



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

Diseño y análisis de la eficiencia espectral de un sistema de comunicación cell-free massive MIMO para transmisión de datos en el enlace ascendente.

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Autor:

Nixon Ruben Grefa Noteno

Tutor:

Ing. Luis Tello Oquendo, PhD.

Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Nixon Ruben Grefa Noteno**, con cédula de ciudadanía **210060935-9**, autor del trabajo de investigación titulado: “**Diseño y análisis de la eficiencia espectral de un sistema de comunicación Cell-Free Massive MIMO para transmisión de datos en el enlace ascendente**”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

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

En Riobamba, el 26 de mayo del 2025.



Nixon Ruben Grefa Noteno

C.I: 210060935-9

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Diseño y análisis de la eficiencia espectral de un sistema de comunicación Cell-Free Massive MIMO para transmisión de datos en el enlace ascendente**”, presentado por **Nixon Ruben Grefa Noteno**, con cédula de identidad número **210060935-9**, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito 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 26 de mayo del 2025.

PhD. Juan Carlos Cepeda Pacheco
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Dr. Manuel Antonio Meneses Freire
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo
TUTOR

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 la eficiencia espectral de un sistema de comunicación Cell-Free Massive MIMO para transmisión de datos en el enlace ascendente**” presentado por **Nixon Ruben Grefa Noteno**, con cédula de identidad número **210060935-9**, 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 26 de mayo del 2025.

Presidente del Tribunal de Grado
PhD. Juan Carlos Cepeda Pacheco



Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Daniel Antonio Santillán Haro



Miembro del Tribunal de Grado
Dr. Manuel Antonio Meneses Freire





CERTIFICACIÓN

Que, **GREFA NOTENO NIXON RUBEN** con CC: 2100609359, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"DISEÑO Y ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ESPECTRAL DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN CELL-FREE MASSIVE MIMO PARA TRANSMISIÓN DE DATOS EN EL ENLACE ASCENDENTE"**, cumple con el 5%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio (**COMPILATIO**), porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 20 de mayo de 2025



Escaneado electrónicamente por:
LUIS PATRICIO TELLO
OQUENDO

Validar electrónicamente en: [www.unach.edu.ec](#)

PhD. Luis Patricio Tello Oquendo
TUTOR(A) TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

Con todo mi corazón, dedico este logro a quienes han sido los pilares fundamentales en esta travesía. A mis padres Ruben Grefa y Gloria Noteno, que en todo momento me motivaron a seguir adelante a nunca rendirme. A mi amada pareja, Cinthia, por su apoyo incondicional en cada paso del camino.

A mis hermanos, por su cariño y respaldo constante, por estar presentes y acompañarme hasta alcanzar este momento. Este logro lleva impreso vuestro amor y aliento.

Gracias por ser parte de esta historia y por inspirarme a alcanzar mi sueño.

AGRADECIMIENTO

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. A mis revisores, les agradezco profundamente por sus valiosas sugerencias y contribuciones que han requerido este trabajo.

Este logro es el fruto del esfuerzo y respaldo de cada uno de ustedes. Gracias, de todo corazón.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
INDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPITULO I.....	15
1.1 Introducción	15
1.2 Planteamiento del problema	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo General	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
CAPITULO II.	18
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 Antecedentes	18
2.2 Sistemas de comunicación inalámbrica.....	19
2.3 Clasificación de las comunicaciones inalámbricas	19
2.4 Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO)	21
2.5 Sistemas Massive MIMO	22
2.6 Sistemas Cell-Free (CF).....	23
2.7 Cell-Free Masive MIMO.....	24
2.8 Time-Division Duplex (TDD).....	25
2.9 Modelo de enlace ascendente (UL).....	26
2.10 Eficiencia Espectral en CF-mMIMO	28
2.11 Minimum Mean Square Error (MMSE).....	29
2.12 Partial MMSE (P-MMSE).....	30
CAPITULO III.	31
3. METODOLOGIA	31
3.1 Tipo y Diseño de la investigación	31
3.1.1 Investigación Bibliográfica	31
3.1.2 Investigación Aplicada.....	31
3.1.3 Investigación de Exploratoria.....	31
3.2 Métodos y técnicas de investigación.....	32
3.2.1 Método Científico	32
3.2.2 Técnica de Recolección de Datos.....	32
3.2.3 Instrumentos de Recolección de Datos	33
3.3 Población.....	33
3.4 Operacionalización de variables.....	33
3.4.1 Variable independiente.....	33
3.4.2 Variable dependiente.....	33

3.5 Procedimiento y Análisis	34
3.5.1 Definición de variables y modelo de red.....	35
3.5.2 Estimación del Canal y Asignación de Pilotos.....	37
3.5.3 Transmisión de Datos en UL.....	37
3.5.4 Cálculo de la Eficiencia Espectral.....	37
3.5.5 Evaluación de Interferencia y Escalabilidad	38
3.5.6 Implementación de P-MMSE Centralizado	38
3.5.7 Parámetros de configuración del algoritmo.....	38
3.5.8 Programación del sistema CF-mMIMO en UL.....	39
CAPÍTULO IV.....	44
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1 Resultados y análisis	44
4.1.1 Resultados y análisis de la SE en función del número de CSs (L).....	44
4.1.2 Resultados y análisis de la SE en función del número de antenas por CS (N)	48
4.1.3 Resultados y análisis de la SE en función del número de UEs.	51
4.2 Análisis Estadístico general de la SE en Sistemas CF-mMIMO en UL.....	53
4.2.1 Análisis de correlación: Relación entre L , N , K y la SE en CF-mMIMO en UL	54
4.2.2 Prueba de Normalidad: Para L , N , K y la SE en CF-mMIMO en UL	55
4.2.3 Análisis ANOVA: Efecto de L , N y K en la SE del sistema CF-mMIMO en UL.....	57
4.2.4 Post-Hoc (Tukey): SE según L , N y K (Grupos) en sistemas CF-mMIMO	57
4.2.5 Análisis de Correlación entre L , N y SE en CF-mMIMO - (K constante).....	60
4.2.6 Prueba de Normalidad: Para L , N y la SE en CF-mMIMO - (K constante)	61
4.2.7 Análisis ANOVA: Efecto de L y N en la SE de CF-mMIMO - (K constante).....	62
4.2.8 Post-Hoc (Tukey): SE según L y N (Grupos) en CF-mMIMO - (K constante).....	62
CAPITULO V.....	65
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
5.1 Conclusiones	65
5.2. Recomendaciones.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS.....	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de multiplicaciones complejas requeridas para un UE genérico	29
Tabla 2. Herramientas e instrumentos para la Recolección de Datos.....	33
Tabla 3. Variables dependiente e independiente del proyecto de investigación	34
Tabla 4. Variables de configuración para el algoritmo CF-mMIMO en UL.....	36
Tabla 5. Parámetros predeterminados de la simulación para el sistema CF-mMIMO.....	39
Tabla 6. Configuración de las variables independientes para el análisis general de la SE en Sistemas CF-mMIMO.	53
Tabla 7. Procesamiento de los datos para el análisis general de la SE en Sistemas CF-mMIMO bajo diversas configuraciones (L, N, K).....	53
Tabla 8. Interpretación del coeficiente de Pearson y el p-valor en la correlación de los parámetros (L, N, K) y SE del sistema CF-mMIMO.	54
Tabla 9. Correlaciones entre los parámetros (L, N, K) y la SE en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL	55
Tabla 10. Interpretación del p-valor en la prueba de normalidad.....	56
Tabla 11. Pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) para la SE según L, N y K en el sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en UL	56
Tabla 12. Análisis ANOVA del efecto de L, N y K en la SE en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL	57
Tabla 13. Comparaciones múltiples post-hoc (Tukey) de la SE entre grupos de L, N y K en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL.....	58
Tabla 14. Correlaciones entre los parámetros (L, N) y la SE en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL para 200 UEs	60
Tabla 15. Test de normalidad de los parámetros L, N y la SE para el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL para 200 UEs.	61
Tabla 16. Análisis ANOVA de la SE entre grupos de L y N en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL para 200 UEs.	62
Tabla 17. Comparaciones múltiples post-hoc (prueba HSD de Tukey) de la SE entre L y N en el sistema CF-mMIMO en UL para 200UEs.....	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Sistemas de comunicación Inalámbrica más comunes	19
Ilustración 2. Clasificación de los sistemas de comunicación Inalámbrica	20
Ilustración 3. Esquema básico del funcionamiento de un sistema MIMO.....	21
Ilustración 4. Esquema general del funcionamiento de un sistema mMIMO.....	22
Ilustración 5. Distribución de Celdas y BS en Redes Celulares Convencionales.....	23
Ilustración 6. Distribución de un sistema Cell-free (CF) con Edge Cloud (EC)	23
Ilustración 7. Sistema CF-mMIMO con Edge Cloud (EC).....	24
Ilustración 8. Representación de dos formas de dividir un bloque de recursos de tiempo/frecuencia entre UL y DL.....	25
Ilustración 9. Esquema del protocolo TDD en bloques de coherencia para Tx en UL y DL.	26
Ilustración 10. Operación de enlace ascendente (UL) en CF-mMIMO.....	26
Ilustración 11. Diagrama de flujo del desarrollo del proyecto de Investigación.	34
Ilustración 12. Sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en UL	36
Ilustración 13. Diagrama de flujo principal sobre la evaluación de la SE en un sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en UL.....	40
Ilustración 14. Diagrama de flujo del algoritmo sobre la configuración del Entorno CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL	41
Ilustración 15. Diagrama de flujo del algoritmo sobre la estimación del canal del sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL	42
Ilustración 16. Configuración 1 para la simulación y evaluación de la SE de un sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL	44
Ilustración 17. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 10 CSs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} UEs.....	45
Ilustración 18. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 20 CSs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} UEs.....	45
Ilustración 19. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 30 CSs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} UEs.....	46
Ilustración 20. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 40 CSs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} UEs.....	47
Ilustración 21. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 1 antena por CS, {10, 20,30, 40} CSs y {10, 20, 30, ..., 100} UEs	48
Ilustración 22. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 4 antenas por CS, {10, 20,30, 40} CSs y {10, 20, 30, ..., 100} UEs	49
Ilustración 23. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 8 antenas por CS, {10, 20,30, 40} CSs y {10, 20, 30, ..., 100} UEs	50
Ilustración 24. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 16 antenas por CS, {10, 20,30, 40} CSs y {10, 20, 30, ..., 100} UEs	51
Ilustración 25. Configuración 2 para la simulación y evaluación de la SE de un sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL	51
Ilustración 26. Resultados: SE vs número de CSs (L) para 200 UEs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} CSs.....	52

Ilustración 27. Media y diagrama de cajas de la SE en función de L (a, b), N (c, d) y K (e, f) en sistemas CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL.	60
Ilustración 28. Media y diagrama de cajas de la SE en función de L (a, b) y N (c, d) en sistemas CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL.....	64

RESUMEN

El crecimiento de las redes inalámbricas y el avance de la tecnología 5G han impulsado la búsqueda de arquitecturas eficientes y escalables. En este contexto, los sistemas *Cell-Free Massive MIMO* (CF-mMIMO) se presentan como una alternativa frente a las redes celulares tradicionales. A diferencia de estas, CF-mMIMO distribuye múltiples sitios celulares (CSs) de forma coordinada sobre determinada área, permitiendo atender simultáneamente a gran cantidad de usuarios (UEs) y reduciendo la interferencia intercelular, mejorando la eficiencia espectral (SE).

Este trabajo se enfoca en el diseño y análisis de la SE de un sistema CF-mMIMO orientado a la transmisión de datos en el enlace ascendente (UL), utilizando el combinador parcial de error cuadrático medio mínimo (P-MMSE) para optimizar la estimación del canal y mitigar interferencias. Se desarrollaron simulaciones en MATLAB, donde CSs y UEs se distribuyen aleatoriamente en un área de 2 km², y cada CS se conecta a una nube perimetral mediante enlaces fronthaul. Se evaluaron diversas configuraciones variando el número de UEs (K), CSs (L) y antenas por CS (N). Los resultados confirman que CF-mMIMO con P-MMSE es una solución escalable y eficiente para redes de próxima generación.

Palabras claves: Redes Inalámbricas, Eficiencia Espectral, Enlace Ascendente, CF-mMIMO, P-MMSE.

Abstract

The rapid growth of wireless networks and the advancement of 5G technology have driven the need for efficient and scalable network architectures. In this context, Cell-Free Massive MIMO (CF-mMIMO) systems have emerged as a promising alternative to traditional cellular networks. Unlike conventional systems, CF-mMIMO deploys multiple cellular sites (CSs) distributed throughout a coverage area, enabling the simultaneous service of a large number of user equipments (UEs) while significantly reducing inter-cell interference and improving spectral efficiency (SE).

This work investigates the design and analysis of the spectral efficiency (SE) of a CF-mMIMO system for uplink (UL) data transmission, employing the Partial Minimum Mean Square Error (P-MMSE) combiner to optimize channel estimation and mitigate interference. Simulations were performed in MATLAB, modeling randomly distributed APs and UEs over a 2 km² area, with each CS connected to an edge cloud via fronthaul links. Various system configurations were evaluated by varying the number of UEs (K), CSs (L), and antennas per CS (N). The results demonstrate that CF-mMIMO with P-MMSE provides a scalable and high-performance solution for next-generation wireless networks.

Keywords: Wireless Networks, Spectral Efficiency, Uplink, Cell-Free Massive MIMO, P-MMSE.



Reviewed by: Cristina Granizo

ID:0605149434

CAPITULO I.

1.1 Introducción

Las comunicaciones inalámbricas han transformado la forma en que las personas y los dispositivos interactúan. En los últimos años, el número de equipos de usuario (*User Equipment*, UEs) que dependen de conexiones inalámbricas ha experimentado un crecimiento exponencial y no se observan indicios de que esta tendencia vaya a cambiar. Este crecimiento se da tanto en altas como en bajas frecuencias; sin embargo, las altas frecuencias son claves para soportar necesidades de ancho de banda y densidad de dispositivos conectados en nuevas aplicaciones [1]. El principal desafío de los sistemas de comunicaciones inalámbricas es ofrecer altas velocidades de transmisión mientras se garantiza un servicio de calidad. En este sentido, se desarrollan constantemente tecnologías que satisfagan estos requerimientos [2].

Las redes de comunicación inalámbricas en la actualidad siguen el modelo celular, esto implica que están conformadas por grupos de celdas en donde cada una cuenta con una estación base (*Base Stations*, BS) que actúa como punto de acceso (*Access Points*, AP) a internet. Cada celda define el área de cobertura proporcionada por su respectiva BS, de modo que los UEs dentro de los límites de la celda reciben servicio directamente de una BS determinada [3]. Es así como UEs con ubicación en diferentes celdas pueden transmitir datos en una misma frecuencia, a esto se lo conoce como reutilización de frecuencia, aunque al desarrollar este proceso se toma el riesgo de obtener interferencia Co-Canal. Esta interferencia se puede reducir estableciendo un perímetro de reutilización, tal como se propone en la implementación de las redes 6G (*sixth generation*), el cual indica la distancia que debe haber entre dos celdas que utilizan una misma frecuencia [4].

La arquitectura celular con reutilización de frecuencia universal, combinada con el empleo de técnicas de múltiples antenas (*Multiple-Input Multiple-Output*, MIMO), ha sido fundamental en la capa física de los estándares actuales. Un sistema masivo de múltiples antenas (*Massive MIMO*, mMIMO) maximiza los beneficios de la diversidad espacial, la cual se obtiene mediante la separación estratégica de las antenas en un entorno sujeto a desvanecimiento multirrayecto. [5]. Las configuraciones empleadas en la implementación de sistemas mMIMO ofrecen ganancia de diversidad, lo que permite mitigar el desvanecimiento de la señal y aumentar la capacidad del sistema, aunque en la actualidad existe otro tipo de arquitectura que mejora ciertos puntos débiles de los sistemas mMIMO [6].

Cell-free (CF) es una nueva arquitectura que se basa en mMIMO y complementa a las redes de comunicaciones inalámbricas convencionales desplegadas hasta el momento. Cell-free massive MIMO (CF-mMIMO) no trabaja con BS centralizadas en cambio tiene como objetivo principal el despliegue de un número grande de estaciones base (o sitios celulares, CSs) de manera distribuida que brindan servicio a UEs desplegados en un área determinada.

Se asume que el número de CSs es mucho mayor que la cantidad de UEs que existe en ese sector [7].

Esta investigación se centra en la ejecución de múltiples simulaciones que posibilitan la evaluación del comportamiento del sistema bajo diferentes configuraciones, modificando parámetros como número de CSs (L), el número de antenas por CS (N) y el número de UEs (K) de un sistema CF-mMIMO, para la eficiencia espectral en la transmisión de datos en el enlace ascendente (*Uplink*, UL).

El documento se encuentra estructurado en cinco capítulos: dentro del Capítulo 1 se puede encontrar el contexto de la investigación, el planteamiento del problema y los objetivos; en el Capítulo 2 se presentan temas como el marco teórico, los conceptos de CF-mMIMO, P-MMSE, propagación inalámbrica y métricas de rendimiento del sistema; el Capítulo 3 contiene la metodología aquí se describen los procedimientos y ecuaciones que fueron utilizadas en el proceso de simulación; a lo largo del Capítulo 4 se esquematizan los resultados y el análisis estadístico de la SE, destacando tendencias y comportamientos del sistema bajo diferentes condiciones configuradas en cada simulación; finalmente, el Capítulo 5 expone las conclusiones y recomendaciones de las posibles líneas de investigación futuras, enfatizando la aplicabilidad de los hallazgos en el diseño y optimización de redes CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL.

1.2 Planteamiento del problema

Las comunicaciones inalámbricas pueden ser concebidas como un servicio esencial en la actualidad, pues impulsan la conectividad global que abarca desde redes móviles y el Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) hasta aplicaciones de gran relevancia como la telemedicina y la automatización industrial. La demanda de transmisión de datos crece diariamente en gran medida, impulsada principalmente por el aumento de UEs conectados y el consumo de contenido multimedia, las redes inalámbricas afrontan el desafío de mantener una alta calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS), velocidad y capacidad [8].

Las arquitecturas convencionales de redes celulares enfrentan serias limitantes a causa de entornos con una densidad de UEs elevada, dificultades como la interferencia intercelular, la baja eficiencia espectral (métrica importante en la transmisión de datos, *Spectral Efficiency*, SE) y la saturación del espectro disponible, reducen la capacidad de las redes para gestionar de manera eficaz el tráfico de datos y mantener una QoS adecuada en áreas altamente pobladas [9].

La arquitectura CF-mMIMO, surge como una alternativa para mejorar la SE, aquí múltiples antenas trabajan en conjunto para poder dar servicio a los UEs minimizando las limitaciones de las celdas tradicionales. Sin embargo, en el caso específico del enlace ascendente, existen varios desafíos que deben ser superados, como el manejo eficiente de la interferencia Co-Canal, la coordinación y procesamiento centralizado de señales y las limitaciones en la capacidad de los terminales móviles para transmitir con la potencia suficiente. Los factores

descritos generan un impacto directamente en la SE y en la viabilidad de su implementación práctica [10].

Por lo tanto, surge la necesidad de Diseñar y analizar la SE de un sistema de comunicación CF-mMIMO para transmisión de datos en el enlace ascendente, donde los UEs transmiten datos hacia el conjunto de antenas distribuidas en varios CSs, evaluando las posibles ganancias y limitaciones de este enfoque en comparación con las arquitecturas celulares tradicionales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar y analizar la eficiencia espectral de un sistema de comunicación Cell-Free Massive MIMO para transmisión de datos en el enlace ascendente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisar el estado del arte referente a sistemas de comunicación Cell-Free Massive MIMO.
- Determinar la eficiencia espectral en función de la topología de red como métrica de análisis considerando la transmisión de datos en enlace ascendente.
- Diseñar un modelo de simulación del sistema de comunicación Cell-Free Massive MIMO con usuarios desplegados arbitrariamente en el área de cobertura y estaciones base que tienen un número determinado de antenas.
- Evaluar el rendimiento del sistema Cell-Free Massive MIMO en términos de eficiencia espectral para diversas topologías de red (número de usuarios desplegados, número de estaciones base y número de antenas que conforman cada estación base).

CAPITULO II.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Las comunicaciones inalámbricas tomaron relevancia a partir de las décadas de 1970 y 1980, cuando portar dispositivos portátiles y contar con redes de radio se convirtió en una necesidad. En este período, sobresalieron los sistemas de matriz solitaria, lo que limitó la capacidad y el alcance de las redes. Sin embargo, para perfeccionar la propagación de la señal y protegerla ante interrupciones, surgió la premisa de explorar estrategias de diversificación de antenas [11].

En la década de 1990, los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) generaron revuelo en el ámbito de las telecomunicaciones. Esta tecnología utiliza múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor para aprovechar la diversidad espacial y optimizar la eficiencia espectral. La comunidad científica ligada a esta tecnología en 1998 demostró que MIMO posee la capacidad de aumentar la tasa de transmisión de datos sin requerir un mayor ancho de banda, lo que la posicionó como una tecnología fundamental en los estándares Wi-Fi y LTE [12].

Con el avance de las redes 4G y los permanentes estudios sobre redes de Quinta Generación (5G), se introdujeron sistemas MIMO masivos como una solución eficaz ante los demandantes requisitos en cuanto a capacidad y eficiencia espectral. Esta tecnología viabiliza el envío y recepción de extensas cantidades de datos en forma simultánea y con alta precisión. Además, ha sido clave para satisfacer las demandas de las redes 5G, que pretenden un aumento significativo en la eficiencia espectral junto con una mayor economía energética [13].

A medida que las limitaciones de las redes celulares tradicionales se hicieron evidentes, particularmente en entornos de alta densidad y áreas urbanas complejas, surgió el concepto de MIMO masivos sin células. Esta tecnología fue planteada como una solución para tratar de minimizar los efectos de la interferencia entre celdas y mejorar la equidad en el acceso de los usuarios. En una arquitectura sin células convergen múltiples *Cell Sites* (CS) que facilitan a los usuarios el acceso a la red sin depender de celdas fijas. Múltiples investigaciones llevadas a cabo en el 2017 destacan por demostrar que los sistemas sin células pueden conseguir avances significativos en la eficiencia espectral y la cobertura en comparación con las redes celulares tradicionales [7].

Las investigaciones recientes sobre MIMO masivo sin células se han centrado en optimizar la eficiencia espectral, especialmente en el enlace ascendente, donde múltiples usuarios transfieren datos a diversos puntos de acceso distribuidos. Estudios han demostrado que, mediante técnicas avanzadas de estimación de canal y tecnologías de procesamiento distribuido, el MIMO masivo sin células puede superar a los sistemas tradicionales en

términos de eficiencia espectral, ofreciendo además una experiencia de usuario más estable [14].

2.2 Sistemas de comunicación inalámbrica

La comunicación inalámbrica es un procedimiento que permite la transferencia de información entre múltiples ubicaciones sin la necesidad de conexiones físicas, como cables o alambres. Este tipo de comunicación se fundamenta en la transmisión de señales electromagnéticas, que utilizan ondas de radio para enviar datos de un punto a otro. Gracias a esta tecnología (Ilustración 1), es posible que una amplia variedad de dispositivos y sistemas, como las redes WLAN (*Wireless Local Area Network*), WWAN (*Wireless Wide Area Network*) y WPAN (*Wireless Personal Area Network*), se conecten e intercambien información de forma eficaz y en tiempo real [12], sin la necesidad de una conexión física directa.

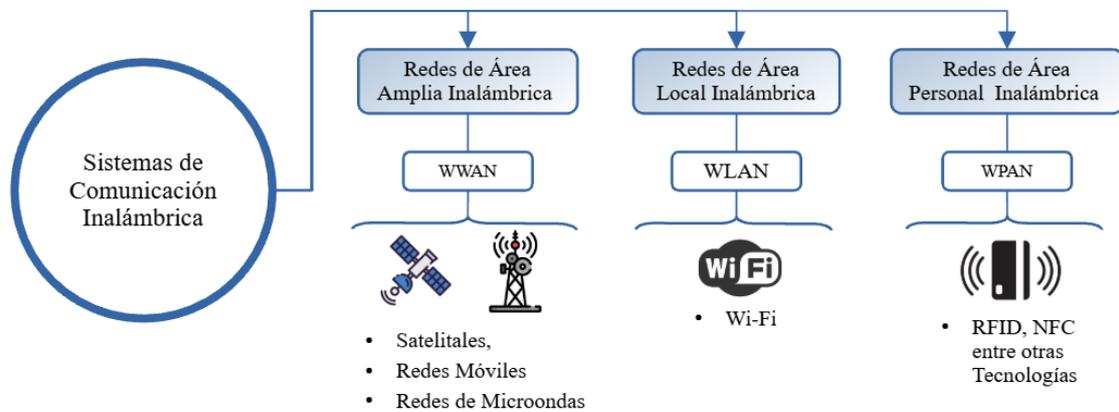


Ilustración 1. *Sistemas de comunicación Inalámbrica más comunes*

Fuente: Autor

Por otra parte, las comunicaciones inalámbricas se constituyen como un ente de alta importancia en las redes modernas, un ejemplo claro es como estas admiten la conectividad de dispositivos móviles con la infraestructura del internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT). La implementación de las comunicaciones inalámbricas ha propiciado avances en áreas como las comunicaciones móviles, el monitoreo remoto y la automatización de procesos, creando entornos dinámicos y accesibles para el intercambio de información [15].

2.3 Clasificación de las comunicaciones inalámbricas

De acuerdo con [16], las comunicaciones inalámbricas se categorizan en función de su alcance y del método de acceso a la red, lo que facilita su adaptabilidad a diversos requerimientos y contextos de conectividad. Esta clasificación permite una mejor comprensión de su aplicación en distintos escenarios, desde redes personales (WPAN) hasta infraestructuras de gran escala (WWAN) [16]. Estas comunicaciones se dividen en las siguientes categorías (Ilustración 2):

- Redes de Área Personal Inalámbrica (WPAN)
- Redes de Área Local Inalámbrica (WLAN)

- Redes de Área Extendida Inalámbrica (WWAN)
- Red de Área Amplia Inalámbrica Fija (FWWAN)
- Red de Área Amplia Inalámbrica Metropolitana (MWWAN)

Las Redes WPAN son sistemas de comunicación de corto alcance diseñadas para la interconexión de dispositivos personales, como teléfonos móviles y auriculares, además, WPAN funcionan mediante el uso de tecnologías como Bluetooth y Zigbee. Estas redes permiten el intercambio de datos y la coordinación entre dispositivos en un entorno cercano (hasta 10 metros), optimizando la interacción del usuario con el dispositivo. Por otro lado, las Redes WLAN permiten la conexión de dispositivos en espacios delimitados (hasta 100 metros), como hogares o entornos laborales, donde WLAN utiliza principalmente la tecnología Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) para brindar flexibilidad y movilidad dentro de un área específica [16].

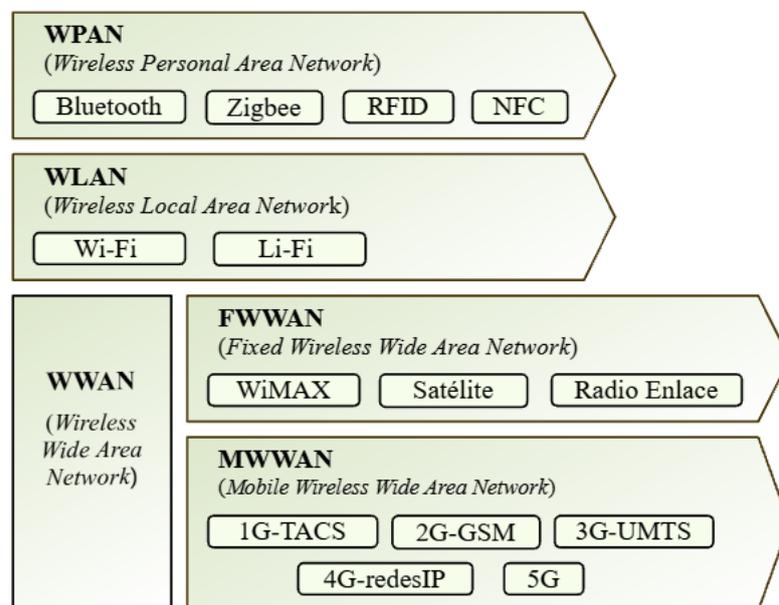


Ilustración 2. Clasificación de los sistemas de comunicación Inalámbrica
Fuente:[17]

Finalmente, las Redes WWAN se caracterizan por que comprenden grandes extensiones geográficas (hasta 50 km), como ciudades o regiones, y estas se encuentran divididas dos categorías. En primer lugar, se tiene la Comunicación Fija (FWWAN), este tipo de comunicación proporciona conectividad inalámbrica para ubicaciones estáticas bajo la gestión de un operador. Por otro lado, se presenta la Comunicación Móvil (MWWAN), este sistema de comunicación posibilita la conexión constante a la red mediante tecnologías como LTE (*Long Term Evolution*) y 5G, garantizando la conectividad en movimiento. Las mencionadas tecnologías son esenciales para la movilidad moderna, ya que toleran aplicaciones críticas y servicios en tiempo real. Además, se adaptan a las necesidades de los usuarios en constante movimiento [16].

2.4 Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO)

La tecnología MIMO se concibe como un sistema de comunicación inalámbrica que aprovecha múltiples antenas para la transmisión y recepción de datos. Esta tecnología permite la creación de múltiples canales de propagación que mejoran la capacidad del sistema para transmitir y recibir información de manera simultánea.

Una de las características más importantes de MIMO es el potencial para incrementar la capacidad del sistema, favoreciendo así a la SE sin requerir una ampliación en el ancho de banda (*Bandwidth*, BW) ni aumentando el consumo de energía en la transmisión de datos [18].

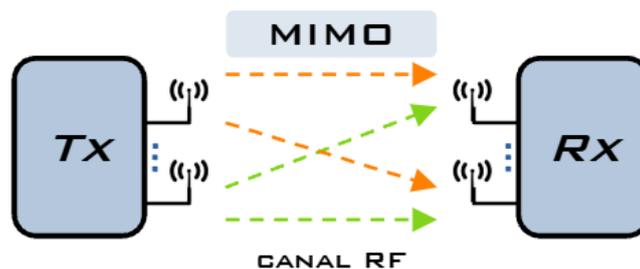


Ilustración 3. Esquema básico del funcionamiento de un sistema MIMO

Fuente: [18]

Además, la tecnología MIMO ayuda a mejorar la confiabilidad del sistema y reduce la tasa de error por bits (*Bit Error Rate*, BER), permitiendo así comunicaciones más robustas frente a interferencias y condiciones adversas del canal. El funcionamiento y límites de desempeño de MIMO están regidos por el Teorema de Shannon que establece el límite máximo de información que puede ser transmitida de forma segura a través de un canal con ruido [18]. En términos matemáticos, la capacidad del canal se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

Donde:

C: Capacidad del canal [bps].

BW: Ancho de banda del canal [Hz].

SNR: Relación señal-ruido.

Esta capacidad hace que MIMO sea un componente crucial en el progreso de las redes 5G, ya que responde a la creciente demanda de la SE en esta tecnología. Al gestionar de manera efectiva la propagación multi-camino, MIMO aprovecha mejor el espectro radioeléctrico y optimiza el desempeño de la red en diferentes bandas de frecuencia. Como resultado, 5G ofrece conexiones más rápidas, estables y eficientes, incluso en entornos con una alta concentración de usuarios [19].

2.5 Sistemas Massive MIMO

Los sistemas MIMO han sido esenciales dentro de las comunicaciones inalámbricas modernas, posibilitando una mayor SE y eficiencia energética. No obstante, el aumento exponencial de equipos de usuario (UEs) y dispositivos IoT ha provocado una gran demanda de datos e información, superando la capacidad de las tecnologías MIMO tradicionales.

Para enfrentar este desafío, MIMO masivo (*Massive MIMO*, mMIMO) emerge como una alternativa de solución significativa en las redes 5G y futuras generaciones [20].

mMIMO que se esquematiza en la (Ilustración 4), es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para mejorar significativamente la SE en redes celulares. Su funcionamiento se fundamenta en el uso de acceso múltiple por división de espacio (*Space-Division Multiple Access*, SDMA), esto viabiliza que múltiples UEs compartan simultáneamente mismos recursos de tiempo y frecuencia, maximizando así la capacidad del sistema.

Una característica clave de mMIMO es la utilización de varios CSs, superando ampliamente la cantidad de usuarios dentro de una celda. Esto posibilita un control eficiente de interferencias, lo que se traduce en la mejora del QoS. A medida que se incrementa la cantidad de UEs en una celda, la infraestructura debe actualizarse proporcionalmente para incluir más antenas y no afectar el rendimiento del sistema [21].

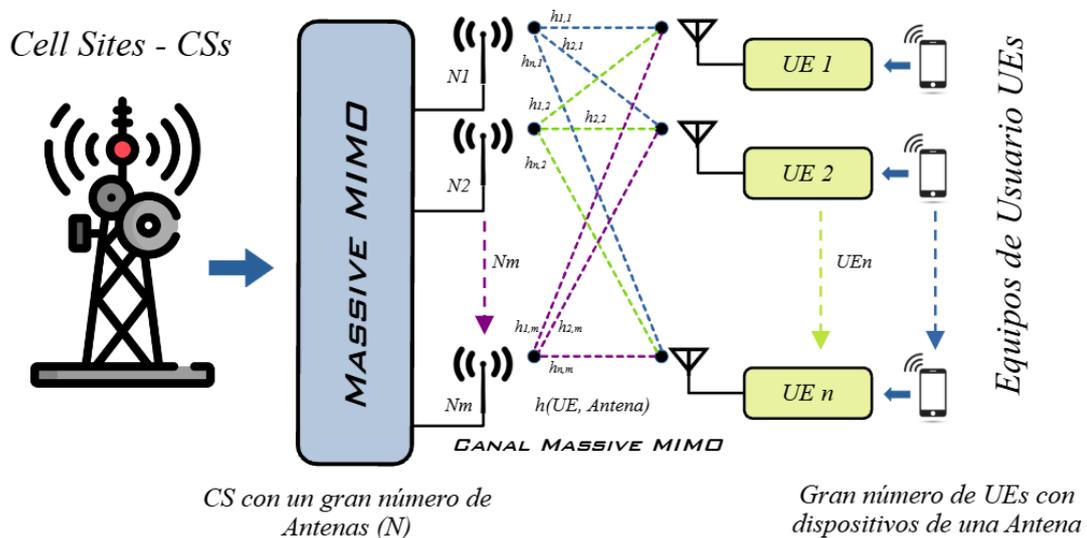


Ilustración 4. Esquema general del funcionamiento de un sistema mMIMO

Fuente: [22]

Otra característica fundamental de mMIMO es su operación en modo dúplex por división de tiempo (*Time-Division Duplex*, TDD), que reduce la sobrecarga en la adquisición de información del estado del canal (*Channel State Information*, CSI) y su vez, disminuye la dependencia de modelos de canales parametrizables. Este enfoque permite una adaptación más eficaz a las condiciones variables del entorno de comunicación. De este modo, mMIMO

se alinea con estos principios de diseño, posicionándose como una de las soluciones más eficaces para optimizar la SE en redes celulares de nueva generación. [21].

2.6 Sistemas Cell-Free (CF)

El sistema Cell-Free (CF) es una arquitectura de red inalámbrica avanzada que representa un salto significativo con respecto a las redes celulares convencionales. A diferencia de estas redes, CF elimina las celdas (Cell-N) tradicionales y distribuye las CS (o BS) 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 CS centralizada que gestiona la comunicación en su área, como se muestra en la (Ilustración 5).

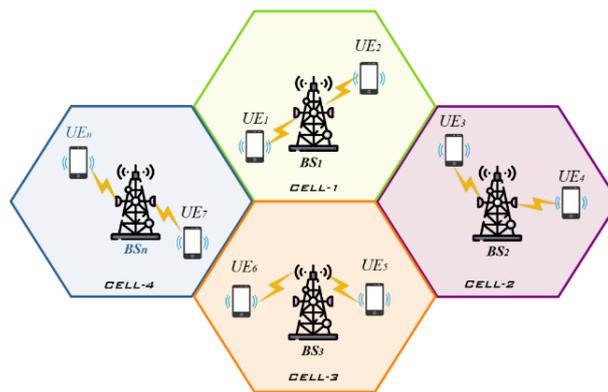


Ilustración 5. Distribución de Celdas y BS en Redes Celulares Convencionales

Fuente: [23]

En cambio, el sistema CF (Ilustración 6) 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. Esto ofrece una mayor flexibilidad, escalabilidad y uniformidad en la conectividad, optimizando el rendimiento y la cobertura en entornos de alta densidad de UEs [24].

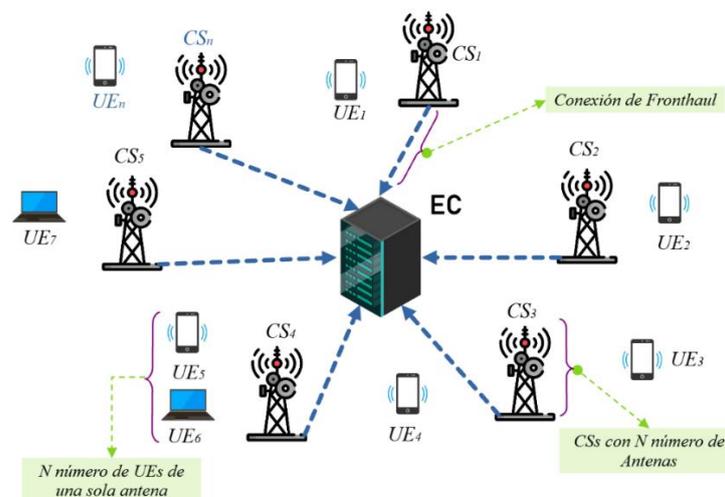


Ilustración 6. Distribución de un sistema Cell-free (CF) con Edge Cloud (EC)

Fuente: [23]

Además, para gestionar de manera eficaz la arquitectura CF, es importante poseer capacidad de procesamiento próximo a los UEs. En tiempos pasados, este procesamiento se desarrollaba en unidades centrales de procesamiento (CPU) ubicadas en servidores centralizados. Sin embargo, con la integración de *Edge Cloud* (EC), el procesamiento se traslada a nodos distribuidos en el borde de la red, lo que facilita la ejecución de tareas de cómputo con menor latencia y mayor eficiencia. Aunque ambos modelos de procesamiento, CPU centralizada y EC cumplen con la misma función de procesar la información y gestionar la comunicación, la computación en el borde se alinea mejor con las redes CF. Esto se debe a que evita la congestión de los servidores centrales y, a su vez, mejora la respuesta en tiempo real [24], lo cual es un aspecto crítico en entornos de alta densidad de usuarios y UEs conectados.

2.7 Cell-Free Masive MIMO

El sistema Cell-Free Masive MIMO (CF-mMIMO) figura como una evolución tecnológica más allá de las comunicaciones 5G, CF-mMIMO se propone como un diseño de conectividad y funcionalidad mejorada en entornos de alta densidad de UEs. A diferencia de las arquitecturas celulares convencionales, donde los UEs son atendidos por una única CS, en CF-mMIMO se dispone de múltiples CSs ubicados de manera estratégica para servir a los diferentes UEs de manera simultánea, de esta forma se eliminan los límites celulares y se garantiza un QoS uniforme [25]. Por lo tanto, CF-mMIMO se basa en la cooperación entre CSs (*número de CSs, L*), que están conectados a una EC mediante enlaces de fronthaul y backhaul, lo que permite una gestión dinámica de los recursos y una reducción significativa de la interferencia intercelular. Además, al situar a los UEs en el centro de un clúster de CSs, se mejora la fuerza de la señal y se optimiza la SE, superando las limitaciones de los sistemas convencionales, donde los UEs en los bordes celulares experimentan una QoS degradada debido a la distancia y la interferencia [26].

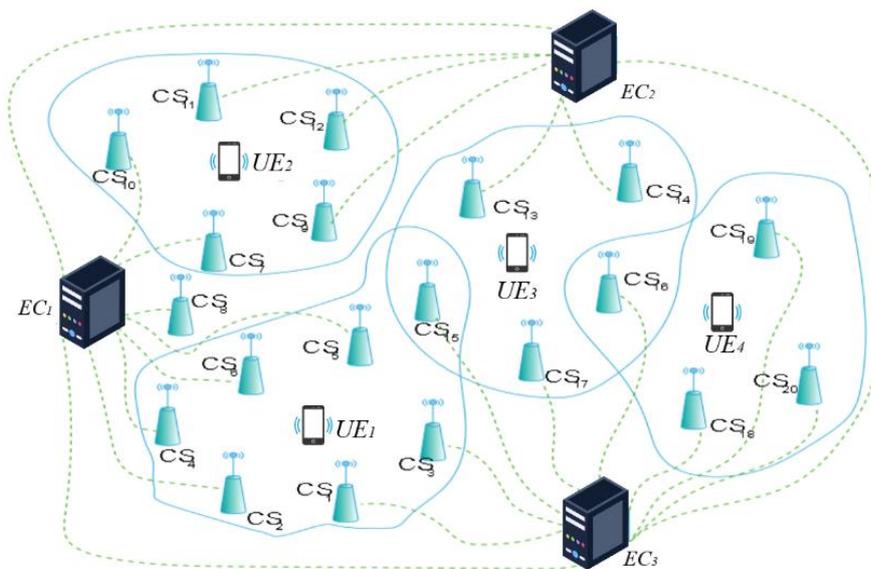


Ilustración 7. Sistema CF-mMIMO con Edge Cloud (EC)

Fuente: [25]

La arquitectura CF-mMIMO (Ilustración 7) se puede clasificar en tres categorías según el grado de centralización: centralizada, descentralizada y parcialmente centralizada. En la primera categoría, la EC realiza todas las operaciones de procesamiento, mientras que, en la segunda categoría, los CSs asumen la mayor parte del procesamiento, enviando solo señales fusionadas a la EC. Por último, la tercera categoría combina ambos enfoques, distribuyendo las tareas entre los CSs y la EC [25]. Esta flexibilidad permite adaptarse a diferentes escenarios de implementación, como en escenarios definidos en las redes 5G New Radio (NR), donde se promueve una estrategia distribuida para mejorar la SE y la cobertura. Además, el diseño centrado en el usuario de CF-mMIMO asegura que cada UEs esté siempre rodeado por múltiples CSs, lo que mejora la eficiencia energética, la conectividad y la robustez del sistema, al mismo tiempo que reduce la interferencia entre UEs mediante la coordinación entre CSs [25].

2.8 Time-Division Duplex (TDD)

La técnica de duplexación por división en el tiempo (*Time Division Duplex*, TDD) es altamente importante en los sistemas mMIMO, permite aprovechar la reciprocidad del canal para facilitar la adquisición de CSI. Al contrario de la técnica de duplexación por división de frecuencia (*Frequency Division Duplex*, FDD) (Ilustración 8), TDD multiplexa las transmisiones de enlace ascendente (*uplink*, UL) y descendente (*downlink*, DL) en el mismo bloque de coherencia, optimizando así el uso del espectro. Esta característica no solo reduce la complejidad del sistema, sino que también mejora la SE al minimizar la redundancia en la señalización [27].

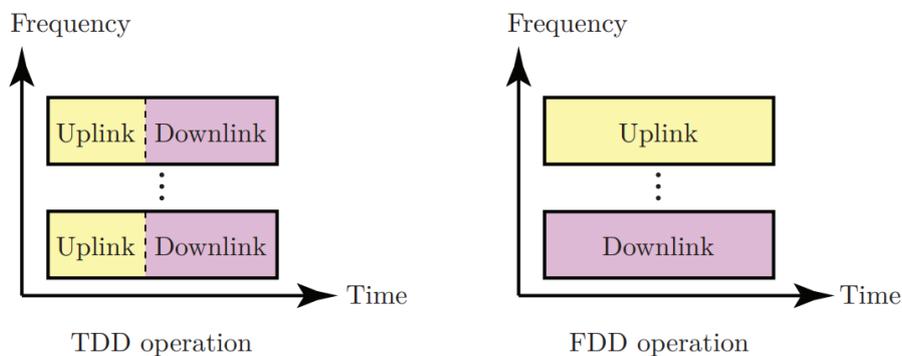


Ilustración 8. Representación de dos formas de dividir un bloque de recursos de tiempo/frecuencia entre UL y DL.

Fuente: [28]

Esta característica del TDD es fundamental en mMIMO, ya que reduce la sobrecarga de entrenamiento de manera más efectiva que en sistemas FDD, lo cual es considerable debido al elevado número de antenas en la BS. Como resultado, el modo TDD es ampliamente preferido en implementaciones mMIMO debido a su menor costo computacional y su mayor SE en el sistema [27].

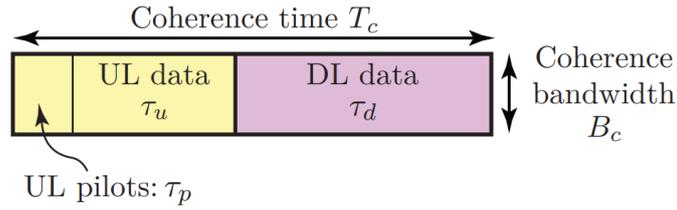


Ilustración 9. Esquema del protocolo TDD en bloques de coherencia para Tx en UL y DL.
Fuente: [28]

Donde:

- τ_p : Símbolos para pilotos de UL;
- τ_u : Símbolos para datos de UL;
- τ_d : Símbolos para datos de DL.

En la (Ilustración 9) se muestra este protocolo TDD, donde los símbolos de transmisión se distribuyen en tres (τ_p, τ_u, τ_d) propósitos distintos bajo la restricción $\tau_c = \tau_p + \tau_u + \tau_d$. Es importante destacar que los pilotos y los datos se transmiten en momentos distintos y que el protocolo TDD está sincronizado entre los puntos de acceso (o CSs) [21].

Para garantizar una transmisión eficiente, los pilotos en el UL deben enviarse antes que los datos en el DL, permitiendo así que la transmisión descendente se precode con base en las estimaciones del canal obtenidas en el UL. No obstante, es posible modificar el orden de las transmisiones de datos en los enlaces ascendente y descendente, o incluso enviar datos en el UL antes de la transmisión de pilotos [21].

2.9 Modelo de enlace ascendente (UL)

En la transmisión de datos en enlace ascendente (*Uplink, UL*), los UEs envían datos y señales piloto hacia la CS, como se ilustra en la (Ilustración 10). En un sistema CF-mMIMO con UL, el CS está equipado con N antenas y se comunica simultáneamente con el número de UEs (K) de una sola antena, donde se cumple la condición $N \gg K$ que aprovecha la ganancia masiva de las antenas [20].

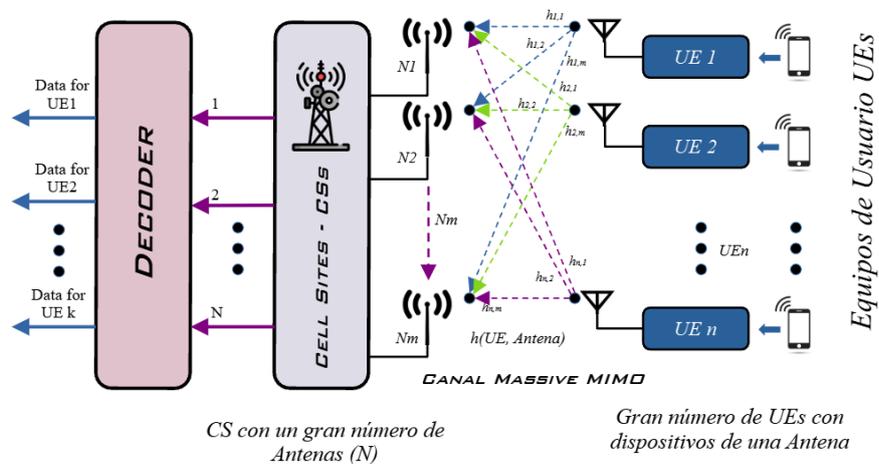


Ilustración 10. Operación de enlace ascendente (UL) en CF-mMIMO.
Fuente: [20]

En el transcurso de la transmisión de datos en el UL, todos los CSs obtendrán una superposición de señales transmitidas por todos los UEs. La señal recibida en el CS l es $\mathbf{y}_l^{ul} \in \mathbb{C}^N$

$$\mathbf{y}_l^{ul} = \sum_{i=1}^K h_{il}s_i + n_l \quad (2)$$

Donde:

k, i, l : Índice de los UEs y CSs,

h_{il} : Representa el canal de comunicación entre el UE i y el CS l ,

$s_i \in \mathbb{C}$: Señal transmitida desde el UE i con potencia p_i ,

$\mathbb{C}^{N \times M}$: Conjunto de matrices de dimensión $N \times M$ de valor complejo,

\mathbb{C}^N : Forma corta de $\mathbb{C}^{N \times 1}$ para representar vectores columna de dimensión N ,

\in, \mathbb{C} : Pertenece y conjunto de los números complejos,

$n_l \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_N)$: Ruido gaussiano complejo circularmente simétrico con media cero y matriz de covarianza $\sigma^2 \mathbf{I}_N$, donde \mathbf{I}_N es la matriz identidad de dimensión $N \times N$.

Con la finalidad de asegurar el claro entendimiento de las expresiones matemáticas es este documento, se determinó estandarizar la notación de la siguiente manera:

- Para las matrices se empleó el uso de letras en negrita (\mathbf{V}, \mathbf{Y}).
- Los vectores columna se identifican a través de letras minúsculas en negrita (\mathbf{v}, \mathbf{h}).
- Los escalares mediante el uso de letras cursivas ya sean mayúsculas o minúsculas (k, K).
- Y por último los conjuntos de números se representan con letras caligráficas (\mathcal{S}).

Bajo esta notación, el CS l selecciona un vector de combinación de recepción $\mathbf{v}_{kl} \in \mathbb{C}^N$ para el UE k y lo calcula localmente como $\mathbf{v}_{kl}^H \mathbf{y}_l^{ul}$. Luego, la red estima la señal s_k mediante la siguiente expresión:

$$\hat{s}_k = \sum_{l=1}^L \mathbf{v}_{kl}^H \mathbf{y}_l^{ul} \quad (3)$$

Ahora reemplazando \mathbf{y}_l^{ul} la ecuación se expresa como:

$$\hat{s}_k = \left(\sum_{l=1}^L \mathbf{v}_{kl}^H \mathbf{h}_{kl} \right) s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \left(\sum_{l=1}^L \mathbf{v}_{kl}^H \mathbf{h}_{il} \right) s_i + \sum_{l=1}^L \mathbf{v}_{kl}^H \mathbf{n}_l \quad (4)$$

Donde:

$\mathbf{v}_k = [\mathbf{v}_{k1}^T \dots \mathbf{v}_{kL}^T]^T \in \mathbb{C}^M$: Representa el vector de combinación colectiva

$\mathbf{n} = [\mathbf{n}_1^T \dots \mathbf{n}_L^T]^T \in \mathbb{C}^M$: Recopila todos los vectores de ruido del sistema

\mathbf{x}^H : Transpuesta conjugada del vector,

\mathbf{x}^T : Transpuesta del vector.

La principal diferencia entre las redes CF y las redes celulares tradicionales radica en el diseño de los vectores de combinación \mathbf{v}_{kl} . En un entorno CF-mMIMO, cada CS debe basarse preferiblemente en la CSI que puede adquirir localmente durante la fase de transmisión de pilotos, lo que se conoce como CSI local.

2.10 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 UEs. 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 UEs y recursos limitados[29].

La SE en UL se expresa mediante la siguiente ecuación (5), donde se considera la relación señal a interferencia más ruido (SINR) del UE, la fracción de tiempo de coherencia dedicada a la transmisión de datos y la esperanza matemática que captura la variabilidad del canal [10]:

$$SE_k^{(u1,1)} = \frac{\tau_u}{\tau_c} \mathbb{E}\left\{\log_2(1 + SINR_k^{(u1,1)})\right\} \quad (5)$$

Donde:

$SE_k^{(u1,1)}$: Eficiencia espectral del UE k en configuración $(u1,1)$

τ_u : Muestras de datos de UL por bloque de coherencia

τ_c : Número total de muestras por bloque de coherencia

$\mathbb{E}\{x\}$: El valor deseado de una variable aleatoria x .

$\log_2(\cdot)$: Función logarítmica en base 2.

$SINR_k^{(u1,1)}$: SINR del UE k en configuración $(u1,1)$.

Además, la SE depende de la SINR ecuación (6), que se optimiza mediante la coordinación entre múltiples CSs, incluso en entornos con interferencia significativa. La combinación de técnicas como el Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE) y la formación de haces dinámicos permite equilibrar la maximización de la SE con la equidad en la distribución de recursos, asegurando un uso eficiente del espectro en sistemas de comunicaciones avanzados [29].

$$SINR_k^{(u1,1)} = \frac{p_k |\mathbf{v}_k^H \mathbf{D}_k \hat{\mathbf{h}}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i |\mathbf{v}_k^H \mathbf{D}_k \hat{\mathbf{h}}_i|^2 + \mathbf{v}_k^H \mathbf{Z}_k \mathbf{v}_k} \quad (6)$$

Donde:

\mathbf{D}_k : Matriz de selección o agrupamiento (clustering) que indica qué CSs atienden al UE k

$\hat{\mathbf{h}}_i$: Estimación del canal del UE i y todos los CSs

$\hat{\mathbf{h}}_k$: Estimación del canal del UE k y todos los CSs

\mathbf{Z}'_k : Representa la matriz de covarianza del ruido e interferencia

\mathbf{v}_k : Vector de combinación receptora en los CSs para el UE k .

p_k : Potencia de transmisión del UE k

p_i : Potencia de transmisión del usuario interferente $i (i \neq k)$

2.11 Minimum Mean Square Error (MMSE)

En los sistemas CF-mMIMO, la evaluación del canal es primordial para garantizar una comunicación eficiente, entre los métodos empleados para dicho efecto se encuentra el algoritmo de Mínimo Error Cuadrático Medio (*Minimum Mean Square Error*, MMSE), este algoritmo se destaca por su alta precisión, sin embargo, presenta una limitante, su complejidad computacional debido al proceso de inversión de matrices de gran tamaño.

Si bien es cierto los sistemas CF-mMIMO han sido diseñados especialmente para operar bajo la técnica de TDD, el desarrollo de numerosas investigaciones pretende viabilizar su funcionamiento en FDD. Este interés creciente ha impulsado el desarrollo de nuevas estrategias de estimación de canal que buscan optimizar tanto la SE como la carga computacional en escenarios de alta densidad de antenas [20].

También, para optimizar estos procesos, se han desarrollado variantes como el combinador parcial MMSE (P-MMSE), que busca reducir el costo computacional sin comprometer la calidad de la estimación [20].

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

Tabla 1. Número de multiplicaciones complejas requeridas para un UE genérico K en diferentes esquemas de combinación por bloque de coherencia

Fuente: [10]

Esquema	Estimación del Canal	Combinación de cálculo vectorial
MMSE	$(N_{Tp} + N^2)K M_K $	$\frac{(N M_k)^2 + N M_k }{2}K + (N M_k)^2 + \frac{(N M_k)^3 - N M_k }{3}$
P-MMSE	$(N_{Tp} + N^2)P_k M_K $	$\frac{(N M_k)^2 + N M_k }{2}P_k + (N M_k)^2 + \frac{(N M_k)^3 - N M_k }{3}$

Donde:

N : Número total de antenas por CS

K : Número total de UEs en el sistema

M_k : Conjunto de CSs que sirven al UE k

$|M_k|$: Representa la cardinalidad (número de APs en el conjunto M_k)

P_k : Potencia de transmisión asignada al UE k

2.12 Partial MMSE (P-MMSE)

El Combinador Parcial basado en MMSE (*Partial MMSE*, P-MMSE) es un método avanzado de procesamiento de señales empleado en sistemas MIMO y CF-mMIMO. Su objetivo es minimizar el error cuadrático medio (MSE) entre la señal transmitida y la recibida, optimizando así la SINR en el receptor. El P-MMSE se deriva del filtro de Wiener clásico, adaptado para precodificación en canales inalámbricos. Dado un sistema con múltiples UEs y CSs [10], el vector de precodificación $\mathbf{v}_k^{\text{P-MMSE}}$ para el UE k se calcula como:

$$\mathbf{v}_k^{\text{P-MMSE}} = p_k \left(\sum_{i \in \mathcal{P}_k} p_i \mathbf{D}_k \hat{\mathbf{h}}_i \hat{\mathbf{h}}_i^H \mathbf{D}_k + \mathbf{Z}'_k \right)^\dagger \mathbf{D}_k \hat{\mathbf{h}}_k \quad (7)$$

Donde:

\mathbf{D}_k : Subconjunto de UEs servidos por CS l

$\hat{\mathbf{h}}_i$: Estimación MMSE del canal del UE i .

\mathbf{Z}'_k : Representa la matriz de covarianza del ruido e interferencia

\mathbf{X}^\dagger : Pseudoinversa de \mathbf{X}

P-MMSE ofrece ventajas significativas frente a otras técnicas como el Maximum Ratio (MR), ya que optimiza la combinación de señales para reducir la interferencia inter-usuario, la cual es ignorada por MR. Además, presenta una alta escalabilidad, ya que al considerar únicamente a los usuarios en el subconjunto p_k , su complejidad computacional se mantiene independiente del número total de UEs K , a diferencia del MMSE tradicional. Finalmente, el P-MMSE es altamente adaptable, pudiendo implementarse tanto en esquemas centralizados, donde una CPU procesa todas las señales, como en esquemas distribuidos, donde cada CS calcula su propia combinación de manera local [10].

CAPITULO III.

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo y Diseño de la investigación

El objetivo es diseñar y analizar la eficiencia espectral (SE) de un sistema de comunicación Cell-Free Massive MIMO (CF-mMIMO), enfocado principalmente en la transmisión de datos en el enlace ascendente (UL). Para alcanzar este objetivo, se implementaron diversas metodologías de investigación. Estas metodologías permitieron revisar el estado del arte de los sistemas CF-mMIMO, determinar la SE en función de la topología de red, diseñar un modelo de simulación con múltiples UEs distribuidos arbitrariamente y evaluar el rendimiento del sistema CF-mMIMO bajo diferentes configuraciones de red, como el número de UEs (K), sitios celulares (CSs) y antenas (N) por CSs.

3.1.1 Investigación Bibliográfica

La información utilizada para fundamentar este estudio se centró en la revisión de fuentes científicas, como las revistas IEEE, Scopus, Springer y Wiley, además de libros, artículos académicos, y bases de datos de diversos repositorios académicos. Estas fuentes se sustentaron en su relación con el tema de investigación, la selección de las fuentes empleadas se enfocó en estudios con un máximo de 5 años de antigüedad, esto se lo realizó con la premisa de garantizar la seriedad y actualidad de los datos, además de los enfoques teóricos.

3.1.2 Investigación Aplicada

Esta tesis se realizó bajo el enfoque de investigación aplicada, con este tipo de investigación se posibilita la integración de conocimientos adquiridos durante la etapa de formación académica, a través del diseño y el análisis de un sistema de comunicación CF-mMIMO. El estudio dentro de esta tesis se orientó a la transmisión de datos en el UL, centrándose en el análisis de la SE como un parámetro clave para evaluar el desempeño del sistema CF-mMIMO.

La investigación aplicada también, favorece al proceso de obtención de resultados en el ámbito práctico, ya que benefician al progreso de las telecomunicaciones, especialmente en el diseño y la mejora de redes inalámbricas de próxima generación.

3.1.3 Investigación de Exploratoria

El método de investigación exploratoria permite estudiar fenómenos poco conocidos o escasamente investigados, permitiendo una visión general que sirvió como punto de partida para orientar futuras investigaciones. En esta tesis, fue especialmente útil para el análisis de aspectos emergentes relacionados con los sistemas CF-mMIMO, particularmente en lo que respecta a la SE en la transmisión de datos en UL. Con esto fue posible la identificación de patrones, desafíos y oportunidades de mejora, lo que viabiliza definir con mayor claridad el enfoque para el diseño y análisis del sistema propuesto.

3.2 Métodos y técnicas de investigación

3.2.1 Método Científico

El método científico se emplea con el propósito de establecer relaciones entre diversos fenómenos y hechos, con el fin de generar criterios verificables y fundamentados en torno al tema de investigación. En el presente proyecto, este método permite desarrollar un modelo analítico robusto y definir métodos de aproximación para evaluar el impacto de variar parámetros (CSs, UEs, N) clave en el sistema CF-mMIMO en transmisiones de datos en UL. El estudio se llevó a cabo bajo diversos escenarios simulados, se realizaron diferentes configuraciones de red a modo de replicar condiciones realistas, con el objetivo de medir y evaluar métricas de rendimiento, como la SE, en la transmisión de datos en el UL. Al efectuar dichas configuraciones no solo se permitió validar los resultados, sino también obtener conclusiones sólidas que contribuyen al diseño y optimización de los sistemas CF-mMIMO.

3.2.2 Técnica de Recolección de Datos

En el desarrollo de esta investigación, se aplicó la técnica de observación para analizar el comportamiento del sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL, se utilizó un modelo de simulación que permite el cálculo de la SE bajo diferentes esquemas de combinación (MMSE).

La implementación del código de programación permitió simular varias condiciones en las que se analizaron varios parámetros en los que se incluyen el número de UEs que consiguieron acceder a la red, la cifra de interferencias (coherentes y no coherentes) y la potencia de la señal útil, además se tomaron en cuenta el número de UEs, CSs y N por CSs. Con esto se posibilitó calcular la SE mediante métodos analíticos y comparar el rendimiento del sistema en diversos escenarios, todo 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 CF-mMIMO

3.2.3 Instrumentos de Recolección de Datos

La siguiente tabla 2 se especifican las herramientas que se utilizarán en el desarrollo de este proyecto de investigación.

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
Artículos Científicos	Especificación sobre canales físicos y modulaciones utilizadas en sistemas MIMO y su aplicación en redes CF.
Artículos Científicos	Análisis del rendimiento de sistemas CF-mMIMO en escenarios con múltiples usuarios y alta densidad de UEs.
Artículos Científicos	Estudios sobre esquemas de combinación (MR, MMSE, LP-MMSE) y su impacto en la SE de sistemas CF-mMIMO
Software Matlab	Herramienta para la implementación del modelo de simulación del sistema CF-mMIMO, incluyendo el cálculo de la SE.

3.3 Población

La población del estudio está conformada por el conjunto total de datos generados a partir de las simulaciones del sistema CF-mMIMO, considerando diversas configuraciones de sitios celulares (CSs) (10,20,30,40), número de antenas (1,4,8,16) por CS y equipos de usuario (UEs) (100, 200) dentro de una zona de cobertura determinada. Estas simulaciones producen valores de eficiencia espectral (SE), que constituyen la variable de interés central en el análisis de rendimiento.[23].

3.4 Operacionalización de variables

3.4.1 Variable independiente

La topología de la red describe su composición, incluyendo la disposición de los nodos y las líneas de conexión, lo cual permite definir el número de UEs, la cantidad de CSs y el número de antenas asignadas a cada CS.

3.4.2 Variable dependiente

La eficiencia espectral (SE) del sistema de comunicación CF-mMIMO en la transmisión de datos en enlace ascendente (UL).

La Tabla 3 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 3. Variables dependiente e independiente del proyecto de investigación

Fuente: Autor

Tipo	Variables	Concepto	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Independiente	Topología de red	Composición de red: nodos, conexiones, dispositivos de usuario (UEs), sitios celulares (CSs) y antenas	Número de UEs (K) Número de CSs (L) Número de Antenas por CSs (N)	Observación directa mediante un modelo de simulación en Matlab del mecanismo SE en la transmisión de datos en enlace ascendente (UL), aplicado a un escenario CF-mMIMO
Dependiente	Eficiencia espectral (SE)	Cantidad de datos que el sistema puede transmitir de manera eficiente en un ancho de banda específico.	Medida de eficiencia espectral, se expresa generalmente en bits por segundo por Hertz [$bit/s/Hz$].	

3.5 Procedimiento y Análisis.

El diseño y análisis de la SE de un sistema de comunicación CF-m MIMO para la transmisión de datos en el UL, se establecen cuatro etapas (Ilustración 11) como se detalla a continuación:

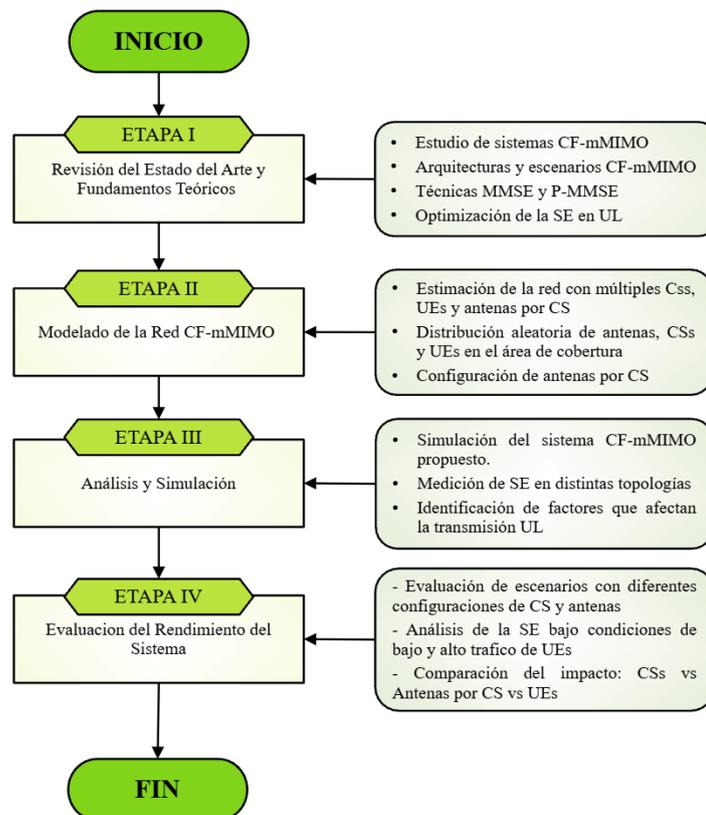


Ilustración 11. Diagrama de flujo del desarrollo del proyecto de Investigación.

Fuente: Autor

ETAPA I. Se realizó un análisis detallado del estado del arte sobre sistemas de comunicación Cell-Free Massive MIMO (CF-mMIMO), enfocado en la optimización de la eficiencia espectral (SE) en la transmisión de datos en el enlace ascendente (UL). Se revisaron modelos teóricos, arquitecturas distribuidas de red y estrategias de procesamiento cooperativo. Asimismo, se estudiaron algoritmos avanzados de estimación y detección, destacando el MMSE y su variante con P-MMSE, los cuales fueron identificados como técnicas robustas para mitigar la interferencia y mejorar el rendimiento de sistemas distribuidos.

ETAPA II. En esta etapa se desarrolló el modelo simulación dentro del software Matlab para la red CF-mMIMO, en el modelo desarrollado se consideraron aspectos importantes como, múltiples CSs cada una dotada con varias antenas y cantidad de UEs definidas, las CSs fueron distribuidas aleatoriamente en un área geográfica de cobertura de acuerdo con el modelo de distribución cell-free (CF). Asimismo, aspectos clave del canal inalámbrico como el desvanecimiento plano Rayleigh, pérdida por trayecto (*pathloss*) y variaciones provocadas por la distancia se incorporaron. Otro punto importante para destacar es la consideración del canal como de estado imperfecto a través de estimación con errores de correlación espacial, valorando su impacto en el rendimiento global.

ETAPA III. Aquí la SE, se evaluó bajo distintos escenarios topológicos y configuraciones de red como métrica principal de desempeño del sistema CF-mMIMO en el UL, bajo distintos escenarios topológicos y configuraciones de red. También se incorporaron técnicas de precodificación y detección lineal (P-MMSE), evaluando su impacto bajo distintos niveles de correlación del canal y ruido térmico. Con la simulación se analizaron los efectos del número de CSs, el número de antenas por CS, y la densidad de UEs, esto permitió observar las ganancias en SE como resultado del procesamiento distribuido y la cooperación entre CSs.

ETAPA IV. En esta etapa se valoró el rendimiento de la red CF-mMIMO mediante análisis estadístico de la SE, considerando configuraciones con un número fijo de UEs y distintas combinaciones de CSs y antenas. Para determinar la significancia de las variaciones de SE en función de la arquitectura de red, se aplicaron pruebas estadísticas paramétricas, como el análisis de varianza (ANOVA), debido a la normalidad de los datos.

Adicionalmente se efectuaron análisis de tipo post-hoc (Tukey) con la finalidad de realizar comparaciones por pares y con esto identificar configuraciones que maximicen la SE. Finalmente, el comportamiento del sistema se analizó bajo condiciones de alta carga, revelando que la densificación de antenas en las CS individuales ofrece mayores beneficios que el incremento del número de CS adicionales.

3.5.1 Definición de variables y modelo de red

A continuación, se presenta el proceso y desarrollo del modelo de simulación que nos permitirá evaluar la SE de un sistema de comunicación CF-mMIMO para la transmisión de

datos en el UL. En primer lugar, en esta sección se detallan las variables y notaciones principales del presente proyecto (Tabla 4).

Tabla 4. Variables de configuración para el algoritmo CF-mMIMO en UL

Fuente: Autor

Notación	Definición
K, L, N	Número de: UEs, CSs y antenas por CS
τ_p	Número de secuencias piloto ortogonales
k, i	Índice de los UEs
l, j	Índice de los CSs
t_k	Índice de la señal piloto asignada al UE k
D_l	Subconjunto de UEs servidos por CS l
S_k	Subconjunto de UEs que comparten el piloto t_k , incluyendo al UE k
\mathbf{h}_{kl}	Respuesta del canal entre UE k y CS l
$\hat{\mathbf{h}}_{kl}$	Estimación del canal de \mathbf{h}_{kl}
\mathbf{v}_{kl}	Vector de combinación asignado por el CS l al UE k
\mathbf{w}_{kl}	Vector de precodificación asignado por el CS l al UE k
$^T, ^*, ^H$ y †	Transpuesta, conjugada, transpuesta conjugada y pseudoinversa,

En segundo lugar, se considera un escenario donde los CS y UEs se distribuyen aleatoriamente en un área de 2×2 km², donde cada CS se conecta a un Edge Cloud (EC) a través de enlaces fronthaul. También, cada operación se realiza en modo TDD (*Time Division Duplex*), incluyendo el algoritmo *Partial Minimum Mean-Squared Error* (P-MMSE) tanto para la estimación del canal como para el procesamiento de señales en el sistema CF-mMIMO centralizado. Todo este modelo descrito, será implementado en el software de cálculo matemático MATLAB.

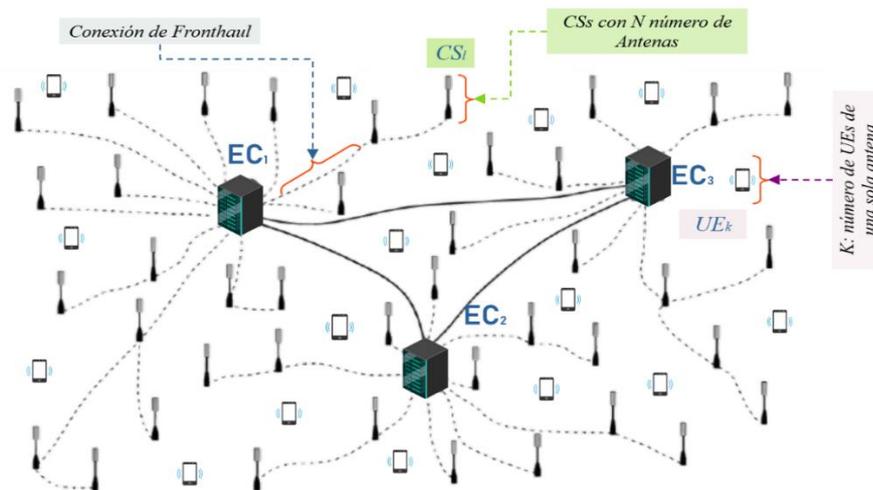


Ilustración 12. Sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

3.5.2 Estimación del Canal y Asignación de Pilotos

- **Asignación de Pilotos**

El primer lugar, se estima los canales de comunicación entre los UEs y CS. Para ello, se utiliza la técnica de asignación de pilotos, donde cada UE transmite una secuencia piloto ortogonal de longitud τ_p . Dado que $\tau_p < K$, no todos los UEs pueden tener una secuencia única, lo que conduce a una reutilización de pilotos. Este fenómeno introduce contaminación de pilotos, una fuente significativa de interferencia que afecta negativamente la condición de consideración del canal. La señal recibida ($\mathbf{y}_{tl}^{\text{pilot}} \in \mathbb{C}^N$) en el CS l para el piloto t se modela matemáticamente como:

$$\mathbf{y}_{tl}^{\text{pilot}} = \sum_{i \in \mathcal{S}_t} \sqrt{\tau_p p_i} \mathbf{h}_{il} + \mathbf{n}_{tl} \quad (8)$$

La reutilización de pilotos ($\tau_p < K$) introduce interferencia en la estimación, degradando la calidad del canal estimado \mathbf{h}_{il} . Esta degradación impacta directamente en el rendimiento del sistema, especialmente en escenarios densos.

3.5.3 Transmisión de Datos en UL

Una vez completada la fase de estimación del canal, el sistema procede a la transmisión efectiva de datos. Durante la etapa de transmisión en UL, cada CS l recibe señales provenientes de todos los UEs activos en la red. La señal recibida \mathbf{y}_l^{ul} en CS l es:

$$\mathbf{y}_l^{\text{ul}} = \sum_{i=1}^K \mathbf{h}_{il} s_i + \mathbf{n}_l \quad (2)$$

Esta señal contiene tanto la información útil como la interferencia, y será procesada más adelante para su decodificación mediante técnicas avanzadas.

3.5.4 Cálculo de la Eficiencia Espectral

Antes de aplicar técnicas de procesamiento avanzado, es importante evaluar el rendimiento del sistema. Para ello, se calcula la SE de cada UE, que evalúa la cantidad de información que puede transmitirse por unidad de ancho de banda y tiempo.

La eficiencia espectral se define por la siguiente expresión:

$$SE_k^{(\text{ul},1)} = \frac{\tau_u}{\tau_c} \mathbb{E} \left\{ \log_2 \left(1 + \text{SINR}_k^{(\text{ul},1)} \right) \right\} \quad (5)$$

Este paso permite observar cómo afectan factores como la calidad de la estimación del canal, el ruido y la interferencia al rendimiento general del sistema.

3.5.5 Evaluación de Interferencia y Escalabilidad

En esta fase se analiza cómo la interferencia interusuario y la densidad del sistema impactan el rendimiento. Esta evaluación se realiza mediante el cálculo del SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) ecuación (6), una métrica clave para determinar la calidad del enlace de cada usuario y su expresión es:

$$\text{SINR}_k^{(ul,1)} = \frac{p_k |\mathbf{v}_k^H \mathbf{D}_k \hat{\mathbf{h}}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i |\mathbf{v}_k^H \mathbf{D}_k \hat{\mathbf{h}}_i|^2 + \mathbf{v}_k^H \mathbf{Z}_k \mathbf{v}_k} \quad (6)$$

Este análisis es esencial para comprender cómo escalar el sistema sin comprometer el rendimiento.

3.5.6 Implementación de P-MMSE Centralizado

Finalmente, se aplicó la técnica de detección centralizada P-MMSE ecuación (7), a través de esta estrategia se busca reducir la exigencia computacional sin sacrificar significativamente la calidad de la detección. La mencionada técnica considera sólo los UEs con mayor potencia de enlace, esto permite optimizar el cálculo del vector de detección y minimizar la interferencia.

$$\mathbf{v}_k^{\text{P-MMSE}} = p_k \left(\sum_{i \in \mathcal{P}_k} p_i \mathbf{D}_k \hat{\mathbf{h}}_i \hat{\mathbf{h}}_i^H \mathbf{D}_k + \mathbf{Z}'_k \right)^\dagger \mathbf{D}_k \hat{\mathbf{h}}_k \quad (7)$$

Esta técnica mejora la eficiencia espectral y reduce el esfuerzo computacional, facilitando la implementación práctica en redes densas.

3.5.7 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 UEs (K), CSs (L) y antenas por CS (N). 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	Valor	Descripción
L	[10,20,30,40]	Número de CSs
K	[10 hasta 100]	Número de UEs
N	[1, 4, 8, 16]	Número de antenas por CS.
τ_c	500	Longitud del bloque de coherencia (en muestras).
τ_p	10	Longitud de los pilotos ortogonales.
p	100 [mW]	Potencia de transmisión en UL por UE.
BW	20 [MHz]	Ancho de banda de comunicación.
NF	7 [dB]	Figura de ruido del sistema.
α	3.76	Exponente de pérdida de trayectoria.
σ_{sf}	10 [dB]	Desviación estándar del desvanecimiento por sombra.
$PL(1m)$	-35.3 [dB]	Pérdida de trayectoria a 1 metro de distancia.
d_{ant}	0.5λ	Espaciado entre antenas (media longitud de onda).
ASD	20°	Desviación estándar angular.
<i>Threshold</i>	-40 [dB]	Umbral para que un CS no maestro sirva a un UE.
<i>nbrOfSetups</i>	20	Número de conf. aleatorias de posiciones de CSs y UEs.
<i>nbrOfRealizations</i>	50	Número de realizaciones del canal por configuración.
<i>squareLength</i>	2000 [m]	Tamaño del área de cobertura (cuadrado).

3.5.8 Programación del sistema CF-mMIMO en UL

Al declarar todos los parámetros e integrar las ecuaciones previamente mencionadas, se define el funcionamiento del algoritmo principal del sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en el UL. En la Ilustración 13 se muestra el diagrama de flujo que detalla el funcionamiento del algoritmo, donde primero, se declara las variables globales del sistema y se definen las configuraciones de los parámetros K, L, N para evaluar distintos escenarios de CF-mMIMO. Luego, se establecen tres funciones principales: la primera función genera la configuración de simulación, donde define el escenario del sistema CF-mMIMO; la segunda función estima los canales y aplica el algoritmo P-MMSE para mejorar la calidad de la señal; y la tercera función calcula la SE de cada usuario UE.

Tras obtener los resultados de la última función, los resultados se almacenan para su análisis estadístico y, seguidamente, se generan gráficas que muestran la relación entre la SE y la cantidad de UEs.

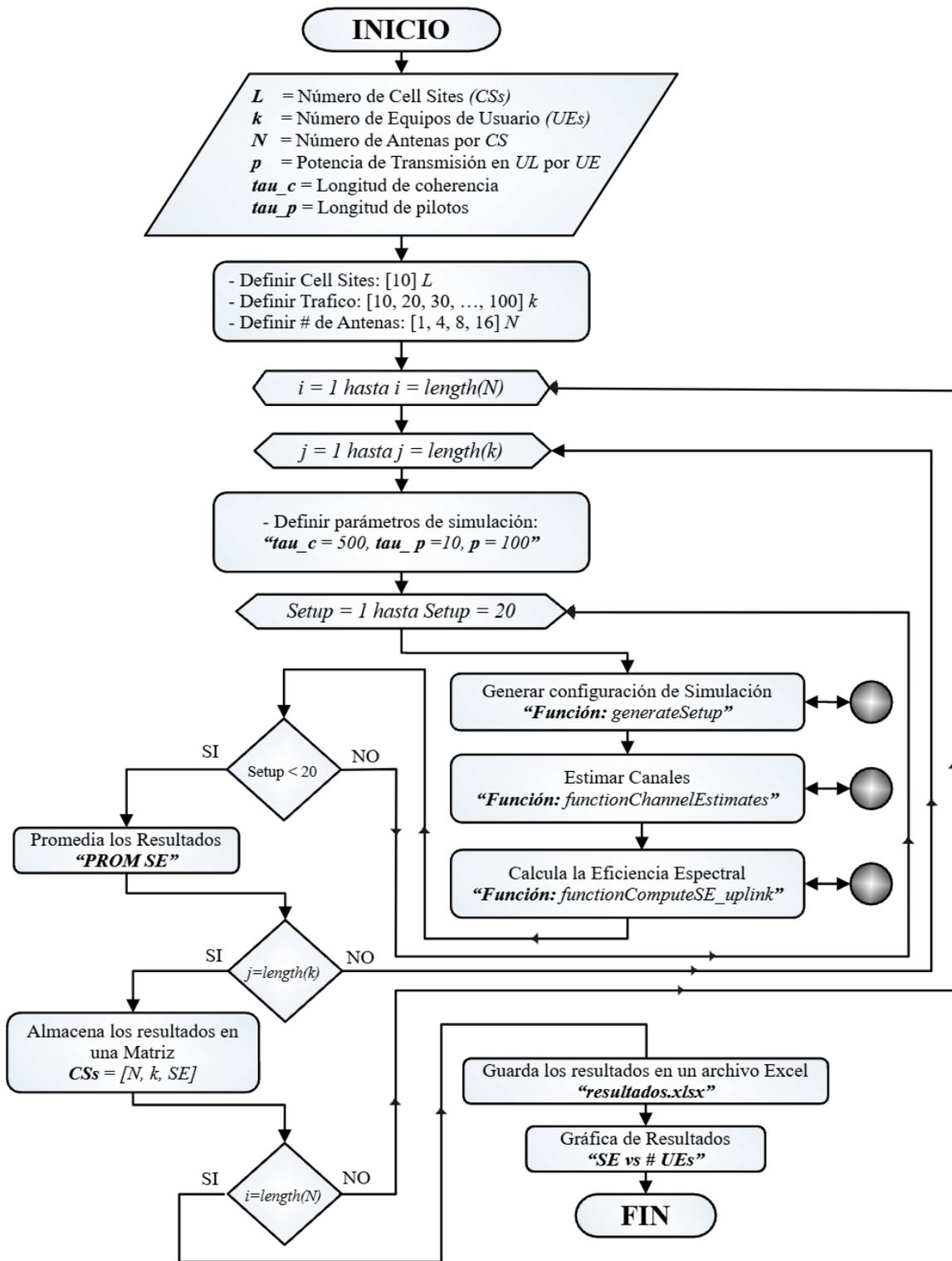


Ilustración 13. Diagrama de flujo principal sobre la evaluación de la SE en un sistema CF-mMIMO para la trasmisión de datos en UL.

Fuente: Autor

• **Función 1:** Configuración del entorno para el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

A continuación, se describe el funcionamiento del algoritmo de la primera función, donde se establece la distribución espacial de los UEs y las unidades de acceso, teniendo en cuenta los modelos de canal y los patrones de interferencia.

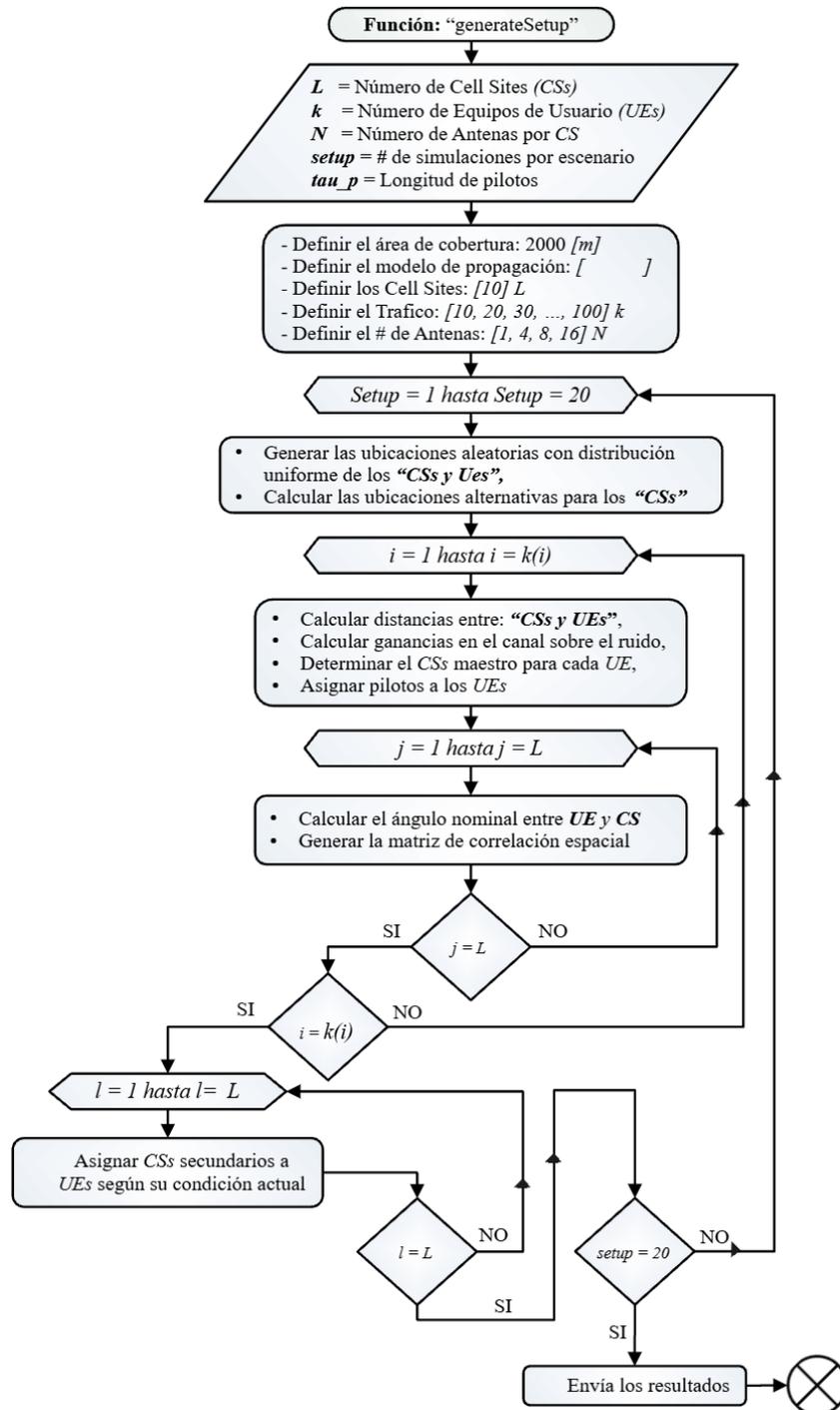


Ilustración 14. Diagrama de flujo del algoritmo sobre la configuración del Entorno CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

- **Función 2:** Estimación del canal para el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

Esta función genera realizaciones de canales correlacionados Rayleigh y sus estimaciones MMSE para el sistema CF-mMIMO, considerando la contaminación de pilotos. También, en esta función se crean los canales reales aplicando matrices de correlación espacial R a ruido gaussiano complejo. Luego, se calculan las estimaciones MMSE a partir de las señales piloto combinadas, todo ello en función de la potencia de transmisión y la asignación de pilotos definidas en el sistema.

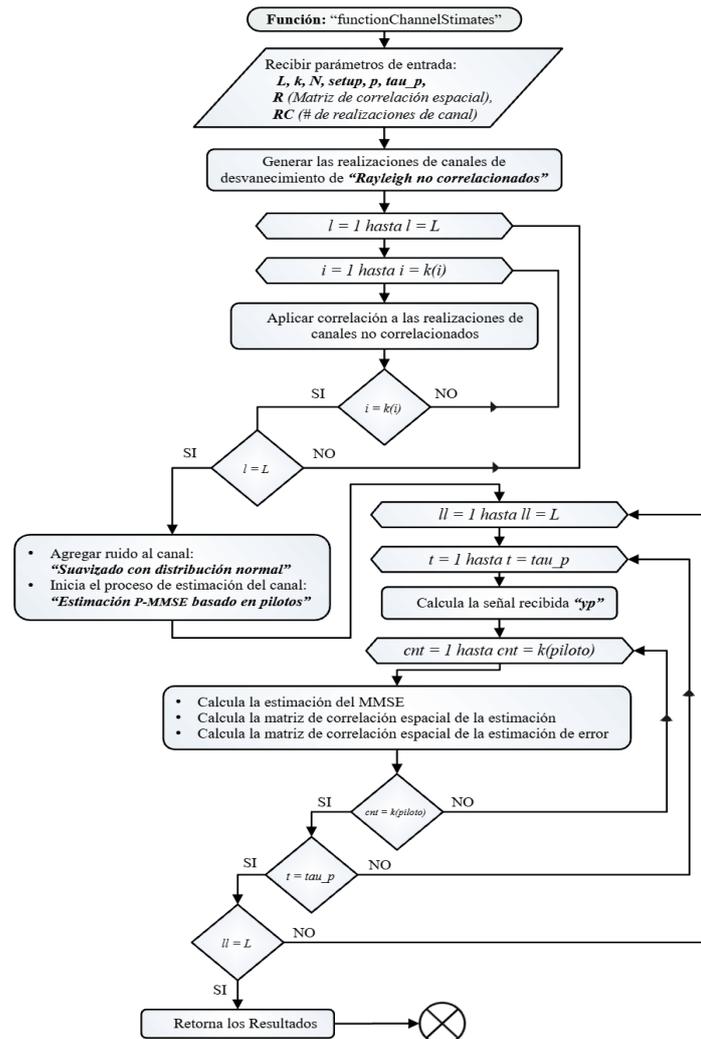


Ilustración 15. Diagrama de flujo del algoritmo sobre la estimación del canal del sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

- **Función 3:** Calculo de la SE del sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

El algoritmo de la función 3 estima la SE del sistema CF-mMIMO utilizando el algoritmo P-MMSE. Donde se calcula los factores de escalado para las combinaciones y se analiza la interferencia, la correlación espacial de los canales y la asignación de pilotos. Finalmente, se computa la SE para el algoritmo P-MMSE, considerando la transmisión en UL.

CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados y análisis

En esta sección se evidencian los resultados y análisis de la SE de un sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL. Para ello, el estudio se dividió en tres (L, N, K) análisis diferentes:

- Resultados y análisis de la SE en función del número de CSs (L),
- Resultados y análisis de la SE en función del número de antenas por CS (N)
- Resultados y análisis de la SE en función del número de UEs (K)

Cada uno de estos tres análisis permitirá evaluar el impacto que genera cada variable independiente sobre la SE de un sistema CF-mMIMO. Bajo este concepto, se busca determinar en qué medida las variables L , N , K influyen en el desempeño del sistema CF-mMIMO. Este análisis es fundamental, ya que, en los sistemas de comunicaciones masivas, la SE es un parámetro clave para mejorar la capacidad y eficacia del espectro radioeléctrico, especialmente en escenarios de alta densidad de UEs.

4.1.1 Resultados y análisis de la SE en función del número de CSs (L)

Para el primer análisis, se toman como referencia las configuraciones presentadas en la (Ilustración 16). Dentro del cual, cada resultado obtenido se basa en las distintas configuraciones de L , N y K .

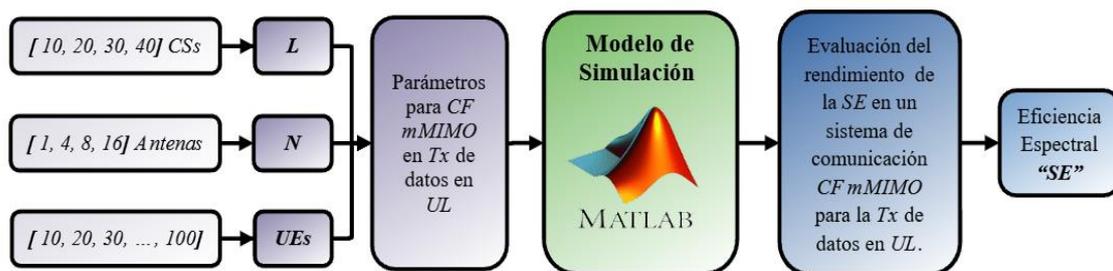


Ilustración 16. Configuración 1 para la simulación y evaluación de la SE de un sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

En la Ilustración 17 y Ilustración 18, se presenta los resultados de la SE en función del número de CSs para las configuraciones de $\{10, 20\}$ CSs, $\{1, 4, 8, 16\}$ antenas por CS y $\{10, 20, 30, \dots, 100\}$ UEs por escenario. Estas configuraciones fueron ajustadas para evaluar el impacto que genera el número de CSs en el desempeño de los sistemas CF-mMIMO en términos de SE.

Las ilustraciones 17 y 18, indican los resultados de efectuar la simulación con la configuración de 1 antena por CS en 10 y 20 CSs, en este análisis se observa que la SE es muy baja para ambos casos. Con las mencionadas figuras es posible determinar que, conforme se incrementa el tráfico de UEs en el sistema, la SE tiende a decrecer de manera significativa, llegando incluso a valores cercanos a 0 bit/s/Hz. Esta situación se presenta debido a que el sistema CF-mMIMO con pocos CSs de una sola antena por CS, es insuficiente para gestionar una gran cantidad de UEs, generando interferencias y una reducción en la calidad del enlace.

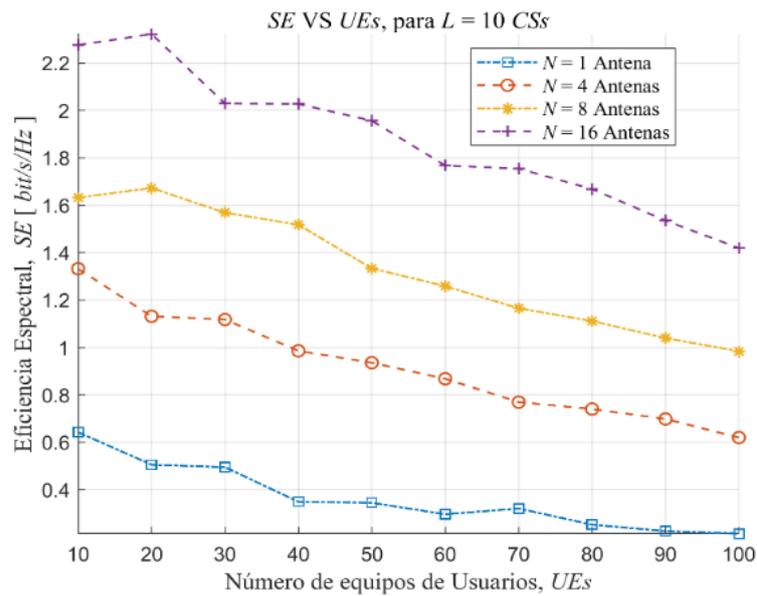


Ilustración 17. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 10 CSs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} UEs

Fuente: Autor

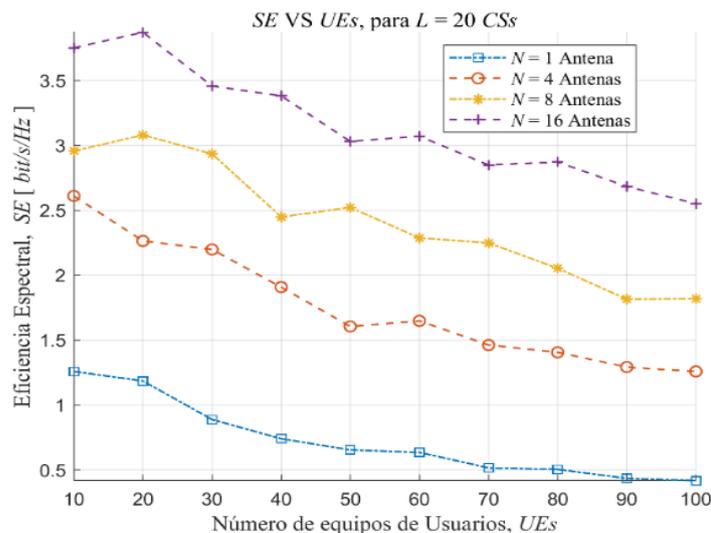


Ilustración 18. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 20 CSs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} UEs

Fuente: Autor

Por otro lado, al incrementar la cantidad de antenas por CSs {4 y 8} y manteniendo el mismo número de CSs, se percibe una leve mejora en la SE; sin embargo, la diferencia entre ambas configuraciones no es significativa. Además, en los escenarios señalados, la SE continúa mostrando una tendencia decreciente conforme aumenta el tráfico de UEs, este comportamiento indica que el sistema sigue enfrentando limitaciones en la asignación de recursos cuando la concentración de UEs es alta. Finalmente, al realizar simulaciones con una configuración de 16 antenas por CS en 10 y 20 CSs, la SE mejora considerablemente, llegando a alcanzar valores superiores a los 2.2 bit/s/Hz cuando se consideraron 10 CSs y 3.5 bit/s/Hz con 20 CSs. El incremento registrado en la SE se debe a la gran cantidad de CSs y antenas por CS que benefician a la transmisión de datos en el sistema CF-mMIMO.

Sin embargo, al igual que en las configuraciones anteriores, la SE sigue disminuyendo conforme aumenta el número de UEs en el sistema. Estos resultados demuestran que, aunque la integración de múltiples antenas por CS mejora el desempeño del sistema, la planificación de la infraestructura en redes CF-mMIMO debe considerar el equilibrio entre la cantidad de CSs, antenas por CS y UEs para maximizar la SE en la transmisión de datos en UL. Al igual que en el análisis anterior, en este apartado se evalúan los resultados de la SE considerando configuraciones con 30 CSs y 40 CSs (Ilustración 19 e Ilustración 20), con un número variable de UEs {10, 20, 30, ..., 100} y diferentes configuraciones de antenas por CS {1, 4, 8, 16}.

En las dos configuraciones de CSs cuando se utilizó solo 1 antena por CS, la SE, se mostró considerablemente baja independientemente de si el tráfico de UEs es bajo o alto. Adicionalmente, se logró observar que, mientras se incrementa la cantidad de UEs en la red, la SE tenderá a disminuir de manera significativa, llegando a niveles cercanos a 0 bit/s/Hz cuando se simularon escenarios de mayor carga. Esta situación se presenta ya que, en cualquier infraestructura, donde la cantidad de UEs supera la capacidad del sistema CF-mMIMO, la SE disminuirá drásticamente por la interferencia y la limitación en la asignación de recursos espectrales.

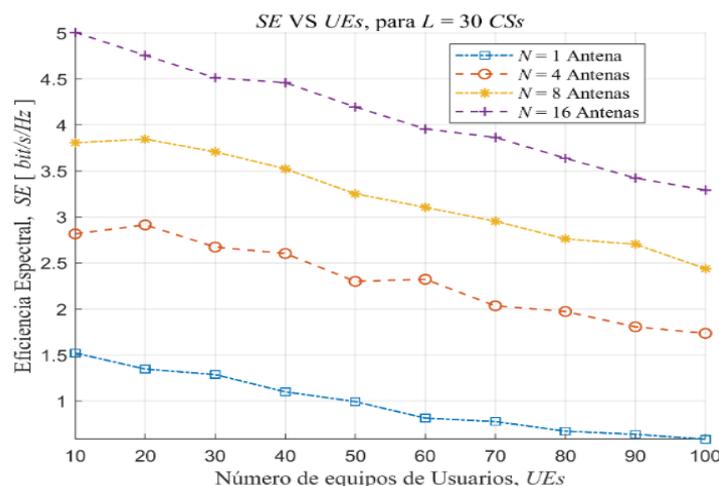


Ilustración 19. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 30 CSs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} UEs

Fuente: Autor

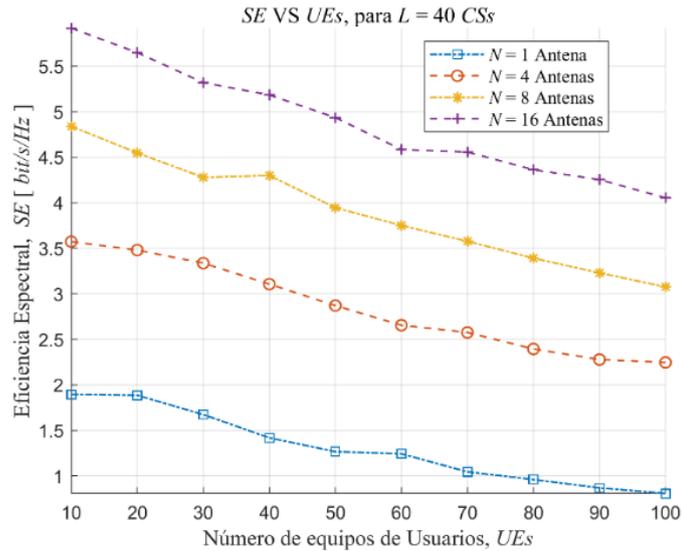


Ilustración 20. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 40 CSs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} UEs

Fuente: Autor

Por otro lado, el efecto de aumentar el número de antenas en cada CS {4 u 8}, se traduce en una mejora en la SE, esto se pudo evidenciar en la configuración de 30 CSs, donde la SE se mantuvo en un valor promedio de 2.8 bit/s/Hz, mientras que en la simulación con 40 CSs, la SE alcanzó los 3.5 bit/s/Hz cuando el tráfico de UEs fue bajo. Los valores que se mencionan pueden ser considerados como favorables en estos escenarios, pues garantizan una mejor calidad del servicio.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que, cuando el tráfico de UEs incrementa hasta 100 UEs, la SE cae a valores críticos cercanos a 1.8 bit/s/Hz para 30 CSs y 2.4 bit/s/Hz para 40 CSs. Con este comportamiento del sistema es posible indicar que, aunque el incremento de antenas mejora el rendimiento, continúa existiendo una limitación ligada al número de UEs que pueden recibir el servicio, esta situación puede generar repercusiones significativas en la calidad del servicio en geografías con gran densidad de usuarios.

Por último, en la simulación en donde se empleó una configuración de 16 antenas por CS, se pudo observar un comportamiento del sistema que podría ser catalogado como bueno. Los resultados indicaron un bajo tráfico de UEs, la SE alcanzó niveles aproximados a 5 bit/s/Hz en 30 CSs y 6 bit/s/Hz en 40 CSs, estos valores de SE demostraron que una mayor densidad de antenas y CSs mejora notablemente la SE del sistema.

Además, es posible mencionar que en este caso la disminución de la SE tiende a ser despreciable cuando el tráfico de UEs aumenta, se observó que para 100 UEs, la SE se mantiene en 3.4 bit/s/Hz para 30 CSs y 4 bit/s/Hz para 40 CSs, esto indica que la red conserva un buen rendimiento. Es importante señalar que, aunque el impacto de la sobrecarga es menor, algunos UEs podrían verse afectados en cuanto a la calidad de servicio en escenarios de máxima capacidad.

En conclusión, los resultados de esta simulación sugieren una mejora en la SE, con el aumento en el número de antenas por CS y la cantidad de CSs en el sistema CF-mMIMO, pudiendo evidenciarse en escenarios con una menor cantidad de UEs. Sin embargo, se debe mencionar que, en situaciones de alta densidad de usuarios, la SE disminuirá por efecto de la interferencia y la sobrecarga de la infraestructura.

Estos hallazgos muestran que, para garantizar un rendimiento óptimo del sistema en la transmisión de datos en UL, es necesario un adecuado dimensionamiento de la infraestructura CF-mMIMO.

4.1.2 Resultados y análisis de la SE en función del número de antenas por CS (N)

Para este segundo análisis, también se toman como referencia las configuraciones presentadas en la Ilustración 16. Dentro del cual, cada resultado obtenido se basa en las distintas configuraciones de L , N y K . A continuación, se analizan los resultados de la SE en función del número de antenas por CSs, como se muestra en la Ilustración 21 e Ilustración 22. Se consideran las configuraciones con 1 antena por CS (Ilustración 21) y 4 antenas por CS (Ilustración 22), junto con diferentes cantidades de CSs {10, 20, 30, 40} y un número variable de UEs {10, 20, 30, ..., 100}.

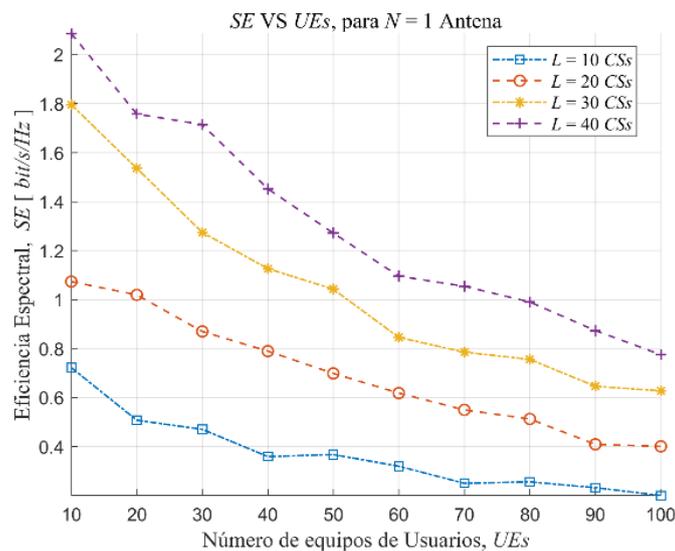


Ilustración 21. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 1 antena por CS, {10, 20, 30, 40} CSs y {10, 20, 30, ..., 100} UEs

Fuente: Autor

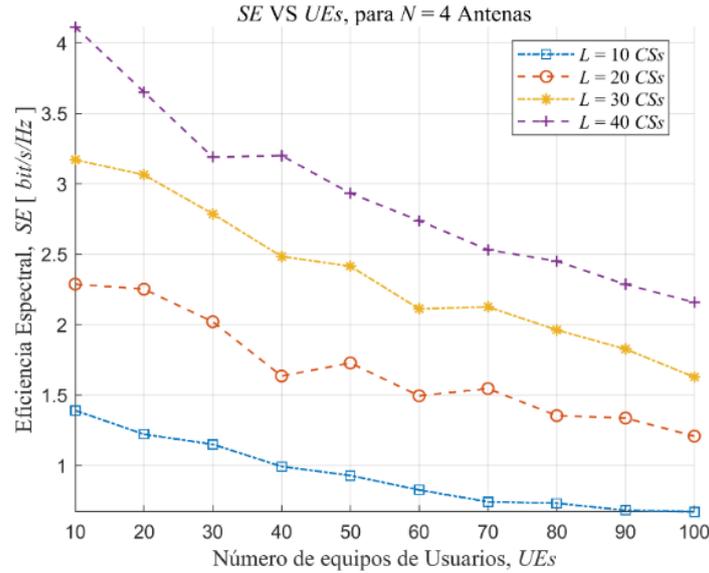


Ilustración 22. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 4 antenas por CS, $\{10, 20, 30, 40\}$ CSs y $\{10, 20, 30, \dots, 100\}$ UEs

Fuente: Autor

Los resultados mostraron un comportamiento decadente significativo de la SE a medida que se incrementó el tráfico de UEs, esto indicó que la cantidad de antenas por CS en la red CF-mMIMO mantiene un papel crucial en el desempeño del sistema. Desde una perspectiva general, es válido mencionar que la SE disminuye rápidamente cuando se efectúa un análisis en función del número de antenas por CS, en comparación con el análisis anterior donde la SE se basa en el número de CSs. En el citado análisis, la SE disminuía de forma lenta con el incremento del tráfico de UEs; sin embargo, en este caso, la SE tiende a decrecer en mayor medida. Por tanto, esto revela que la SE mejora significativamente en condiciones con baja carga, cuando se emplea una infraestructura con más antenas por CS, pero, por el contrario, cuando el número de UEs aumenta, la SE se ve comprometida, debido a una mayor interferencia y una menor capacidad para atender eficientemente a todos los UEs en la red. Por ejemplo, para una configuración de 1 antena por CS y 40 CSs, con un número reducido de UEs (Ilustración 21), la SE supera los 2 bit/s/Hz. De manera similar, en la configuración de 4 antenas por CS (Ilustración 22), la SE alcanza valores superiores a 4 bit/s/Hz, lo que indica una mejora considerable en la SE con el incremento del número de antenas. No obstante, en escenarios con tráfico alto de UEs, la SE experimenta una caída drástica.

En las simulaciones donde se empleó configuraciones con 1 y 4 antenas por CS, 10 CSs y 100 UEs, se observó que la SE desciende a valores críticos cercanos a 0 bit/s/Hz. Con estas configuraciones se demostró que, aunque se obtengan mejoras en la SE en escenarios de baja carga al incrementar el número de antenas, una infraestructura con un mayor número de CSs podría ser una mejor alternativa para mantener la calidad del servicio (QoS) cuando el tráfico de UEs es elevado.

Con esta observación, se determinó que la SE de un sistema CF-mMIMO posee una mejor respuesta cuando existe una mayor cantidad de antenas por CS, siempre y cuando el tráfico de UEs no sea excesivo.

Ahora en este apartado, se presentan los resultados para un escenario CF-mMIMO con configuraciones de 8 antenas por CS (Ilustración 23), 16 antenas por CS (Ilustración 24), {10, 20, 30, 40} CSs y {10, 20, 30, ..., 100} UEs. De manera similar al análisis anterior, la SE muestra un crecimiento significativo en escenarios con pocos UEs, pero disminuye rápidamente a medida que el tráfico de usuarios aumenta. Sin embargo, en este caso se observa una particularidad: la SE alcanza un punto máximo a medida que se aumenta la cantidad de UEs, indicando que hay un límite en la mejora de la SE al aumentar el número de antenas por CS. Al analizar el escenario con 8 antenas por CS y 40 CSs, en condiciones de bajo tráfico de UEs, la SE alcanza un valor máximo de 5 bit/s/Hz (Ilustración 24 (a)).

Posteriormente, al realizar un incremento en el número de antenas a 16 por CS, en la misma configuración de 40 CSs y bajo tráfico de UEs, se constató que la SE superó ligeramente los 5.5 bit/s/Hz (Ilustración 24). Estos resultados mostraron que, aunque el aumento en el número de antenas por CS mejora la SE, su efecto tiende a estabilizarse después de cierto punto, lo que sugiere la existencia de un límite en el beneficio obtenido por el incremento de antenas en la infraestructura CF-mMIMO.

Es posible que este comportamiento se deba a que, cuando la infraestructura está constituida con múltiples antenas por CS y un número racional de CSs, los UEs consiguen una distribución adecuada de los recursos de comunicación, esto se traduce en la reducción de la interferencia y permitiendo una SE estable. Dicho de otro modo, cuando la cantidad de antenas y CSs es lo suficientemente alta, la totalidad de los UEs reciben una asignación de recursos, lo que significa una mejora adicional en la SE al incrementar aún más la infraestructura.

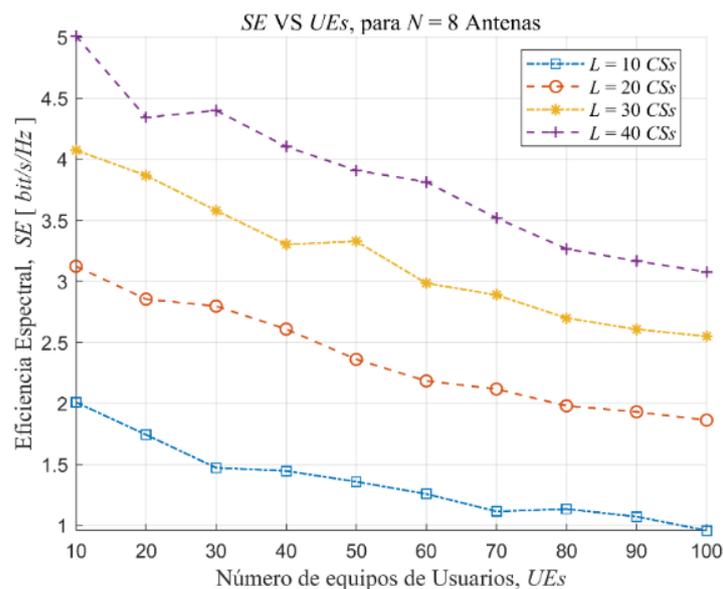


Ilustración 23. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 8 antenas por CS, {10, 20, 30, 40} CSs y {10, 20, 30, ..., 100} UEs

Fuente: Autor

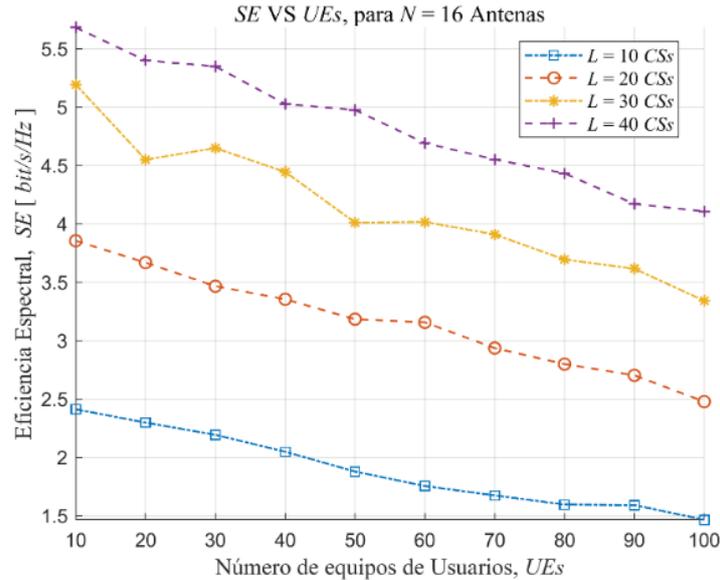


Ilustración 24. Resultados: SE vs número de UEs (K) para 16 antenas por CS, $\{10, 20, 30, 40\}$ CSs y $\{10, 20, 30, \dots, 100\}$ UEs

Fuente: Autor

4.1.3 Resultados y análisis de la SE en función del número de UEs.

En los análisis previos, se evaluó la SE en función del número de antenas por CS y del número de CSs, considerando escenarios con tráfico de UEs variables. Sin embargo, para profundizar el comportamiento de la SE en condiciones de alta demanda, en esta sección se analiza un escenario CF-mMIMO con un tráfico fijo y elevado de 200 UEs. A diferencia de los análisis anteriores, en este caso no se varía la cantidad de UEs, permitiendo así un enfoque más preciso en cómo la infraestructura afecta la SE en condiciones de alto tráfico. Como se observa en la siguiente ilustración, este análisis se basa en las configuraciones con $\{1, 4, 8, 16\}$ antenas por CS y $\{10, 20, 30, \dots, 100\}$ CSs. El objetivo principal es determinar el impacto que genera la infraestructura (N, L) sobre la SE cuando la carga de usuarios es constante. Este tipo de evaluación es crucial para diseñar sistemas CF-mMIMO eficientes, asegurando una distribución óptima de recursos y su vez minimizando la interferencia, especialmente en escenarios donde la demanda de UEs es alta y sostenida.

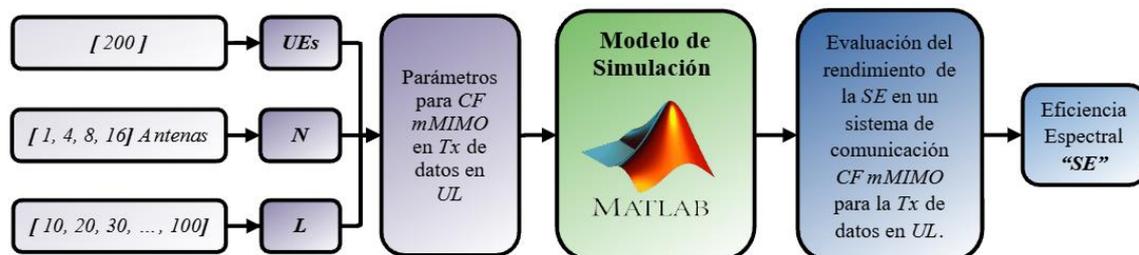


Ilustración 25. Configuración 2 para la simulación y evaluación de la SE de un sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

En esta sección, se presenta el análisis de la SE de un escenario de CF-mMIMO con un tráfico fijo de 200 UEs, en esta configuración se llevó a cabo la variación únicamente el

número de antenas por CS y la cantidad de CSs. En la Ilustración 26 se puede notar que, la SE presenta un comportamiento de crecimiento a medida que el número de antenas por CS y el número de CSs aumenta, con esto es posible mencionar que al incrementar la infraestructura de CF-mMIMO, la SE mejora significativamente.

En configuraciones con una infraestructura más robusta, como 16 antenas por CS y 100 CSs, la SE alcanzó niveles que podrían catalogarse como eficientes. En los análisis realizados a las configuraciones anteriores, el número máximo de CSs que se utilizó fue de 40; sin embargo, al dimensionar el estudio hasta 100 CSs, se corroboró que la SE continúa mejorando, esto sugiere que la escalabilidad del sistema CF-mMIMO es clave para optimizar el rendimiento en entornos con alta densidad de UEs.

Los resultados sustentan la idea de acerca de los sistemas CF-mMIMO, dichos sistemas se consideran adecuados para la transmisión de datos en enlace ascendente (UL) en redes de nueva generación. La capacidad de estos sistemas es apropiada para mantener una SE elevada aun existiendo un alto tráfico de UEs, con esto podemos confirmar que estas infraestructuras pueden ofrecer una QoS superior a un gran número de usuarios. Esta situación es muy importante para la evolución de las redes 5G y futuras redes 6G, donde la SE y la escalabilidad son factores críticos para garantizar un rendimiento óptimo en escenarios de comunicación masiva.

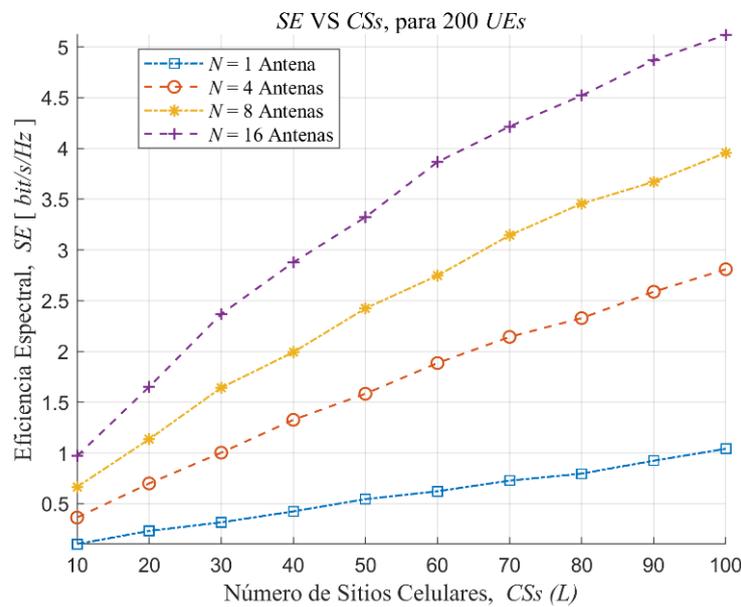


Ilustración 26. Resultados: SE vs número de CSs (L) para 200 UEs, {1, 4, 8, 16} antenas por CS y {10, 20, 30, ..., 100} CSs

Fuente: Autor

A través de estos resultados, se pudo conocer que en el diseño de sistemas CF-mMIMO en el UL, se debe tomar en consideración meticulosamente la relación entre el número de CSs, el número de antenas por CS y la densidad de UEs. Pues una configuración adecuada hace

posible la maximización de la SE, y con mayor énfasis en escenarios con carga variable de usuarios.

Una particularidad detectada en sistemas con una distribución densa de CSs con múltiples antenas, es que esto ayuda a mejorar el rendimiento del sistema, atenuando los efectos de la interferencia y la sobrecarga. Pero, por el contrario, a medida que la cantidad de UEs aumenta, se observó una disminución en la SE incluso las configuraciones más robustas, lo que refuerza la premisa de emplear estrategias de planificación y escalabilidad en la infraestructura CF-mMIMO.

Estas observaciones posibilitan la comprensión del comportamiento del sistema ante distintas condiciones de funcionamiento, y componen una base técnica sólida para futuros desarrollos orientados a redes de comunicaciones móviles de próxima generación.

4.2 Análisis Estadístico general de la SE en Sistemas CF-mMIMO en UL

Para realizar el análisis estadístico de los resultados (SE) del presente proyecto de investigación, se realizó diferentes simulaciones configurando las variables independientes, tales como el número de antenas por CS (N), CSs (L) y el número de UEs conectados (K). Estas configuraciones (*Tabla 6*) realizadas en dichas simulaciones, son fundamentales dentro del presente proyecto, permitiendo así un análisis detallado de la SE en los sistemas CF-mMIMO en la transmisión de datos en el enlace ascendente.

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

Fuente: Autor

V. Independientes	Configuraciones	Descripción
L	10, 20, 30 y 40	Número de Sitios celulares, CSs
N	1, 4, 8 y 16	Número de Antenas por CS
K	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 100	Número de UEs

Adicionalmente, estas simulaciones se realizaron el programa Matlab (análisis numérico) en el que se realizaron distintas configuraciones (N, L, K) como se indica en la *Tabla 6*. De igual manera se obtuvieron 160 resultados (*Tabla 7*). Estos resultados serán procesados en el marco de la presente investigación.

Tabla 7. Procesamiento de los datos para el análisis general de la SE en Sistemas CF-mMIMO bajo diversas configuraciones (L, N, K).

Fuente: Autor

Eficiencia Espectral [SE]	Casos					
	Válido		Perdidos		Total	
	#	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
	160	100.0%	0	0.0%	160	100.0%

A continuación, son mostrados los análisis estadísticos aplicados con la finalidad evaluar el comportamiento de la SE en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL, las variables consideradas para esto fueron L , N y K , la correlación es el primer análisis que se empleó, con este análisis es posible determinar la injerencia directa que tiene cada una de estas variables en la SE del sistema, así también se identifica la fuerza y dirección de las relaciones entre las variables independientes y la SE.

Con esto, se obtuvo una visión preliminar del desempeño del sistema CF-mMIMO, considerando la influencia de los parámetros mencionados. En segundo lugar, se debió realizar una prueba de normalidad, la cual permite verificar la distribución de los valores de cada una de las variables. Este paso es esencial para poder aplicar, posteriormente, un tipo de análisis estadístico adecuado.

Con los resultados arrojados por la prueba de normalidad y con el propósito de identificar el nivel de influencia de estas variables sobre la SE, se usó el análisis de varianza ANOVA. Finalmente, se realizó otro tipo de análisis, en este caso un post-hoc, aquí se agrupan las variables y se analizan en conjunto, de esta manera es posible determinar cuál de estos grupos ejerce una mayor incidencia en la SE. Con estos análisis se aseguró la solidez de los resultados y se confirma que la metodología que se aplicó es la adecuada para analizar el comportamiento del sistema CF-mMIMO bajo diferentes configuraciones.

4.2.1 Análisis de correlación: Relación entre L , N , K y la SE en CF-mMIMO en UL

El coeficiente de correlación de Pearson (ρ) es una métrica fundamental para evaluar la relación lineal entre dos variables cuantitativas, caracterizando tanto la magnitud (valores absolutos entre 0 y 1) como el sentido (signo positivo/negativo) de dicha relación. Como se observará en la Tabla 8, este indicador admite tres interpretaciones críticas para el análisis de sistemas CF-mMIMO como las correlaciones perfectas ($\rho = \pm 1$), la ausencia de relación lineal ($\rho \approx 0$), y los diversos grados de asociación intermedios, cuyo significado estadístico debe validarse mediante los correspondientes de p-valor."

Tabla 8. Interpretación del coeficiente de Pearson y el p-valor en la correlación de los parámetros (L , N , K) y SE del sistema CF-mMIMO.

Fuente: Autor

Coeficiente de Pearson	Interpretación	p-valor	Interpretación
1	Correlación positiva perfecta. Esta situación se presenta cuando se incrementa una variable y la otra también se incrementa en la misma proporción.	< 0.05	Este valor muestra que existe suficiente evidencia para afirmar que la relación es significativa.
0	No hay relación lineal. Se refiere a que los cambios en una variable no afectan a la otra.	≥ 0.05	No hay evidencia suficiente para afirmar que exista una relación.

-1	Correlación negativa perfecta: cuando se incrementa una variable, la otra se reduce en la misma proporción.	< 0.001	La relación es altamente significativa y con fuerte confianza estadística.
<i>Nota: Un p-valor < 0.05 indica que la correlación es improbable que sea por azar, mientras que p-valor < 0.001 refuerza aún más su validez.</i>			

En la Tabla 9, se presenta el análisis de correlación, donde se puede identificar las relaciones lineales existentes entre las variables independientes (L , N , K) y dependientes (SE). Como se puede observar tanto L como N muestran correlaciones positivas de magnitud moderada ($\rho_L = 0.576$ y $\rho_N = 0.691$), lo que indica que incrementar estos parámetros favorece la mejora de la SE en el sistema. Por otra parte, K presentó una correlación negativa ($\rho_K = -0.281$), indicando que una mayor cantidad de UEs tiende a degradar el rendimiento del sistema debido al incremento de la congestión. También, cabe mencionar que todas las correlaciones fueron estadísticamente significativas ($p - valor < 0.001$), lo que respalda la solidez y fiabilidad de estos hallazgos como guía para el diseño y optimización de los sistemas CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL.

Tabla 9. Correlaciones entre los parámetros (L , N , K) y la SE en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

Correlaciones			
Variables Independientes	Eficiencia Espectral [SE]		
	Número de Muestras	Correlación de Pearson	Significancia (Sig.)
Número de CSs [L]	160	.576**	<0.001
Número de Antenas por CS [N]	160	.691**	<0.001
Número de UEs [K]	160	-.281**	<0.001
<i>Nota: **. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).</i>			

4.2.2 Prueba de Normalidad: Para L , N , K y la SE en CF-mMIMO en UL

Es importante determinar si los resultados de esta tesis en relación con la SE presentan una distribución normal o no normal, para dicho efecto, destacan las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Shapiro-Wilk mismas que permiten conocer el tipo de distribución de los mencionados resultados.

- Shapiro-Wilk (muestras < 50 observaciones), óptima para confirmar normalidad en conjuntos pequeños.
- Kolmogorov-Smirnov (muestras grandes ≥ 50), útil para comparar distribuciones generales.

Dado que en este estudio el tamaño de la muestra para cada parámetro (L , N , K), es menor a las 50 observaciones se utiliza la prueba de normalidad “Shapiro-Wilk”. Además, en este contexto se considera el p-valor como un criterio fundamental para la toma de decisiones con respecto a la normalidad. La interpretación del p-valor es la siguiente:

Tabla 10. Interpretación del p-valor en la prueba de normalidad.

Fuente: Autor

Regla	Tipo de distribución
$p - \text{valor} \geq 0.05$	Normal (<i>Datos paramétricos</i>)
$p - \text{valor} < 0.05$	No Normal (<i>Datos no paramétricos</i>)

La Tabla 11 muestra los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk sobre las observaciones de SE en el sistema CF-mMIMO, considerando tres parámetros de configuración como L , N y K . En primer lugar, observamos los resultados del parámetro L , donde se determina que todas las configuraciones analizadas (10, 20, 30 y 40 CSs) presentan valores significativos (p -valor = 0.177, 0.175, 0.235 y 0.255, respectivamente), lo cual indica que los resultados de SE asociados a L se ajustan satisfactoriamente a una distribución normal. Este cumplimiento garantiza la validez estadística para la aplicación de pruebas paramétricas en etapas posteriores.

Una vez que se desarrolló la prueba de normalidad de la variable N , de las simulaciones con configuraciones de 4, 8 y 16 antenas, los resultados arrojaron que los p -valores se mantienen por encima de 0.05, este nivel de significancia indicó que estos resultados mantienen una distribución normal. Además, después de haber realizado el análisis en los resultados de la configuración con 1 antena el p -valor resultante fue igual a 0.042, inicialmente esto sugirió una ligera desviación respecto a la normalidad, sin embargo, al ser un número cercano al umbral de 0.05, se consideró que los datos mantienen una distribución normal.

Tabla 11. Pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) para la SE según L , N y K en el sistema CF-mMIMO para la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

Test de Normalidad para la Eficiencia Espectral (SE)			
Parámetro	Configuración	Número de Muestras	Significancia (Sig.)
Número de CSs (L)	10 CSs	40	.177
	20 CSs	40	.175
	30 CSs	40	.235
	40 CSs	40	.255
Número de Antenas por CSs (N)	1 Antena	40	.042
	4 Antenas	40	.254
	8 Antenas	40	.266
	16 Antenas	40	.333
Número de UEs por Sistemas (K)	10 UEs	16	.597
	20 UEs	16	.794
	30 UEs	16	.782
	40 UEs	16	.671
	50 UEs	16	.619
	60 UEs	16	.606
	70 UEs	16	.514

	80 UEs	16	.562
	90 UEs	16	.472
	100 UEs	16	.488

Finalmente, los resultados de normalidad del parámetro K , muestran una notable consistencia, dado que todas las configuraciones que abarcan desde 10 hasta 100 UEs exhiben p-valores considerablemente superiores a 0.472. Por lo tanto, los resultados muestran un sólido respaldo estadístico para asumir normalidad en las distribuciones de SE para todas las densidades de usuarios.

En conclusión, como evidencia la Tabla 11, la mayoría de los conjuntos de datos cumplen con el supuesto de normalidad, validando el uso de pruebas paramétricas como el ANOVA para los análisis posteriores. Este enfoque garantiza la detección confiable de diferencias significativas entre configuraciones y permite identificar qué parámetros (L , N o K) influyen de manera más determinante en la SE del sistema CF-mMIMO en UL.

4.2.3 Análisis ANOVA: Efecto de L , N y K en la SE del sistema CF-mMIMO en UL

El análisis de varianza (ANOVA) revela que tanto L ($F = 26.304$, p-valor < 0.001) como N ($F = 57.789$, p-valor < 0.001) tienen un efecto altamente significativo en la SE del sistema CF-mMIMO, donde F representa la razón entre la variabilidad entre grupos (efecto del parámetro) y la variabilidad interna (ruido).

Tabla 12. Análisis ANOVA del efecto de L , N y K en la SE en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

ANOVA: Comparación Entre Grupos de L			
	Fuente de Variación	F	Significancia (Sig.)
Eficiencia Espectral [SE]	Entre grupos de CSs	26.304	<0.001
	Entre grupos de Antenas por CS	57.789	<0.001
	Entre grupos de UEs por Sistema	1.440	.176

Un valor elevado de F con p-valor < 0.05 indica diferencias estadísticamente significativas, siendo N el factor de mayor impacto. Por otra parte, K ($F = 1.440$, p-valor = 0.176) no muestra influencia significativa, ya que su F es cercano a 1 y su p-valor > 0.05 , por lo tanto, se determina que las variaciones en SE son atribuibles al azar. En conclusión, estos resultados demuestran que incrementar L y especialmente N mejora específicamente la SE, lo que sugiere que la optimización del sistema debería enfocarse principalmente en la configuración de infraestructura (L y N) más que en la gestión de carga de usuarios (K).

4.2.4 Post-Hoc (Tukey): SE según L , N y K (Grupos) en sistemas CF-mMIMO

En esta sección se presentan los resultados que se generaron a partir del análisis post-hoc con la prueba de Tukey, esta prueba es aplicada para identificar diferencias significativas en

la SE al realizar la comparación entre los grupos de configuración del sistema CF-mMIMO según L , N y K . Los resultados relativos al parámetro L , indicaron que las configuraciones con menor cantidad de CSs (10 CSs) obtuvieron una SE inferior con relación a configuraciones de 20, 30 y 40 CSs, recalcando que el aumento gradual de CSs favorece el rendimiento, sin embargo, estas diferencias tienden a estabilizarse entre 20 y 30 CSs.

Con el análisis efectuado a los resultados del parámetro N , se pudo identificar diferencia entre las comparaciones, esto mostró que, cuando se realiza un incremento en la cantidad de antenas que conforman una CS la SE tiende a mejorar. Este comportamiento confirma que un mayor número de antenas por CSs genera un impacto positivo en el rendimiento global del sistema, confirmando su relevancia en los sistemas CF-mMIMO.

En lo referido al parámetro K , los resultados no fueron concluyentes y no mostraron diferencias estadísticamente significativas en la SE entre los grupos comparados. Esto indica que, dentro del rango de usuarios evaluados, el aumento de UEs no afecta de manera sustancial la SE, indicando una adecuada capacidad de manejo de usuarios en el sistema CF-mMIMO bajo las condiciones analizadas.

Esta ausencia de diferencias contrasta de manera notable con los efectos claramente observados en los parámetros L y N , lo que resalta que la infraestructura de red especialmente el número de antenas (N) desempeña un papel más determinante en el rendimiento espectral que la carga de usuarios (K).

Tabla 13. Comparaciones múltiples post-hoc (Tukey) de la SE entre grupos de L , N y K en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

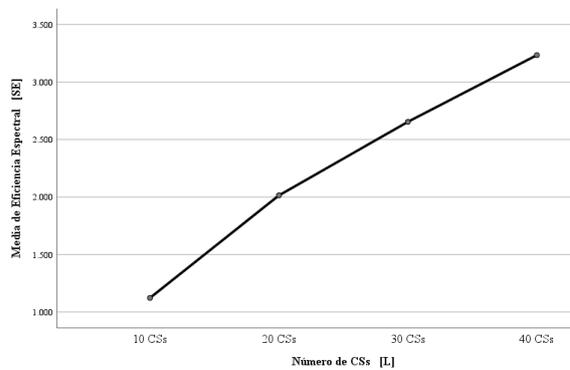
HSD Tukey: Comparaciones múltiples				
Variable Dependiente	Grupos		Diferencia de medias (A - B)	Sig.
	Grupo A	Grupo B		
Número de CSs [L]	10 CSs	20 CSs	-.892*	.003
	10 CSs	30 CSs	-1.531*	<0.001
	10 CSs	40 CSs	-2.111*	<0.001
	20 CSs	30 CSs	-.639	.055
	20 CSs	40 CSs	-1.219*	<0.001
	30 CSs	40 CSs	-.580	.097
Número de Antenas por CSs (N)	1 Antena	4 Antenas	-1.121*	<0.001
	1 Antena	8 Antenas	-1.870*	<0.001
	1 Antena	16 Antenas	-2.663*	<0.001
	4 Antenas	8 Antenas	-.748*	.003
	4 Antenas	16 Antenas	-1.541*	<0.001
	8 Antenas	16 Antenas	-.792*	.001
Número de UEs por Sistemas (K)	Anexo 4			
Nota: *. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.				

Por último, se presentan los resultados gráficos de las medias y los diagramas de cajas de la SE para cada parámetro (L , N y K), los cuales evidencian patrones consistentes en la SE. Se observó un crecimiento no lineal de la SE cuando se efectuó el análisis de L , aquí se evidenció una mejora notable al aumentar los CSs de 10 a 20, por el contrario, este efecto se consideró marginal cuando se emplearon a partir de 30 CSs, esto se confirmó con la disminución observada en la pendiente de las medias y en el solapamiento de los rangos en los diagramas de cajas.

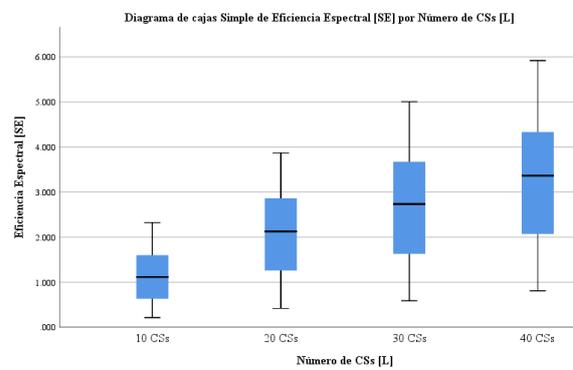
Por otra parte, la SE muestra una relación consistente y positiva con el parámetro N , puesto que, se obtuvo una mejora significativa en la SE con los incrementos de antenas de 1 a 16, es posible afirmar esto, debido a que no se presentaron solapamientos entre las cajas, lo cual respalda la existencia de diferencias estadísticas claras entre todas las configuraciones K evaluadas.

En lo que respecta a UEs K , las ilustraciones del análisis estadístico reflejan una pequeña disminución en SE a medida que la carga de usuarios aumenta, en esta tesis se usaron configuraciones de 10 a 100 UEs. Como se puede observar en las figuras que componen la Ilustración 27 el amplio solapamiento de los diagramas de cajas indica la ausencia de diferencias significativas, esto genera una concordancia con los resultados en el análisis post-hoc (Anexo 4). Con esto es posible determinar que, bajo las condiciones de simulación que se emplearon, la carga de UEs no representa un factor determinante sobre el rendimiento espectral.

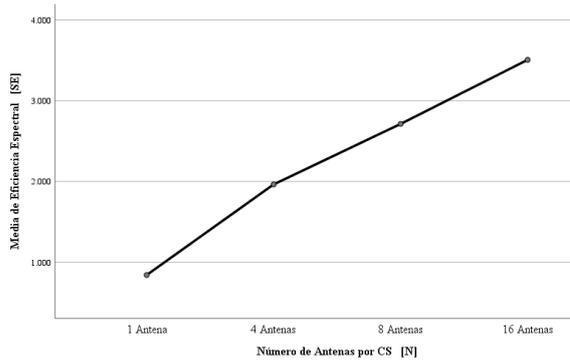
Para concluir, es posible decir que, el parámetro N es quien genera un mayor impacto sobre SE, a diferencia de L que brinda ligeros beneficios a medida que se incrementa, de manera similar, se puede decir que el parámetro K también genera un efecto mínimo en el sistema. Estos resultados contribuyen criterios valiosos para el diseño del sistema CF-mMIMO, orientando la optimización hacia el incremento del número de antenas por CS, en lugar de la simple expansión de CSs o la gestión de UEs.



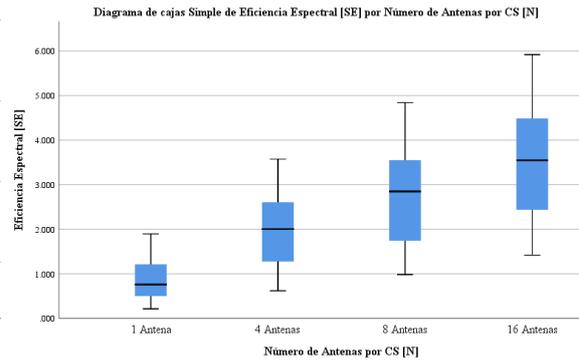
(a)



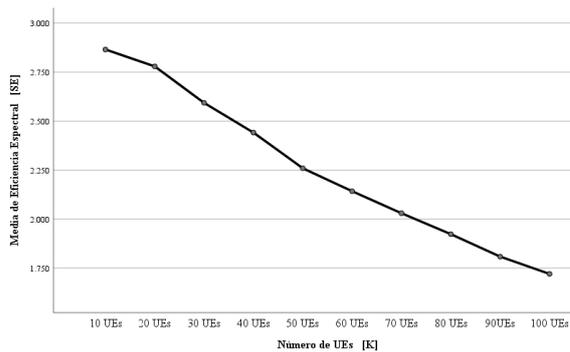
(b)



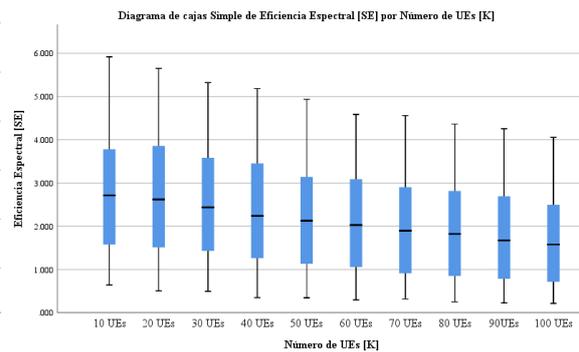
(c)



(d)



(e)



(f)

Ilustración 27. Media y diagrama de cajas de la SE en función de L (a, b), N (c, d) y K (e, f) en sistemas CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL.

Fuente: Autor

4.2.5 Análisis de Correlación entre L , N y SE en CF-mMIMO - (K constante)

Los resultados sobre el análisis de correlación entre parámetros evidencian correlaciones positivas y altamente significativas (p -valor < 0.001) entre los parámetros de infraestructura como L , N y la SE en sistemas CF-mMIMO, considerando una carga constante de 200 UEs.

Tabla 14. Correlaciones entre los parámetros (L , N) y la SE en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL para 200 UEs

Fuente: Autor

Variables Independientes	Eficiencia Espectral [SE]		
	Número de Muestras	Correlación de Pearson	Significancia (Sig.)
Número de CSs [L]	160	.612**	<0.001
Número de Antenas por CS [N]	160	.711**	<0.001

Nota: **. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

El parámetro N muestra una correlación más sólida ($\rho_N = 0.711$) en comparación con L ($\rho_L = 0.612$), esto demuestra que aumentar el número de antenas por CS tiene un efecto más significativo sobre la SE que la simple expansión del número de CSs. Ambos parámetros, respaldados por una significancia estadística (p -valor < 0.01), indican

que el incremento tanto de L como de N contribuye de manera consistente a la mejora de la eficiencia espectral en el sistema CF-mMIMO.

4.2.6 Prueba de Normalidad: Para L , N y la SE en CF-mMIMO - (K constante)

En la Tabla 15, se encuentran los resultados del test de normalidad aplicado cuando se trabajó con el escenario de CF-mMIMO con 200 UEs. Ahí podemos visualizar el análisis del parámetro L en todas las configuraciones con el supuesto del p-valor > 0.05 , obteniendo valores entre los 0.950 cuando se trabaja con 100 CSs y 0.998 cuando se trabaja con 50 CSs. Estos resultados determinan que los datos de SE asociados al parámetro L (de 10 a 100 CSs) se ajustan adecuadamente a una distribución normal, lo que valida la aplicación de métodos paramétricos en los análisis posteriores.

Además, el análisis también se centra en N que, por el contrario de L todas las configuraciones cumplen con que p-valor > 0.05 con un decrecimiento en los valores a medida que el número de antenas aumenta. Por ejemplo, cuando se trabaja con 1 antena el valor de p-valor=0.957 y cuando se trabaja con 16 antenas en p-valor= 0.685 demostrando una dispersión en los datos acorde aumentan el número de antenas. Analizando N , se puede comprobar que existe el cumplimiento de la pauta de normalidad en todas las configuraciones y con una tendencia decreciente. Sugiriendo que en escenarios con una mayor capacidad de antenas se debe considerar muestras mucho más amplias, con el fin de mitigar desviaciones en la distribución.

Tabla 15. Test de normalidad de los parámetros L , N y la SE para el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL para 200 UEs.

Fuente: Autor

Test de Normalidad para la Eficiencia Espectral (SE)			
En un escenario de 200 UEs			
Parámetro	Configuración	Número de Muestras	Significancia (Sig.)
Número de CSs (L)	10 CSs	4	.955
	20 CSs	4	.985
	30 CSs	4	.984
	40 CSs	4	.998
	50 CSs	4	.984
	60 CSs	4	.996
	70 CSs	4	.976
	80 CSs	4	.956
	90 CSs	4	.970
	100 CSs	4	.950
Número de Antenas por CSs (N)	1 Antena	10	.957
	4 Antenas	10	.858
	8 Antenas	10	.788
	16 Antenas	10	.685

4.2.7 Análisis ANOVA: Efecto de L y N en la SE de CF-mMIMO - (K constante)

El análisis de varianza (ANOVA) para este escenario (K constante) indica que el parámetro N ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre la SE en el sistema CF-mMIMO, incluso bajo una carga fija de 200 UEs ($F = 14.414$, p -valor < 0.001), lo que reafirma su valor determinante en el rendimiento del sistema. Por otro lado, la variación del parámetro L , no alcanza un nivel de significancia estadística ($F = 2.031$, p -valor = 0.071), ya que su p -valor supera el umbral convencional de 0.05 y su estadístico F se aproxima a la unidad, lo que sugiere que las diferencias observadas podrían atribuirse a variaciones aleatorias más que a un efecto sistemático del parámetro.

Tabla 16. Análisis ANOVA de la SE entre grupos de L y N en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL para 200 UEs.

Fuente: Autor

ANOVA: Comparación Entre Grupos de L			
Eficiencia Espectral [SE]	Fuente de Variación	F	Significancia (Sig.)
	Entre grupos de CSs	2.031	.071
	Entre grupos de Antenas por CS	14.414	<0.001

Estos resultados demuestran que, en escenarios de alta densidad de UEs, la SE depende críticamente de la configuración de antenas por CS (N), mientras que el escalamiento de sitios celulares (L) pierde relevancia. Esto indica que las estrategias de optimización deberían enfocarse en maximizar la capacidad por unidad de infraestructura (antenas/CS) más que en incrementar el número de CSs, alineándose con hallazgos previos, pero destacando la robustez de N incluso bajo condiciones de carga extrema.

4.2.8 Post-Hoc (Tukey): SE según L y N (Grupos) en CF-mMIMO - (K constante)

Los resultados obtenidos en la prueba de Tukey cuando se trabaja con 200 UEs fijos, dan a conocer que el parámetro N tiene una gran influencia en la SE. Las comparaciones indican que las configuraciones extremas marcan diferencias claras, por ejemplo: usar una antena difiere significativamente de usar 8 o 16 cuyo p -valor= 0.001 y p -valor <0.001 respectivamente, de igual forma se observa diferencia entre 4 y 16 donde p -valor= 0.003 . Por el contrario, en configuraciones intermedias como lo son 4 vs. 8 antenas y 8 vs. 16 antenas no se observan diferencias significativas sugiriendo que el SE tiende a estabilizarse al superar cierto número de antenas.

Por otra parte, L no mostro diferencias significativas en ninguna de las comparaciones. Esto nos indica el rendimiento espectral no está garantizado así se aumenta el número de estaciones y se tenga una carga de 200 usuarios a diferencia de lo que ocurre con N . Por concluir para sistemas CF-mMIMO que tengan alta carga de usuarios, el número de antenas por CS es mucho más determinante que la cantidad de CSs desplegadas.

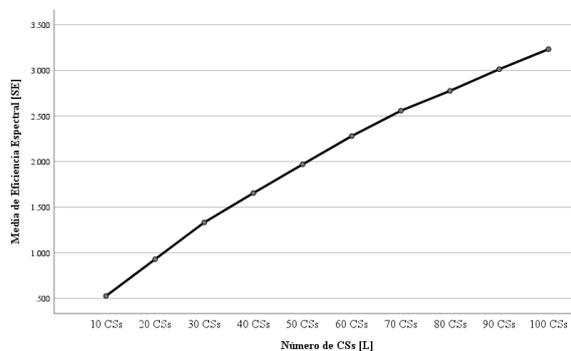
Tabla 17. Comparaciones múltiples post-hoc (prueba HSD de Tukey) de la SE entre L y N en el sistema CF-mMIMO en UL para 200UEs.

Fuente: Autor

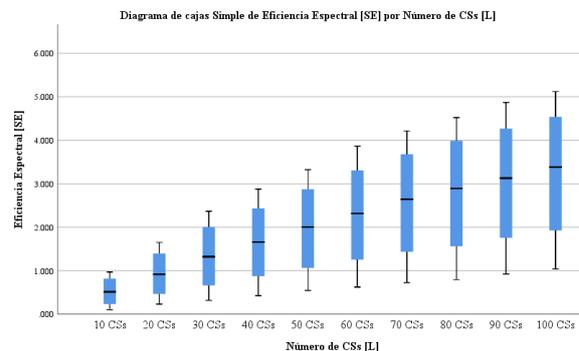
HSD Tukey: Comparaciones múltiples - N				
Variable Dependiente	Número de Antenas por CSs [N]		Diferencia de medias (A - B)	Significancia (Sig.)
	Grupo A	Grupo B		
Número de Antenas por CSs (N)	1 Antena	4 Antenas	-1.099974	.081
	1 Antena	8 Antenas	-1.910430*	.001
	1 Antena	16 Antenas	-2.804958*	.000
	4 Antenas	8 Antenas	-.810456	.279
	4 Antenas	16 Antenas	-1.704984*	.003
	8 Antenas	16 Antenas	-.894528	.202
Número de CSs (L)	Anexo 5			
<i>Nota: *. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.</i>				

Por último, se presenta los resultados donde se puede observar los patrones de comportamiento de la SE según su configuración. En la Ilustración 28 (a) y (b) se puede visualizar el incremento de SE a medida que se aumenta el número de CSs (L) de 10 a 100. Los diagramas de cajas demuestran que se superponen en rangos a partir de 30 CSs, comprobando la veracidad de los análisis realizados anteriormente donde no se encontraron diferencias significativas entre estas configuraciones.

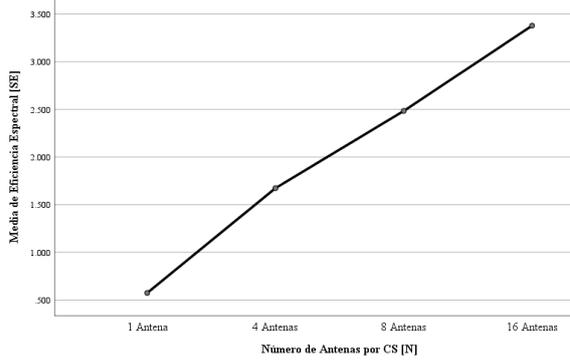
En la Ilustración 28 (c) y (d) la cual corresponde al número de antenas por CS (N) visualizando un crecimiento lineal y promedio en la media de SE cuanto se trabaja desde 1 hasta 16 antenas, sin señales de saturación en su rendimiento. Por el contrario, en los diagramas de cajas se puede observar la separación que existe entre configuraciones de L con N. Concluyendo que el parámetro N tiene un mayor impacto que L en la mejora de SE.



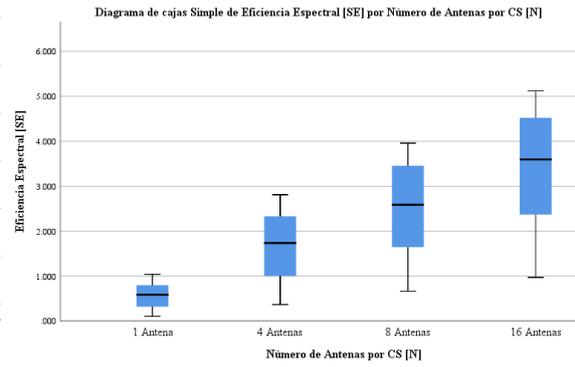
(a)



(b)



(c)



(d)

Ilustración 28. Media y diagrama de cajas de la SE en función de L (a, b) y N (c, d) en sistemas CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL.

Fuente: Autor

CAPITULO V.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se analizó el impacto que genera el número de CSs (L), el número de antenas por CS (N) y el número de UEs (K) en la eficiencia espectral (SE) de sistemas Cell-Free Massive MIMO (CF-mMIMO) en la transmisión de datos en el enlace ascendente (UL). Los resultados indicaron que la SE mejora considerablemente al incrementar L y N , especialmente en escenarios con una densidad moderada de UEs, ya que esto permite una distribución más eficiente de los recursos y una mejor diversidad espacial en el sistema. Sin embargo, en escenarios con alta densidad de UEs, la SE disminuye debido a interferencias y sobrecarga del sistema, incluso al aplicar el procesamiento P-MMSE, lo que resalta la necesidad de un dimensionamiento óptimo de la infraestructura. Por otro lado, en sistemas con un número fijo de UEs y una infraestructura suficientemente densa en L y N , la SE tiende a mejorar, ya que los UEs no saturan la red, demostrando la escalabilidad y eficiencia del CF-mMIMO en la gestión de recursos espectrales.
- Se concluye que la SE tiene variaciones significativas según su configuración (L , N , K) del sistema, demostrando la importancia del diseño óptimo en sistemas CFmMimo. En casos de configuración limitada ($L \leq 20$ CSs, $N \leq 4$ antenas), la SE fue muy baja (≈ 0 bit/s/Hz) cuando existen escenarios con una alta densidad de usuarios (100 UEs), determinando la poca capacidad que tienen estas configuraciones para trabajar con cargas elevadas obteniendo una degradación de SE. Por el contrario, las configuraciones más robustas ($L \geq 40$ CSs, $N = 16$ antenas), se obtuvo valores SE óptimos ($L \geq 40$ CSs, $N = 16$ antenas) y niveles aceptables (~ 4 bit/s/Hz con 100 UEs), dando a conocer una mayor estabilidad y escalabilidad. En este análisis si pudo observar el incremento de L mejora la cobertura, pero N es el factor determinante para obtener una mejor estabilidad y eficiencia en el sistema.
- Se concluye que el análisis estadístico mediante la ejecución de una prueba de ANOVA de factor y el post-hoc de Tukey, confirma la diferencia entre el SE al variar el número de antenas, CSs, UEs. Se debe tener en cuenta que una mayor infraestructura mejora la SE, los resultados dan a conocer que existe un límite en la capacidad de gestión en altas densidades de UEs sin ser capaz de comprometer la calidad de servicio (QoS). En específico cuando la cantidad de UEs es de 200 y la infraestructura con la que se trabaja es de $L \geq 40$ CSs, $N \geq 16$ antenas donde se obtuvo que la SE tiende a crecer, comprobando la escalabilidad de los sistemas CF-mMIMO y la eficiencia en la transmisión de datos en el UL.

5.2. Recomendaciones

- Implementar configuraciones equilibradas entre el número de CSs y antenas por CS para optimizar la SE en sistemas CF-mMIMO. Por ejemplo, en escenarios con alta densidad de UEs, priorizar un mayor número de CSs en lugar de incrementar únicamente las antenas por CS, ya que esto ayuda a distribuir mejor la carga y reducir interferencias.
- Los resultados dan a conocer la relación entre la infraestructura y la demanda de UEs es sumamente importante para mantener la QoS. Es por esto que se recomienda emplear sistemas encargados de monitorear en tiempo real y ajustar dinámicamente los parámetros de la red según el número de UEs, con esto se garantiza un equilibrio entre SE y la experiencia del usuario, específicamente en horarios donde el tráfico es alto.
- Desarrollar algoritmos de adaptación dinámica que ajusten en tiempo real la configuración de antenas y CSs en función de la variabilidad del tráfico y las condiciones del canal. Esto facilitara una distribución eficiente de los recursos, mejorando la QoS en horas pico y garantizando un equilibrio entre infraestructura y demanda.
- Se recomienda la implementación de técnicas de beamforming, mediante algoritmos de inteligencia artificial. Esto permitirá optimizar los patrones de radiación, donde como resulta una mejora significativa en la cobertura y la relación señal-interferencia-ruido (SINR). Teniendo en cuenta que en entornos donde existen una alta densidad de UEs, esta práctica es efectiva para reducir la interferencia interusuario. Los sistemas beamforming son sistemas inteligentes que se deben implementar de forma progresiva para ser capaces de ofrecer mejoras de forma escalable.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Abuyaghi, S. Si-Mohammed, G. Shaker, and C. Rosenberg, “Positioning in 5G Networks: Emerging Techniques, Use Cases, and Challenges,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 2, pp. 1408–1427, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2024.3487822.
- [2] Y. Cordoba Cuesta, “Avances y aplicaciones de las comunicaciones inalámbricas de corto alcance de alta frecuencia,” *SciELO Prepr.*, vol. 29, p. 1, 2024, doi: 10.1590/SciELOPreprints.7966.
- [3] J. J. I. Mendoza, M. J. I. Campoverde, D. R. M. Lima, R. M. S. Jumbo, and L. E. Conde-Zhingre, “The 5G Mobile Network and Its Contribution Towards Smart Cities,” in *2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 2022, pp. 1–7. doi: 10.23919/CISTI54924.2022.9820204.
- [4] M. H. Alsharif, A. H. Kelechi, M. A. Albreem, S. A. Chaudhry, M. S. Zia, and S. Kim, “Sixth Generation (6G) Wireless Networks: Vision, Research Activities, Challenges and Potential Solutions,” *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 4, 2020, doi: 10.3390/sym12040676.
- [5] Y. Huo *et al.*, “Technology Trends for Massive MIMO towards 6G,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, 2023, doi: 10.3390/s23136062.
- [6] X. Shi *et al.*, “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)*, 2016, pp. 329–330. doi: 10.1109/APCAP.2016.7843227.
- [7] 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.
- [8] L. Tello-Oquendo, I. F. Akyildiz, S.-C. Lin, and V. Pla, “SDN-based architecture for providing reliable Internet of Things connectivity in 5G systems,” in *2018 17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, 2018, pp. 1–8. doi: 10.23919/MedHocNet.2018.8407080.
- [9] A. Vishwakarma and D. K. Meda, “Optimal Detection of data symbol in UDMT Massive MIMO 5G System model for high spectral efficiency and energy efficiency,” in *2021 4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, 2021, pp. 501–505. doi: 10.1109/RDCAPE52977.2021.9633540.
- [10] E. Björnson, S. Member, L. Sanguinetti, and S. Member, “Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 7, pp. 4247–4261, 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2020.2987311.
- [11] N. Lan, “Evolution of Wireless Technology: From 1G to 5G,” *Asian J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 07, pp. 68–73, 2023, doi: 10.38177/ajast.2023.7408.
- [12] Q. Wu, “4G Communication Technology Wireless Network Secure Communication,” *2021 Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. IWCMC 2021*, pp. 915–918, 2021, doi:

10.1109/IWCMC51323.2021.9498797.

- [13] M. Rochman, W. Ye, Z.-L. Zhang, and M. Ghosh, “A Comprehensive Real-World Evaluation of 5G Improvements over 4G in Low- and Mid-Bands,” 2024, pp. 257–266. doi: 10.1109/DySPAN60163.2024.10632844.
- [14] M. A. AlQaisei, A.-F. A. Sheta, and I. Elshafiey, “Hybrid Beamforming for Multi-User Massive MIMO Systems at Millimeter-Wave Networks,” in *2022 39th National Radio Science Conference (NRSC)*, 2022, pp. 181–187. doi: 10.1109/NRSC57219.2022.9971273.
- [15] V. H. Guadalupe Mori *et al.*, “Investigación y aplicación de tecnologías inalámbricas de bajo consumo energético en la Internet de las cosas,” *J. Sci. Technol. Res. Ind.*, vol. 4, no. 2, pp. 28–35, 2023, doi: 10.47422/jstri.v4i2.42.
- [16] T. Alnemran and M. Qabazard, “Wireless Networks: Types, Implementations, and Applications,” *Tahani Alnemran J. Eng. Res. Appl.*, vol. 10, no. 01, pp. 23–27, 2020, doi: 10.9790/9622-1001032327.
- [17] E. G. Chávez Cuc, “Propuesta de automatización de entrega de reporte semanal de rendimiento de cortadores, a caporales responsables de grupos, en frentes de corte de caña,” Universidad del Valle de Guatemala, 2022.
- [18] M. Alrubei, I. Alshimaysawe, A. Hassan, and A. Khwayyir, “Capacity analysis & performance comparison of SISO, SIMO, MISO & MIMO systems,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1530, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1530/1/012077.
- [19] E. Björnson *et al.*, “Towards 6G MIMO: Massive Spatial Multiplexing, Dense Arrays, and Interplay Between Electromagnetics and Processing,” pp. 1–36, 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2401.02844>
- [20] R. Chataut and R. Akl, “Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 10, pp. 1–35, 2020, doi: 10.3390/s20102753.
- [21] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, “Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency,” *Found. Trends® Signal Process.*, vol. 11, no. 3–4, pp. 154–655, 2020, doi: 10.1561/20000000093.
- [22] S. Senger and P. K. Malik, “A comprehensive survey of massive-MIMO based on 5G antennas,” *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, vol. 32, no. 12, pp. 1–28, 2022, doi: 10.1002/mmce.23496.
- [23] J. Kassam, D. Castanheira, A. Silva, R. Dinis, and A. Gameiro, “A Review on Cell-Free Massive MIMO Systems,” *Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 1–18, 2023, doi: 10.3390/electronics12041001.
- [24] D. Prado, 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.
- [25] A. Mahnoor, S. Ayesha, J. Bomi, J. Seo, and K. Dongkyun, “Cell-free massive

- multiple-input multiple-output challenges and opportunities: A survey,” *ICT Express*, vol. 10, no. 1, pp. 194–212, 2024, doi: 10.1016/j.icte.2023.10.007.
- [26] Ö. T. Demir, E. Björnson, and L. Sanguinetti, “Foundations of user-centric cell-free massive MIMO,” *Found. Trends Signal Process.*, vol. 14, no. 3–4, pp. 162–472, 2021, doi: 10.1561/2000000109.
- [27] A. Sheikhi, S. M. Razavizadeh, and I. Lee, “A Comparison of TDD and FDD Massive MIMO Systems Against Smart Jamming,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 72068–72077, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2987606.
- [28] Ö. T. Demir, E. Björnson, and L. Sanguinetti, “Foundations of User-Centric Cell-Free Massive MIMO,” *Found. Trends® Signal Process.*, vol. 14, no. 3–4, pp. 162–472, 2021, doi: 10.1561/2000000109.
- [29] 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.
- [30] A. V Konopatov, Y. V Shidlovsky, A. A. Shtil, and O. V Bylino, “Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk single distribution analysis methods in examining sample structure, strength of genetic background, and effects of interventions in lifespan and aging studies,” *bioRxiv*, 2024, doi: 10.1101/2024.12.12.628153.
- [31] J. Alcaraz, L. Anton-Sanchez, and J. F. Monge, “The Concordance Test, an Alternative to Kruskal-Wallis Based on the Kendall-T Distance: An R Package,” *R J*, vol. 14, pp. 26–53, 2022.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de la SE del sistema CF-mMIMO en el enlace ascendente para configuraciones basadas en el número de CSs.

Resultados generales de la SE bajo una configuración de 10 CSs, con {1, 4, 8, 16} antenas por CS y un rango de {10, 20, ..., 100} UEs por escenario

Fuente: Autor

10 CSs				
UEs	Número de antenas por CS (N)			
	1	4	8	16
10	0.642542095	1.332279202	1.63256715	2.2758676
20	0.505301128	1.131634845	1.67290743	2.32246826
30	0.495038997	1.118068924	1.56892258	2.02968992
40	0.348814231	0.985703896	1.51798435	2.02760327
50	0.344789901	0.935643042	1.33361706	1.95672935
60	0.296323249	0.868021188	1.25877486	1.76771868
70	0.320616118	0.769493444	1.16550699	1.75456839
80	0.252268406	0.7401945	1.11143851	1.66848921
90	0.225285854	0.698353002	1.03964367	1.53530658
100	0.214817836	0.619968855	0.98366385	1.41944023

Resultados generales de la SE bajo una configuración de 20 CSs, con {1, 4, 8, 16} antenas por CS y un rango de {10, 20, ..., 100} UEs por escenario

Fuente: Autor

20 CSs				
UEs	Número de antenas por CS (N)			
	1	4	8	16
10	1.258668583	2.61050947	2.95624477	3.75162553
20	1.185181436	2.26415995	3.08000216	3.87110847
30	0.888445145	2.19844136	2.93483124	3.45719272
40	0.740293503	1.90827391	2.44881685	3.38162287
50	0.654055635	1.60474888	2.52186733	3.03035275
60	0.634998153	1.64826173	2.28716975	3.07129909
70	0.515672159	1.46194277	2.24866898	2.84876968
80	0.504179997	1.4059311	2.05329074	2.8723458
90	0.434881621	1.29210207	1.81506474	2.68357216
100	0.417851618	1.2585836	1.81844524	2.55122076

Resultados generales de la SE bajo una configuración de 30 CSs, con {1, 4, 8, 16} antenas por CS y un rango de {10, 20, ..., 100} UEs por escenario

Fuente: Autor

30 CSs				
UEs	Número de antenas por CS (N)			
	1	4	8	16
10	1.522759507	2.817045507	3.807654444	5.006402365
20	1.348728963	2.914712059	3.846393345	4.757047389
30	1.288664962	2.674459728	3.70841093	4.512537808
40	1.10080915	2.604366977	3.524247816	4.460423191
50	0.994908295	2.3009329	3.252542714	4.195757233
60	0.8154412	2.323581782	3.105341164	3.95813593
70	0.777727513	2.035639728	2.955148507	3.865120814
80	0.673635594	1.973788663	2.76208229	3.639230011
90	0.639582247	1.807270377	2.704345769	3.423757226
100	0.587167097	1.736312866	2.439386913	3.292466775

Resultados generales de la SE bajo una configuración de 40 CSs, con {1, 4, 8, 16} antenas por CS y un rango de {10, 20, ..., 100} UEs por escenario

Fuente: Autor

40 CSs				
UEs	Número de antenas por CS (N)			
	1	4	8	16
10	1.895152777	3.573619168	4.841097538	5.919783466
20	1.886148569	3.480778383	4.548455261	5.650411383
30	1.674093385	3.337788537	4.279736842	5.320889515
40	1.419005431	3.107094963	4.300490002	5.185346396
50	1.26704071	2.871356261	3.94677748	4.936354236
60	1.24350205	2.655690854	3.751476119	4.585666418
70	1.04442845	2.575969178	3.577385409	4.558243012
80	0.961031508	2.394840455	3.391888861	4.3640173
90	0.868914076	2.278863302	3.230361025	4.255001699
100	0.80808793	2.246506137	3.076238269	4.054486402

- **Anexo 2.** Resultados de la SE del sistema CF-mMIMO en el enlace ascendente para configuraciones basadas en el número de antenas por CS.

Resultados generales de la SE bajo una configuración de 1 antena por CS, con {10, 20, 30, 40} CSs y un rango de {10, 20, ..., 100} UEs por escenario

Fuente: Autor

1 Antena por CS				
UEs	Número de CSs (L)			
	10	20	30	40
10	0.722733092	1.07391903	1.796116954	2.087032014
20	0.508063715	1.019671624	1.53618035	1.757823486
30	0.471024515	0.870444575	1.274798346	1.715033239
40	0.359694647	0.79012483	1.126852045	1.452627272
50	0.368018425	0.699250072	1.042926807	1.271983764
60	0.320329827	0.618915221	0.846112903	1.096081187
70	0.250605739	0.550316119	0.786023823	1.054689013
80	0.256459875	0.513132131	0.756316839	0.990685893
90	0.232627717	0.409765248	0.646616123	0.874162776
100	0.200993659	0.401410189	0.628095512	0.775542552

Resultados generales de la SE bajo una configuración de 4 antenas por CS, con {10, 20, 30, 40} CSs y un rango de {10, 20, ..., 100} UEs por escenario

Fuente: Autor

4 Antena por CS				
UEs	Número de CSs (L)			
	10	20	30	40
10	1.390891901	2.287895601	3.170496134	4.114929599
20	1.221545451	2.252108477	3.064252564	3.651864054
30	1.150275697	2.020847481	2.786619721	3.189280869
40	0.992877487	1.635259208	2.484493315	3.200808055
50	0.928787615	1.727985833	2.414921495	2.933498505
60	0.826163747	1.494711159	2.112284451	2.738645093
70	0.742078496	1.546446176	2.125911471	2.531940589
80	0.731918498	1.353984109	1.962589065	2.451119226
90	0.681585629	1.336836666	1.826521768	2.285879597
100	0.671677419	1.208310068	1.627880118	2.158448298

Resultados generales de la SE bajo una configuración de 8 antenas por CS, con {10, 20, 30, 40} CSs y un rango de {10, 20, ..., 100} UEs por escenario

Fuente: Autor

4 Antena por CS				
UEs	Número de CSs (L)			
	10	20	30	40
10	2.009526609	3.124085168	4.075317997	5.012385924
20	1.743987639	2.854620601	3.868275357	4.343777528
30	1.472842272	2.797505337	3.581006862	4.401399256
40	1.447025418	2.609197063	3.302573237	4.104654529
50	1.358796491	2.361370314	3.329083924	3.91086602
60	1.258443663	2.184251172	2.985010813	3.815142609
70	1.115108209	2.118124771	2.889292035	3.519714637
80	1.134941505	1.98051519	2.699858677	3.267049254
90	1.072330049	1.931168871	2.607265869	3.166867805
100	0.958900777	1.86310777	2.549974511	3.077710636

Resultados generales de la SE bajo una configuración de 16 antenas por CS, con {10, 20, 30, 40} CSs y un rango de {10, 20, ..., 100} UEs por escenario

Fuente: Autor

4 Antena por CS				
UEs	Número de CSs (L)			
	10	20	30	40
10	2.411253632	3.855134098	5.193350066	5.682282761
20	2.297268708	3.668042153	4.550131932	5.400484125
30	2.192388041	3.465604727	4.649405021	5.34890186
40	2.047816777	3.353771582	4.445381156	5.027831697
50	1.877743646	3.18295584	4.011151703	4.975707941
60	1.753969893	3.156152089	4.016330978	4.69209585
70	1.673146517	2.935608866	3.909300887	4.552162324
80	1.594752182	2.798269096	3.694308955	4.432385319
90	1.590345327	2.702379125	3.615650516	4.170529082
100	1.465058853	2.47692697	3.340945517	4.107037561

- **Anexo 3.** Resultados de la SE del sistema CF-mMIMO en el enlace ascendente para configuraciones basadas en el número de UEs fijos.

Resultados generales de la SE bajo una configuración de 200 UEs por escenario con {1, 4, 8, 16} antenas por CS y un rango de {10, 20, ..., 100} CSs

Fuente: Autor

200 UEs por escenario				
<i>L</i>	Número de antenas por CSs (<i>N</i>)			
	10	20	30	40
10	0.103750573	0.364211638	0.665464441	0.970425544
20	0.231341407	0.700175203	1.135939724	1.651245708
30	0.317045424	1.003037771	1.643209421	2.368848763
40	0.424413042	1.326657402	1.99272096	2.877364813
50	0.545426774	1.583655969	2.424478823	3.323272443
60	0.62308596	1.886024644	2.747347335	3.865976922
70	0.727382677	2.143646304	3.14422567	4.216166883
80	0.79680052	2.328631133	3.456377831	4.521280065
90	0.923828176	2.588135523	3.671111731	4.869008448
100	1.041350518	2.809989113	3.957846619	5.120412613

- **Anexo 4.** Resultados del post-hoc (prueba HSD de Tukey) de la SE entre grupos de UEs [K] del sistema CF-mMIMO en el enlace ascendente.

Comparaciones múltiples post-hoc (prueba HSD de Tukey) de la SE entre grupos de UEs [K] en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL

Fuente: Autor

HSD Tukey: Comparaciones múltiples - K				
Variable Dependiente	Número de UEs por Sistemas [K]		Diferencia de medias (A - B)	Sig.
	Grupo A	Grupo B		
Eficiencia Espectral [SE]	10 UEs	20 UEs	.086	1.000
	10 UEs	30 UEs	.272	1.000
	10 UEs	40 UEs	.423	.996
	10 UEs	50 UEs	.606	.957
	10 UEs	60 UEs	.723	.880
	10 UEs	70 UEs	.835	.757
	10 UEs	80 UEs	.942	.609
	10 UEs	90UEs	1.056	.441
	10 UEs	100 UEs	1.144	.324
	20 UEs	30 UEs	.186	1.000
	20 UEs	40 UEs	.337	.999
	20 UEs	50 UEs	.519	.984
	20 UEs	60 UEs	.637	.941
	20 UEs	70 UEs	.749	.855
	20 UEs	80 UEs	.856	.730
	20 UEs	90UEs	.970	.566
	20 UEs	100 UEs	1.058	.438
	30 UEs	40 UEs	.151	1.000
	30 UEs	50 UEs	.333	.999
	30 UEs	60 UEs	.450	.994
	30 UEs	70 UEs	.563	.973
	30 UEs	80 UEs	.669	.921
	30 UEs	90UEs	.784	.818
	30 UEs	100 UEs	.872	.708
	40 UEs	50 UEs	.182	1.000
	40 UEs	60 UEs	.299	1.000
	40 UEs	70 UEs	.411	.997
	40 UEs	80 UEs	.518	.985
	40 UEs	90UEs	.633	.944
	40 UEs	100 UEs	.721	.882
	50 UEs	60 UEs	.117	1.000
	50 UEs	70 UEs	.229	1.000
	50 UEs	80 UEs	.336	.999
	50 UEs	90UEs	.450	.994
	50 UEs	100 UEs	.538	.980
	60 UEs	70 UEs	.112	1.000
	60 UEs	80 UEs	.218	1.000
	60 UEs	90UEs	.333	.999
	60 UEs	100 UEs	.421	.997
	70 UEs	80 UEs	.106	1.000
	70 UEs	90UEs	.221	1.000

	70 UEs	100 UEs	.309	1.000
	80 UEs	90UEs	.114	1.000
	80 UEs	100 UEs	.202	1.000
	90UEs	100 UEs	.087	1.000
<i>Nota: *. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.</i>				

- **Anexo 5.** Resultados del post-hoc (prueba HSD de Tukey) de la SE entre grupos de CSs [L] del sistema CF-mMIMO en el enlace ascendente para 200 UEs.

Comparaciones múltiples post-hoc (prueba HSD de Tukey) de la SE entre grupos de CSs [L] en el sistema CF-mMIMO en la transmisión de datos en UL para 200 UEs (K constante).

Fuente: Autor

HSD Tukey: Comparaciones múltiples - L				
Variable Dependiente	Número de CSs [L]		Diferencia de medias (A - B)	Sig.
	Grupo A	Grupo B		
Eficiencia Espectral [SE]	10 CSs	20 CSs	-.403712	1.000
	10 CSs	30 CSs	-.807072	.995
	10 CSs	40 CSs	-1.129326	.956
	10 CSs	50 CSs	-1.443245	.837
	10 CSs	60 CSs	-1.754646	.638
	10 CSs	70 CSs	-2.031892	.444
	10 CSs	80 CSs	-2.249809	.309
	10 CSs	90CSs	-2.487058	.195
	10 CSs	100 CSs	-2.706437	.121
	20 CSs	30 CSs	-.403360	1.000
	20 CSs	40 CSs	-.725614	.998
	20 CSs	50 CSs	-1.039533	.974
	20 CSs	60 CSs	-1.350933	.882
	20 CSs	70 CSs	-1.628180	.725
	20 CSs	80 CSs	-1.846097	.573
	20 CSs	90CSs	-2.083345	.410
	20 CSs	100 CSs	-2.302724	.280
	30 CSs	40 CSs	-.322254	1.000
	30 CSs	50 CSs	-.636173	.999
	30 CSs	60 CSs	-.947573	.986
	30 CSs	70 CSs	-1.224820	.930
	30 CSs	80 CSs	-1.442737	.837
	30 CSs	90CSs	-1.679986	.690
	30 CSs	100 CSs	-1.899364	.535
	40 CSs	50 CSs	-.313919	1.000
	40 CSs	60 CSs	-.625320	.999
	40 CSs	70 CSs	-.902566	.990
	40 CSs	80 CSs	-1.120483	.958
	40 CSs	90CSs	-1.357732	.879
	40 CSs	100 CSs	-1.577111	.758
50 CSs	60 CSs	-.311400	1.000	
50 CSs	70 CSs	-.588647	1.000	
50 CSs	80 CSs	-.806564	.995	
50 CSs	90CSs	-1.043812	.973	

	50 CSs	100 CSs	-1.263191	.917
	60 CSs	70 CSs	-.277247	1.000
	60 CSs	80 CSs	-.495164	1.000
	60 CSs	90CSs	-.732412	.998
	60 CSs	100 CSs	-.951791	.985
	70 CSs	80 CSs	-.217917	1.000
	70 CSs	90CSs	-.455166	1.000
	70 CSs	100 CSs	-.674544	.999
	80 CSs	90CSs	-.237249	1.000
	80 CSs	100 CSs	-.456627	1.000
	90CSs	100 CSs	-.219379	1.000
<i>Nota: *. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.</i>				