0$ ) e hipótesis alternativas ( $H_1$ ), que guiaron la validación del modelo factorial y permitieron establecer si las diferencias observadas en la SE eran estadísticamente atribuibles a los factores evaluados.

**$H_0$ :** Los factores  $A$  (antenas),  $U$  (usuarios),  $C$  (sitios celulares) y sus interacciones no producen diferencias significativas en las medias de la eficiencia espectral (SE).

**$H_1$ :** Al menos uno de los factores  $A$ ,  $U$  o  $C$ , o alguna de sus interacciones, sí produce diferencias significativas en las medias de la eficiencia espectral (SE).

Tal como se aprecia en la Figura 20 presentó las medias marginales estimadas de la eficiencia espectral (SE) para la configuración de  $A = 32$  antenas, considerando distintos niveles de sitios celulares ( $C$ ) y un amplio rango de usuarios ( $U$ ). En todos los casos se observó un crecimiento progresivo de la SE conforme aumentó la densidad de sitios celulares, con incrementos especialmente marcados al pasar de 100 a 150 CS. Este comportamiento evidenció que, bajo una arquitectura con 32 antenas por punto de acceso, el sistema CF-mMIMO aprovechó de forma significativa la cooperación distribuida y la ganancia espacial adicional generada por una infraestructura más densa.

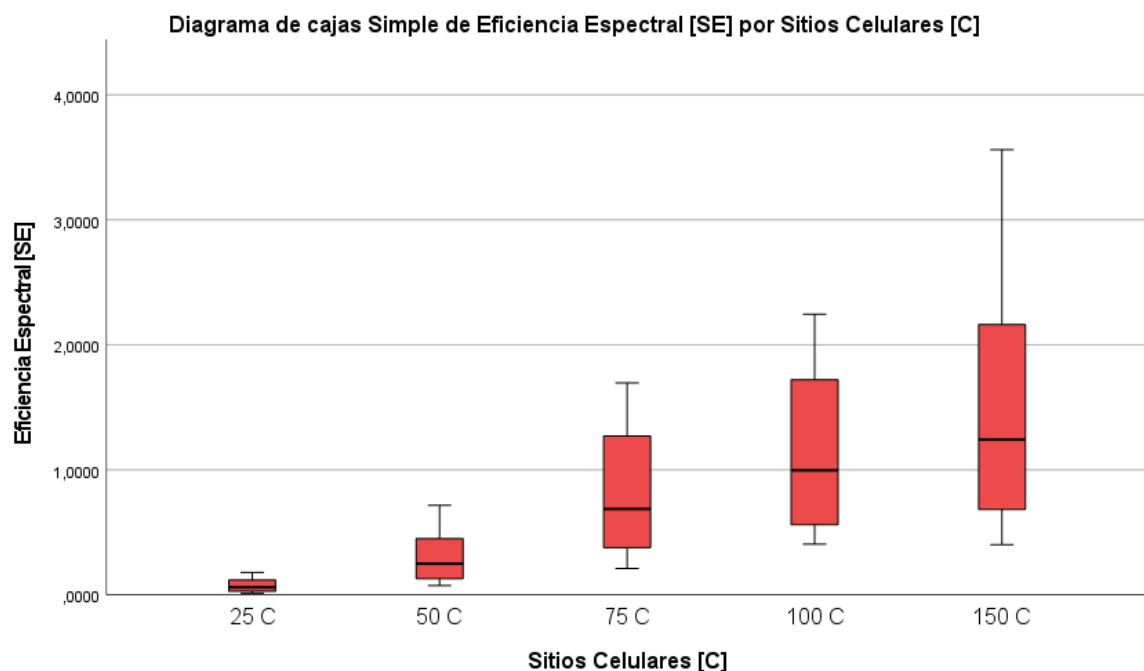


**Figura 20.** Gráfico de medias: efecto del número de sitios celulares ( $L$ ) y la cantidad de usuarios ( $K$ ) en la eficiencia espectral (SE) del sistema, considerando  $N = 32$  antenas.

**Fuente:** Autor

A continuación, se describe el análisis gráfico de la eficiencia espectral en base a los Sitios Celulares ( $C$ ), Antenas ( $A$ ) y los Usuarios desplegados ( $U$ ) donde para este análisis los resultados se representan en diagramas de cajas.

En primer lugar, en la Figura 21 se analizó la relación entre la eficiencia espectral (SE) y el número de Sitios Celulares (C), observándose que la SE presentó variaciones significativas conforme aumentó la infraestructura del sistema CF-mMIMO. En la configuración más densa, correspondiente a 150 Sitios Celulares, la SE alcanzó valores comprendidos entre aproximadamente 0.1785 bit/s/Hz y 3.5615 bit/s/Hz, situándose la mediana alrededor de 1.6126 bit/s/Hz, lo cual evidenció un desempeño notablemente superior. Por el contrario, en los escenarios con 25 y 50 Sitios Celulares, la SE mantuvo concentrada en rangos bajos y con escasa dispersión, indicando un rendimiento limitado asociado a la baja densidad de la red. Para las configuraciones intermedias de 75 y 100 Sitios Celulares, la SE mostró una distribución progresivamente más amplia. En conjunto, los resultados permitieron concluir que la SE no solo aumentó de forma consistente, sino que también presentó una mayor variabilidad positiva a medida que se densificó la red, y que no se identificaron valores atípicos dentro de los datos analizados.

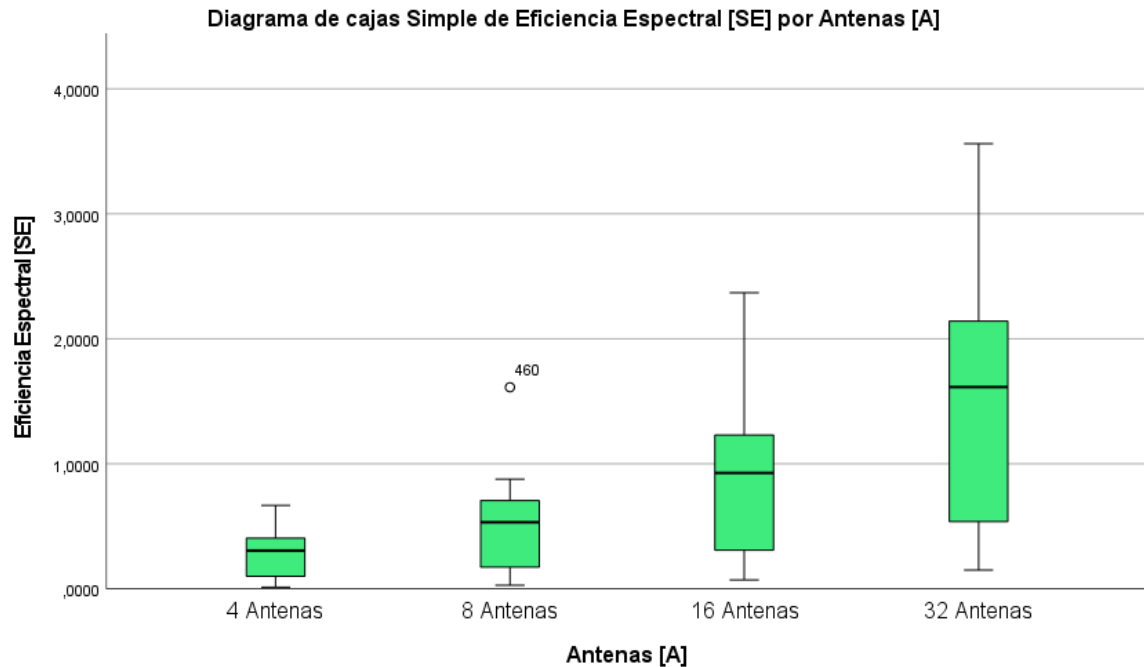


**Figura 21.** Diagrama de cajas de la Eficiencia Espectral (SE) vs el número de sitios celulares (C) en función de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica.

**Fuente:** Autor

Se analizó el comportamiento de la eficiencia espectral (SE) en función del número de antenas por punto de acceso (N), observándose que la SE aumentó de manera progresiva y consistente conforme se incrementó la capacidad radiada del sistema como se puede observar en la Figura 22. Para la configuración mínima de 4 antenas, los valores de SE se mantuvieron entre rangos bajos y con una dispersión limitada, lo cual evidenció un aprovechamiento reducido de la ganancia espacial. Al aumentar a 8 antenas, la mediana y el rango intercuartílico se elevaron, aunque aún se identificó un dato atípico aislado, indicando una mejora inicial pero todavía moderada. En las configuraciones de 16 antenas, la SE presentó un incremento más pronunciado, con medianas superiores a 1 bit/s/Hz y una mayor

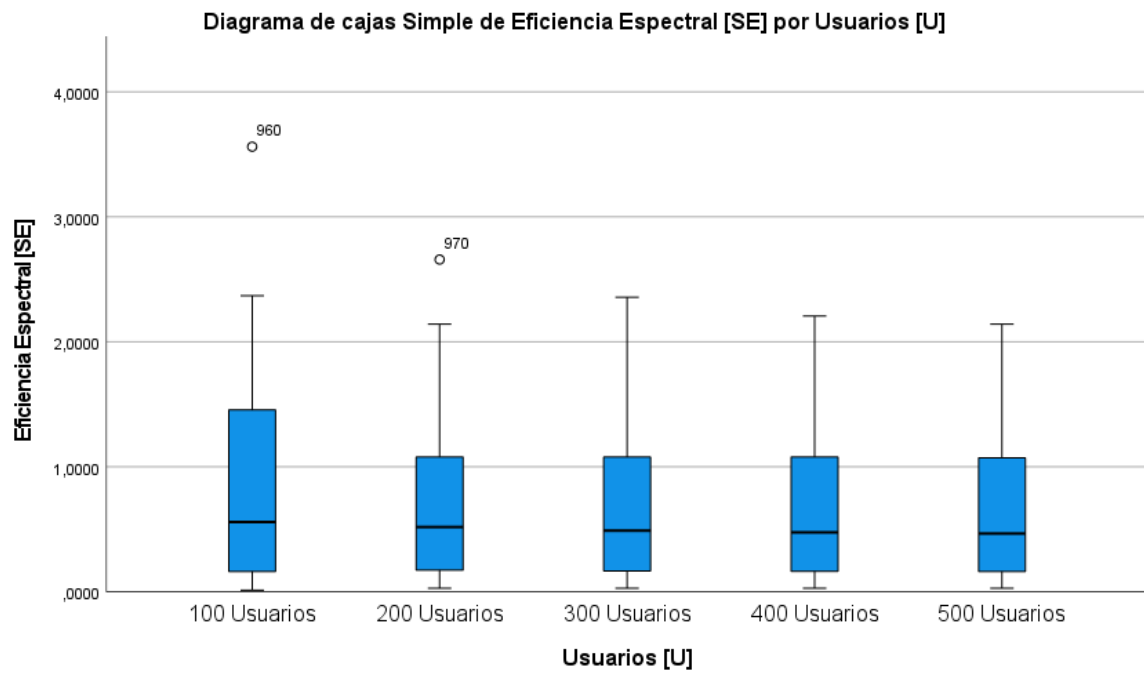
variabilidad, reflejando una capacidad más robusta para mitigar interferencias. Finalmente, con 32 antenas se obtuvo el mejor desempeño global: la SE alcanzó valores que superaron los 2 bit/s/Hz y mostraron la mayor dispersión positiva del conjunto, confirmando que los arreglos de mayor tamaño permitieron maximizar la ganancia espacial y, por ende, la eficiencia espectral del sistema CF-mMIMO.



**Figura 22.** Diagrama de cajas de la Eficiencia Espectral (SE) vs el número de antenas (A) en función de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica.

**Fuente:** Autor

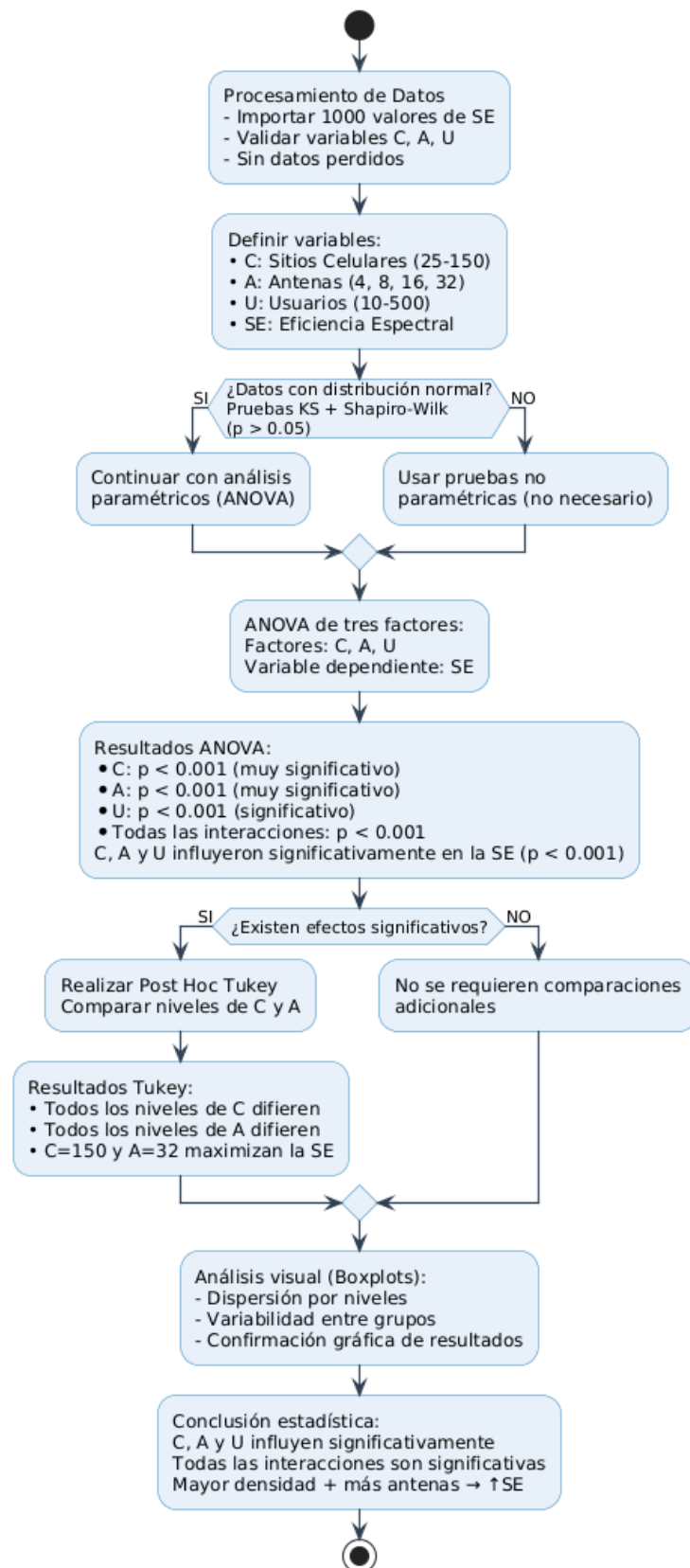
Para las cargas de 100, 200, 300, 400 y 500 usuarios, las medianas se mantuvieron en valores similares, cercanos a 0.5 bit/s/Hz, y el rango intercuartílico mostró una distribución comparable entre todos los grupos que se muestran en la Figura 23. Aunque se identificaron dos valores atípicos en 100 y 200 usuarios, estos no afectaron la tendencia general del conjunto. Asimismo, los límites superior e inferior de los diagramas variaron únicamente de forma marginal, lo que indicó que la dispersión global permaneció estable independientemente de la cantidad de usuarios simulados. En conjunto, los resultados permitieron concluir que la carga de usuarios no ejerció un impacto determinante sobre la SE, coherente con el análisis ANOVA que no reportó diferencias significativas entre los grupos de U.



**Figura 23.** Diagrama de cajas de la Eficiencia Espectral (SE) vs el número de usuarios (U) en función de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica.

**Fuente:** Autor

A continuación, en el siguiente diagrama de flujo se muestra el procedimiento y resultado estadístico del presente proyecto donde se resume todo el proceso analítico sobre el diseño y análisis un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica, utilizando modelamiento matemático para mejorar la eficiencia espectral que se muestra en la Figura 24.



**Figura 24.** Diagrama de Flujo del procedimiento y análisis estadístico del diseño de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO

**Fuente:** Autor

#### 4.2.5 Interpretación de Resultados

El análisis estadístico mediante ANOVA de tres factores confirmó que los parámetros C y A fueron los factores con mayor impacto significativo en la SE, con valores F extremadamente altos y p-valores menores a 0.001 en todos los niveles. Dado que los p-valores fueron inferiores a 0.05 para todos los factores y sus interacciones, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa, concluyendo que C, U y A ejercieron efectos significativos sobre la eficiencia espectral del sistema CF-mMIMO. Además, la prueba post-hoc Tukey mostró diferencias estadísticamente significativas entre cada par de niveles, evidenciando incrementos progresivos en la SE conforme aumentaban tanto el número de sitios celulares como el número de antenas. Esta consistencia en los resultados numéricos y estadísticos validó que la configuración de 150 CS y 32 antenas fue la más eficiente entre todas las alternativas, estableciéndose, así como la opción óptima para maximizar la eficiencia espectral en los escenarios simulados del sistema Cell-Free Massive MIMO.

Desde un punto de vista práctico, esto implica que un operador que busque maximizar la capacidad de su red debe priorizar la densificación de puntos de acceso (mayor C) y la instalación de sitios celulares con mayor número de antenas (mayor A), ya que estos incrementos producen mejoras consistentes y verificadas en la SE. Por ejemplo, pasar de 25 a 150 C o de 4 a 32 antenas representa aumentos sustanciales en el rendimiento del sistema, lo cual respalda estrategias de despliegue donde la red esté altamente distribuida y equipada con paneles de múltiples antenas. Asimismo, dado que la carga de usuarios (U) no altera de manera significativa la eficiencia espectral, el operador puede planificar la capacidad del sistema sin necesidad de sobredimensionar recursos únicamente por crecimiento de usuarios, enfocándose más bien en infraestructura distribuida y antenas de mayor orden.



## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Se concluye que con el diseño y análisis del enlace descendente en un sistema Cell-Free Massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica se logró demostrar que el modelamiento matemático aplicado permitió mejorar la eficiencia espectral bajo diferentes condiciones de infraestructura y carga del sistema en las simulaciones evidenciaron que la configuración que más benefició la eficiencia espectral fue la combinación de  $C = 150$  sitios celulares y  $A = 32$  antenas, alcanzando valores máximos de SE que oscilaron entre 2.1167 y 3.5615 bit/s/Hz, dependiendo de la carga de usuarios. En contraste, las configuraciones de baja capacidad, como  $C = 25$  y  $A = 4$ , apenas lograron valores entre 0.0127 y 0.028 bit/s/Hz, lo que representó una mejora superior al 14000% cuando se incrementó la infraestructura. Además, configuraciones intermedias, como  $C = 100$  y  $A = 16$ , mostraron valores de SE alrededor de 2.1416 bit/s/Hz, lo que confirmó el impacto dominante del número de antenas. Estos resultados demostraron que la SE aumentó de forma casi lineal con la densificación, siendo las combinaciones de mayor infraestructura ( $C = 150$ ,  $A = 32$ ) las que ofrecieron el mejor aprovechamiento espectral en todos los escenarios evaluados.
- En consideración a los resultados obtenidos de forma general, se alcanzó el objetivo de determinar la eficiencia espectral como métrica central del análisis, las simulaciones mostraron que el desempeño del sistema CF-mMIMO dependió principalmente de la capacidad radiada y de la densidad de sitios celulares. Mientras que configuraciones con infraestructura limitada (por ejemplo,  $A = 4$ ,  $C = 25$ ) mostraron SE inferiores a 0.05 bit/s/Hz, los escenarios de mayor densidad (como  $A = 32$ ,  $C = 100-150$ ) alcanzaron valores entre 2.11 y 3.56 bit/s/Hz incluso bajo cargas altas de 300 a 500 usuarios. Aunque el incremento de usuarios redujo ligeramente la pendiente de crecimiento, no impidió que las configuraciones robustas mantuvieran una SE significativamente superior a la de los casos de baja capacidad. En conjunto, el sistema demostró ser altamente escalable, ya que la SE mejoró de manera consistente al aumentar antenas y sitios celulares, confirmando que la infraestructura distribuida fue el factor decisivo para maximizar la eficiencia espectral.
- Se concluyó que en el marco del tercer objetivo planteado de evaluar el rendimiento del sistema CF-mMIMO en distintas topologías de red, las simulaciones abarcaron escenarios equivalentes a un estadio de gran aforo, con barridos completos de  $C = 25-150$  sitios celulares,  $A = 4-32$  antenas por AP y cargas entre 100 y 500 usuarios dichos resultados obtenidos en el presente estudio determinaron una perspectiva técnica y operativa de la eficiencia espectral (SE) en sistemas Cell-Free Massive MIMO en enlace descendente, donde esta dependió principalmente de la

infraestructura desplegada y no del número de usuarios simultáneos presentes en la red. Mediante el análisis estadístico ANOVA ( $p\text{-valor} \leq 0.05$ ) y el análisis post-hoc se demostró que los factores con mayor impacto significativo fueron el número de sitios celulares (C) y el número de antenas por punto de acceso (A), evidenciándose que la densificación de nodos y la incorporación de mayores arreglos de antenas generaron incrementos sustanciales y sostenidos en la SE. Para los operadores, esto representó una directriz clara: priorizar redes ampliamente distribuidas y con alta capacidad radiada antes que sobredimensionar recursos por crecimiento de usuarios, ya que la carga (U) no mostró una influencia estadística relevante bajo los escenarios evaluados. En términos prácticos, adoptar arquitecturas con más C permitió maximizar el aprovechamiento espectral, mejorar la robustez del enlace descendente y garantizar una mayor calidad de servicio, incluso en entornos de alta demanda. Este análisis constituyó una base estratégica para la planificación y modernización de redes avanzadas, orientando la inversión hacia infraestructura inteligente que respondió a las necesidades operativas reales del sector de las telecomunicaciones.

## 5.2 Recomendaciones

- Desde una perspectiva operativa priorizar la densificación de la infraestructura tanto en el número de sitios celulares (C) como en el número de antenas por punto de acceso (A)— debido a que estos factores demostraron ser los principales determinantes de la eficiencia espectral. Las simulaciones mostraron que combinaciones como  $C = 150$  y  $A = 32$  permitieron superar los 2.1–3.5 bit/s/Hz, mientras que configuraciones reducidas ( $C = 25$ ,  $A = 4$ ) no superaron 0.05 bit/s/Hz. Por tanto, cualquier despliegue real debería orientar su inversión hacia una arquitectura distribuida y con capacidad radiada suficiente para garantizar robustez en escenarios de alta demanda.
- Se puede utilizar otros métodos como utilizar el machine learning para poder refinar los resultados especialmente en la parte gráfica de los datos; estas técnicas permiten identificar patrones ocultos y optimizar la interpretación visual.
- Se recomienda aplicar técnicas de beamforming apoyadas en inteligencia artificial, ya que ayudan a dirigir mejor las señales hacia los usuarios y reducir la interferencia. Esto mejora tanto la cobertura como la calidad de la señal (SINR), especialmente en lugares con muchos usuarios conectados al mismo tiempo. Además, como se trata de una tecnología inteligente, lo ideal es implementarla de forma gradual para que pueda adaptarse y escalar según crezca la red.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] X. Shi, Y. Zhang, X. Li, and L. Chen, "Evaluation of performance of space limited MIMO antenna using a specialized MIMO system," in *2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, IEEE, Jul. 2016, pp. 329–330. doi: 10.1109/APCAP.2016.7843227.
- [2] J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai, and L. Hanzo, "Cell-free massive MIMO: A new next-generation paradigm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99878–99888, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930208.
- [3] L. Tello Oquendo, I. F. Akyildiz, S. C. Lim, and P. Vicent, "SDN-based architecture for providing reliable Internet of Things connectivity in 5G systems," *Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop de 2018*, vol. 17, pp. 1–8, Jun. 2018.
- [4] D. Prado-Alvarez, D. Calabuig, J. F. Monserrat, S. Bazzi, and W. Xu, "Study of clustering solutions for scalable cell-free massive MIMO," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 26703–26711, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3255828.
- [5] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 7, pp. 4247–4261, Jul. 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2020.2987311.
- [6] G. Vallejo and T. S. Tommy, *Diseño de un sistema de antenas MIMO para una plataforma de un UAV usando modos característicos para mejorar los parámetros de transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz*, Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2025.
- [7] B. A. Merino Lluay, *Estudio y evaluación del rendimiento de las técnicas MIMO y BEAMFLEX para diseño de una red inalámbrica para el campus norte de la Universidad Nacional de Chimborazo*, Trabajo de Titulación, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 30-sep-2022.
- [8] S. Chen, J. Zhang, E. Björnson, J. Zhang, and B. Ai, "Structured massive access for scalable cell-free massive MIMO systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 4, pp. 1086–1100, Apr. 2021, doi: 10.1109/JSAC.2020.3018836.
- [9] J. Barzola and F. Guailacela, *Simulación de sistemas MIMO multi-usuario vía procesamiento de señales: diagonalización de bloques*, Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador, 5-mar-2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/9115>

- [10] Ö. T. Demir, E. Björnson, and L. Sanguinetti, "Foundations of user-centric cell-free massive MIMO," *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 14, no. 3–4, pp. 162–472, Jan. 2021. doi: 10.1561/20000000109.
- [11] L. Romá, *Cell-free Massive MIMO en sistemas 5G*, Escola Politècnica Superior, Universitat de les Illes Balears, Palma, España, p. 3, 2 de julio de 2018.
- [12] B. Rodríguez-Ventosa Suárez, *Análisis de las pérdidas de eficiencia por estima de canal en un sistema MIMO Masivo en un entorno multiusuario/multicelda: Simulación y diseño de un caso práctico*, Univ. Politéc. de Madrid, España, p. 4, 2018.
- [13] R. Chataut and R. Akl, "Massive MIMO systems for 5G and beyond networks: Overview, recent trends, challenges, and future research direction," *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2753, 2020. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/s20102753>
- [14] H. A. Ammar, R. Adve, S. Shahbazpanahi, G. Boudreau, and K. V. Srinivas, "User-Centric Cell-Free Massive MIMO Networks: A Survey of Opportunities, Challenges and Solutions," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 24, no. 1, pp. 611–652, 2022, doi: 10.1109/COMST.2021.3135119.
- [15] Z. H. Shaik, E. Björnson, and E. G. Larsson, "Cell-free massive MIMO with radio stripes and sequential uplink processing," Mar. 2020. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2003.02940>.
- [16] A. Sainz-Ezquerria Benito, "Simulación en Matlab de la desincronización de la señal LTE en el enlace descendente," 2014.
- [17] R. Roumenov Krastev, "Diseño de un simulador de enlace satelital: análisis y solución de no linealidades mediante técnicas de predistorsión," 2019.
- [18] A. R. Barrios Ulloa, "Análisis comparativo de modelos de propagación para el enlace descendente en redes hspa+ en áreas urbanas y suburbanas: caso estudio Barranquilla," 2015.
- [19] A. P. Carrillo, "Diseño de un sistema de radio sobre fibra óptica para ondas milimétricas en redes móviles 5G," M.S. thesis, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2018.
- [20] O. S. Díaz Durán and C. R. Egas Acosta, "Programa NET-VSAT para el análisis y diseño de una red de estaciones VSAT que utilice satélite INTELSAT VII OK," 1997.
- [21] H. Q. Ngo, "Cell-free massive MIMO: New concept", Ellintech.se. [En línea]. Disponible en: <https://ma-mimo.ellintech.se/2016/11/14/cell-free-massive-mimo-new-concept/>. [Consultado: 28-ene-2025].

- [22] J. A. Portilla Sánchez and M. D. Torres Padilla, “Análisis del rendimiento de la técnica de reducción de la PAPR OPS-SAP para comunicaciones LTE en el enlace descendente,” B.S. thesis, Quito, Ecuador, 2019.
- [23] “Onda milimétrica”, Hualianxingtong.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.hualianxingtong.com/es/what-is-millimeter-wave>. [Consultado: 28-ene-2025].
- [24] J. Kassam, D. Castanheira, A. Silva, R. Dinis, and A. Gameiro, “A Review on Cell-Free Massive MIMO Systems,” Feb. 01, 2023, MDPI. doi: 10.3390/electronics12041001.
- [25] Z. H. Shaik, E. Björnson, and E. G. Larsson, “Cell-Free Massive MIMO With Radio Stripes and Sequential Uplink Processing,” Mar. 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2003.02940>
- [26] C. Valdivieso Taborga, R. Castellón, and O. Valdivieso, “Determinación del tamaño muestral mediante el uso de árboles de decisión,” I & D, UPB, vol. 11, no. 1, pp. 148–177, 2011.
- [27] M. Sande and G. Binini, “A Deep Learning-Based Channel Estimation Scheme for Cell-Free Massive MIMO Systems,” *South African Institute of Electrical Engineers Journal*, vol. 116, no. 4, pp. 160–168, Dec. 2025.
- [28] G. Femenias and F. Riera-Palou, “Cell-Free Millimeter-Wave Massive MIMO Systems With Limited Fronthaul Capacity,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44595–44612, Apr. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908688
- [29] D. Prado Álvarez, *Study of Feasible Cell-Free Massive MIMO Systems in Realistic Indoor Scenarios*, Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/191375>
- [30] E. Mora Herrero, “Análisis del fenómeno de hardening en sistemas MIMO masivo concentrado y distribuido en la banda de 26 GHz,” M.Sc. thesis, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, 2024.
- [31] Cisco Systems, “Cisco and Real Madrid Team Up to Power Europe’s Most Connected Stadium,” *Cisco Newsroom*, Mar. 17, 2022.
- [32] 5G Americas and Small Cell Forum, *Small Cell Siting Challenges and Recommendations*. Bellevue, WA, USA: 5G Americas, Aug. 2018. Available: <https://www.5gamericas.org/small-cell-siting-challenges-and-recommendations/>
- [33] G. Interdonato, E. Björnson, H. Q. Ngo, P. Frenger, and E. G. Larsson, “Ubiquitous cell-free Massive MIMO communications,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2019, no. 197, pp. 1–13, 2019

## ANEXOS

### Anexo 1. Carta de Compromiso del Director del Proyecto

#### CARTA DE COMPROMISO

Yo, **Luis Patricio Tello Oquendo**, en mi calidad de director del proyecto titulado **"Radio Access neTwork evolution towards 6G for mAssive and low latency services (RATIONAL)"**, bajo la **"RESOLUCIÓN N° 15 - CIV-1-2-2023"** aprobada, me comprometo a brindar asesoría y apoyo la estudiante **Rostty Alexander Lozano Brito** en el desarrollo de su tesis titulada **"Diseño y análisis de un enlace descendente en un sistema cell-free massive MIMO para comunicaciones en la banda milimétrica, utilizando modelamiento matemático para mejorar la eficiencia espectral"**.

Como director del proyecto de investigación se le apoyara al estudiante con datos e información recabada por parte del proyecto de investigación y se le brindara retroalimentación para fomentar el desarrollo de habilidades investigativas y de redacción en e l estudiante

El objetivo principal de esta carta es mantener nuestro compromiso con la difusión activa y efectiva de los resultados obtenidos. Por medio de una ponencia, publicación de un artículo científico en una revista regional, capítulo de un libro de memorias o realizar presentaciones orales de los resultados en conferencias y seminarios pertinentes en mi área de estudio.



LUIS PATRICIO TELLO  
OQUENDO

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo  
TUTOR PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
C.I: 0604235242

Rostty Lozano  
ESTUDIANTE  
C.I. 0606101756

**Anexo 2.** Código del modelamiento matemático desarrollado en el software Matlab donde se realizó las primeras configuraciones de topologías de red.

```
%This Matlab script generates Figure 6(a) and Figure 6(b) in the paper:
%
%Emil Bjornson, Luca Sanguinetti, "Scalable Cell-Free Massive MIMO
%Systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 7, pp.
%4247-4261, July 2020.
%
%Download article: http://arxiv.org/pdf/1908.03119
%
%This is version 1.01 (Last edited: 2020-12-06)
%
%License: This code is licensed under the GPLv2 license. If you in any way
%use this code for research that results in publications, please cite our
%paper as described above.

close all;
clear;

%Select which figure to generate:
%selectSimulationSetup = 1 gives Figure 6(a)
%selectSimulationSetup = 2 gives Figure 6(b)
selectSimulationSetup = 1;

cellSites = [50:5:200];
UE = [100;200];
lUE = length(UE);
lCS = length(cellSites);
results_MMSE_DL = zeros(lUE,1);
for index = 1: lUE


---


%% Define simulation setup

%Number of Monte-Carlo setups
nbrOfSetups = 5; % 5
```



```

%Number of channel realizations per setup
nbrOfRealizations = 5; % 10

if selectSimulationSetup == 1

    %Number of APs per setup
    L = 100;

    %Number of antennas per AP
    N = 10;

elseif selectSimulationSetup == 2

    %Number of APs per setup
    L = 100;

    %Number of antennas per AP
    N = 4;

end

%Number of UEs in the network
K = UE(index);

%Length of coherence block
tau_c = 200;

%Length of pilot sequences
tau_p = 10;

%% Propagation parameters

%Total uplink transmit power per UE (mW)
p = 100;

%Total downlink transmit power per AP (mW)
rho_tot = 1000;

%Prepare to save simulation results
SE_MR_tot = zeros(K,nbrOfSetups);
SE_LP_MMSE_tot = zeros(K,nbrOfSetups);
SE_P_MMSE_tot = zeros(K,nbrOfSetups);
SE_MR_perfect_tot = zeros(K,nbrOfSetups);
SE_LP_MMSE_perfect_tot = zeros(K,nbrOfSetups);
SE_P_MMSE_perfect_tot = zeros(K,nbrOfSetups);

%% Go through all setups
for n = 1:nbrOfSetups

    %Display simulation progress
    disp(['Setup ' num2str(n) ' out of ' num2str(nbrOfSetups)]);

    %Generate one setup with UEs and APs at random locations
    [gainOverNoisedB,R,pilotIndex,D] = generateSetup(L,K,N,tau_p,1);

    %Generate channel realizations with estimates and estimation
    %error correlation matrices
    [Hhat,H,B,C] = functionChannelEstimates(R,nbrOfRealizations,L,K,N,tau_p,pilotIndex,p);

    %Compute the equal power allocation for centralized precoding
    rho_central = (rho_tot/tau_p)*ones(K,1);

    %Compute the power allocation in Eq. (43) for distributed precoding
    rho_dist = zeros(L,K);

```

```

gainOverNoise = db2pow(gainOverNoisedB);

for l = 1:L

    %Extract which UEs are served by AP l
    servedUEs = find(D(l,:)==1);

    %Compute denominator in Eq. (43)
    normalizationAP1 = sum(sqrt(gainOverNoise(l,servedUEs)));

    for ind = 1:length(servedUEs)

        rho_dist(l,servedUEs(ind)) = rho_tot*sqrt(gainOverNoise(l,servedUEs(ind)))/normalizationAP1;

    end

end

%Compute SE using the capacity bound in Proposition 3
[SE_MR,SE_LP_MMSE,SE_MR_perfect,SE_LP_MMSE_perfect,SE_P_MMSE,SE_P_MMSE_perfect] = functionComputeSE_downlink(Hhat,H,D,B,C,tau_c,tau_p,nbrO

%Save the SE values
% SE_MR_tot(:,n) = SE_MR;
% SE_LP_MMSE_tot(:,n) = SE_LP_MMSE;
% SE_P_MMSE_tot(:,n) = SE_P_MMSE;
% SE_MR_perfect_tot(:,n) = SE_MR_perfect;
% SE_LP_MMSE_perfect_tot(:,n) = SE_LP_MMSE_perfect;
% SE_P_MMSE_perfect_tot(:,n) = SE_P_MMSE_perfect;

%Remove large matrices at the end of analyzing this setup
clear Hhat H B C R;

end

results_MMSE_DL(index) = mean(SE_P_MMSE_tot,"all");

end

%% Plot simulation results
figure;
% hold on; box on;
plot(sort(SE_P_MMSE_tot(:)),linspace(0,1,K*nbrOfSetups),'r-.','LineWidth',2);
% plot(sort(SE_LP_MMSE_tot(:)),linspace(0,1,K*nbrOfSetups),'b--','LineWidth',2);
% plot(sort(SE_MR_tot(:)),linspace(0,1,K*nbrOfSetups),'k-','LineWidth',2);
xlabel('Spectral efficiency [bit/s/Hz'],'Interpreter','Latex');
ylabel('CDF','Interpreter','Latex');
legend('P-MMSE (Scalable)','Interpreter','Latex','Location','SouthEast');
% xlim([0 10]);

```

### Anexo 3. Script MATLAB para el Barrido Paramétrico (C, A, U) y Cálculo de la Eficiencia Espectral CF-mMIMO para un enlace descendente.

```
clear; close all; clc; rng(42,'twister');

area_mode = 'square1km';
switch area_mode
    case 'circle1km'
        A_km2 = pi * (1)^2;
        areaSide = 1000 * sqrt(A_km2);
    case 'square1km'
        A_km2 = 1.0;
        areaSide = 1000;
    otherwise
        error('area_mode no reconocido');
end
useArea = true;
area_km2 = A_km2;

tau_c = 200;
tau_p = 20;
p_ul_mw = 100;
rho_perAP_const = 200;

nbrOfSetups = 20;
nbrOfRealizations = 20;

N_list = [4,8,16,32];
L_list = [25:25:150];
K_list = [10:10:500];

total_combinations = numel(N_list) * numel(L_list) * numel(K_list);

results_N = zeros(total_combinations, 1);
results_L = zeros(total_combinations, 1);
results_K = zeros(total_combinations, 1);
results_SE_P05 = zeros(total_combinations, 1);

row_idx = 0;

fprintf('Escenario área: %s | area=%.2f km^2 (lado eq=%.0f m)\n', area_mode, area_km2, areaSide);
fprintf('Potencia por AP constante = %.1f mW\n', rho_perAP_const);
fprintf('Total de combinaciones a simular: %d\n', total_combinations);
fprintf('Pilotos: tau_p=%d\n\n', tau_p);

tStart = tic;
for iN = 1:numel(N_list)
    N = N_list(iN);

    for iL = 1:numel(L_list)
        L = L_list(iL);

        fprintf('\n--- Configuración: N=%d antenas, L=%d cell-sites ---\n', N, L);

        for iK = 1:numel(K_list)
            K = K_list(iK);
            row_idx = row_idx + 1;

            users_per_pilot = ceil(K / tau_p);

            rho_to_pass = rho_perAP_const;

            try
                if useArea
                    allSE = run_DL_PMMSE_once(L,N,K,tau_c,tau_p,p_ul_mw,rho_to_pass, ...
                                                nbrOfSetups,nbrOfRealizations,areaSide);
                else
                    allSE = run_DL_PMMSE_once(L,N,K,tau_c,tau_p,p_ul_mw,rho_to_pass, ...
                                                nbrOfSetups,nbrOfRealizations);
                end
            catch
```

```

        if useArea
            warning('run_DL_PMMSE_once no acepta areaSide; se ejecuta sin área.');
```

`useArea = false;
 allSE = run_DL_PMMSE_once(L,N,K,tau_c,tau_p,p_ul_mw,rho_to_pass, ...
 nbrOfSetups,nbrOfRealizations);

 else
 rethrow(lasterror); %#ok<LERR>
 end
 end

 allSE = allSE(:);
 SE_P05 = prctile(allSE, 5);

 results_N(row_idx) = N;
 results_L(row_idx) = L;
 results_K(row_idx) = K;
 results_SE_P05(row_idx) = SE_P05;

 fprintf(' K=%3d | usuarios/piloto ? %d | SE(95%%)=%.4f bit/s/Hz\n', ...
 K, users_per_pilot, SE_P05);
end
end
end

elapsed = toc(tStart);
fprintf('\n=== Simulación completada en %.1f segundos ===\n', elapsed);

T = table(results_N, results_L, results_K, results_SE_P05, ...
 'VariableNames', {'N_Antenas', 'L_CellSites', 'K_Usuarios', 'SE_95pct_bit_s_Hz'});

T.SE_95pct_bit_s_Hz = round(T.SE_95pct_bit_s_Hz, 4);

disp(' ');
disp('=== Primeras 20 filas de resultados ===');
disp(T(1:min(20,height(T)),:));

outdir = fullfile(pwd, 'Resultados_PMMSE');
if ~exist(outdir,'dir')
 mkdir(outdir);
end

stamp = datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS');
base = sprintf('SE_P05_N%dto%d_L%dto%d_K%dto%d_%s', ...
 min(N_list), max(N_list), min(L_list), max(L_list), ...
 min(K_list), max(K_list), stamp);

excel_file = fullfile(outdir, [base '.xlsx']);

fprintf('\n=== Guardando resultados ===\n');
try
 writetable(T, excel_file);
 fprintf('? Excel guardado en: %s\n', excel_file);
catch ME
 warning('No se pudo escribir Excel: %s', ME.message);
end

mat_file = fullfile(outdir, [base '.mat']);
try
 save(mat_file, 'T', 'N_list', 'L_list', 'K_list', 'tau_c', 'tau_p', ...
 'p_ul_mw', 'rho_perAP_const', 'nbrOfSetups', 'nbrOfRealizations', ...
 'areaSide', 'area_km2', 'area_mode', 'elapsed');
 fprintf('? MAT guardado en: %s\n', mat_file);
catch ME
 warning('No se pudo escribir MAT: %s', ME.message);
end`

**Anexo 4.** Tabla de Resultados de la prueba Post Hoc de Tukey para la Comparación entre Niveles de C, A y U

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: Eficiencia Espectral [SE]						
HSD Tukey						
(I) Sitios Celulares [L]	(J) Sitios Celulares [L]	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
25 C	50 C	-,2522812*	,0584380	,000	-,411980	-,092583
	75 C	-,7847248*	,0584380	,000	-,944423	-,625026
	100 C	-1,0987082*	,0584380	,000	-1,258407	-,939010
	150 C	-1,4136439*	,0584380	,000	-1,573342	-1,253945
50 C	25 C	,2522812*	,0584380	,000	,092583	,411980
	75 C	-,5324435*	,0584380	,000	-,692142	-,372745
	100 C	-,8464270*	,0584380	,000	-1,006125	-,686728
	150 C	-1,1613626*	,0584380	,000	-1,321061	-1,001664
75 C	25 C	,7847248*	,0584380	,000	,625026	,944423
	50 C	,5324435*	,0584380	,000	,372745	,692142
	100 C	-,3139834*	,0584380	,000	-,473682	-,154285
	150 C	-,6289191*	,0584380	,000	-,788618	-,469221
100 C	25 C	1,0987082*	,0584380	,000	,939010	1,258407
	50 C	,8464270*	,0584380	,000	,686728	1,006125
	75 C	,3139834*	,0584380	,000	,154285	,473682
	150 C	-,3149357*	,0584380	,000	-,474634	-,155237
150 C	25 C	1,4136439*	,0584380	,000	1,253945	1,573342
	50 C	1,1613626*	,0584380	,000	1,001664	1,321061
	75 C	,6289191*	,0584380	,000	,469221	,788618
	100 C	,3149357*	,0584380	,000	,155237	,474634
*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.						

**Anexo 5.** Tabla de Resultados de la prueba Post Hoc de Tukey para la Comparación entre Niveles de C, A y U

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: Eficiencia Espectral [SE]						
HSD Tukey						
(I) Antenas [N]	(J) Antenas [N]	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
4 Antenas	8 Antenas	-,2176708*	,0573519	,001	-,365259	-,070083
	16 Antenas	-,5872179*	,0573519	,000	-,734806	-,439630
	32 Antenas	-1,1900250*	,0573519	,000	-1,337613	-1,042437
8 Antenas	4 Antenas	,2176708*	,0573519	,001	,070083	,365259
	16 Antenas	-,3695471*	,0573519	,000	-,517135	-,221959
	32 Antenas	-,9723542*	,0573519	,000	-1,119942	-,824766
16 Antenas	4 Antenas	,5872179*	,0573519	,000	,439630	,734806
	8 Antenas	,3695471*	,0573519	,000	,221959	,517135
	32 Antenas	-,6028071*	,0573519	,000	-,750395	-,455219
32 Antenas	4 Antenas	1,1900250*	,0573519	,000	1,042437	1,337613
	8 Antenas	,9723542*	,0573519	,000	,824766	1,119942
	16 Antenas	,6028071*	,0573519	,000	,455219	,750395
*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.						