



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Evaluación de rendimiento de un prototipo real de red 5G

Autor

Alejandra Cabrera Estepa

Directores

Jorge Navarro Ortiz

Félix Delgado Ferro



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS INFORMÁTICA Y DE
TELECOMUNICACIÓN

Granada, junio de 2026

Evaluación de rendimiento de un prototipo real de red 5G

Autor

Alejandra Cabrera Estepa

Directores

Jorge Navarro Ortiz

Félix Delgado Ferro

DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL, TELEMÁTICA Y
COMUNICACIONES

Granada, junio de 2026

Evaluación de rendimiento de un prototipo real de red 5G

Alejandra Cabrera Estepa

Palabras clave: 5G NR, red privada, Android, métricas radio, RSRP, SINR, *handover*, *throughput*, Amarisoft.

Resumen

En este trabajo se presenta la evaluación experimental de una red privada exterior 5G NR basada en tecnología Amarisoft, desplegada en el Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de la Universidad de Granada(CITIC) y la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación (ETSIIT).

Para ello se ha desarrollado la aplicación Android *5G Scanner*, que permite capturar métricas radio como RSRP, RSRQ, SINR, CQI, PCI y TAC, asociarlas a una posición GPS, detectar cambios de celda y ejecutar pruebas activas mediante *ping* e *iperf3*. Además, la aplicación permite visualizar los resultados mediante mapas, gráficas e integración opcional con InfluxDB y Grafana.

La evaluación se ha realizado mediante dos recorridos de medida sobre el despliegue exterior. Los resultados permiten estudiar la cobertura, la calidad radio, la latencia, el *throughput* y la movilidad entre celdas, identificando diferencias entre sectores y zonas de degradación. En conjunto, el trabajo caracteriza experimentalmente la red Amarisoft desplegada y valida *5G Scanner* como herramienta de apoyo para el análisis de redes privadas 5G NR.

Performance evaluation of a real 5G network prototype

Alejandra Cabrera Estepa

Keywords: 5G NR, private network, Android, radio metrics, RSRP, SINR, *handover*, *throughput*, Amarisoft.

Abstract

This work presents the experimental evaluation of an outdoor private 5G NR network based on Amarisoft technology, deployed at the Research Centre for Information and Communications Technologies of the University of Granada (CITIC) and the Higher Technical School of Computer and Telecommunication Engineering (ETSIIT).

To this end, the Android application *5G Scanner* has been developed. This application allows radio metrics such as RSRP, RSRQ, SINR, CQI, PCI and TAC to be captured, associated with a GPS position, and used to detect cell changes and run active tests through *ping* and *iperf3*. In addition, the application enables the results to be visualised through maps, graphs and optional integration with InfluxDB and Grafana.

The evaluation was carried out through two measurement routes over the outdoor deployment. The results make it possible to study coverage, radio quality, latency, *throughput* and mobility between cells, identifying differences between sectors and degradation areas. Overall, this work experimentally characterises the deployed Amarisoft network and validates *5G Scanner* as a support tool for the analysis of private 5G NR networks.

Yo, **Alejandra Cabrera Estepa**, alumna de la titulación **Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación** de la **Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación de la Universidad de Granada**, con DNI 77992828N, autorizo la ubicación de la siguiente copia de mi Trabajo Fin de Grado en la biblioteca del centro para que pueda ser consultada por las personas que lo deseen.

Alejandra Cabrera Estepa

Granada a 22 de Junio de 2026.

D. **Jorge Navarro Ortiz**, Profesor del Área de Ingeniería Telemática del Departamento Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

D. **Félix Delgado Ferro**, estudiante de doctorado en el el Departamento Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

Informan:

Que el presente trabajo, titulado ***Evaluación de rendimiento de un prototipo real de red 5G***, ha sido realizado bajo su supervisión por **Alejandra Cabrera Estepa**, y autorizamos la defensa de dicho trabajo ante el tribunal que corresponda.

Y para que conste, expiden y firman el presente informe en Granada a 22 de junio de 2026 .

Los directores:

Jorge Navarro Ortiz

Félix Delgado Ferro

Agradecimientos

Parece mentira que haya llegado este momento. Estoy escribiendo los agradecimientos de mi TFG con la sensación de que aún no he terminado el primer año de carrera. Ahora que acabo Teleco, parece que no ha sido tan difícil; pero, mirando hacia atrás, ha sido un camino largo, lleno de esfuerzo, constancia y dedicación. Este camino ha sido mucho más llevadero gracias a todas las personas que han estado a mi lado.

A mis padres, Rosa y Pedro. Gracias por ser mis mejores amigos, por darme la mejor educación, los mejores consejos, vuestro tiempo y por creer siempre en mí. Soy la persona que soy gracias a vosotros. No podría haber conseguido mis logros sin vuestro apoyo. Os quiero muchísimo.

A mi familia. En especial, a mis abuelos, a los que están aquí y a los que me cuidan desde el cielo. Y a mis tías Carmen y Maribel, por estar siempre tan pendientes de mí, especialmente en épocas de exámenes.

A mis chekis: Dani, Candi, Onti, Maci... Con una mención especial a Paula y Alba. Paula, has sido mi 1+1 desde el primer día de clase. Hemos compartido cada paso, cada reto y cada momento, y no imagino esta etapa sin ti. Alba, has sido mi mano a mano durante toda la carrera, la persona que mejor me entiende y la mejor compañera que se puede tener.

A Lu del Águila y a Almudena, por ser mis mejores amigas desde siempre; y a mi mejor amigo, Alfon. Gracias por vuestro apoyo incondicional.

A Chema y José David, por ayudarme tanto en la carrera.

A Jorge y Félix, por la paciencia y dedicación que habéis tenido conmigo. Vuestro apoyo ha hecho que este trabajo no fuese tan difícil.

Por último, y como uno de mis apoyos más importantes, a Jesús. Gracias por acompañarme durante toda la carrera, escucharme y apoyarme. No ha habido ni un solo día en el que no hayas apostado por mí. Te quiero.

Muchas gracias a todos. Me seguiré retando día a día y espero conseguir

todo lo que me proponga. Y, sobre todo, espero que sigáis a mi lado. Os quiero mucho.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Contexto y Motivación	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Metodología	5
1.3.1. Bloque de trabajo 1: Estudio y configuración de una red 5G	6
1.3.2. Bloque de trabajo 2: Desarrollo de la aplicación Android	6
1.3.3. Bloque de trabajo 3: Evaluación experimental y análisis de resultados	7
1.3.4. Bloque de trabajo 4: Redacción y entrega de la memoria	7
1.4. Estructura de la memoria	7
2. Estado del Arte	1
2.1. Plataformas de implementación y despliegue de redes 5G	1
2.1.1. srsRAN	1
2.1.2. OpenAirInterface	2
2.1.3. Open5GS	4
2.1.4. free5GC	6
2.1.5. Amarisoft	7
2.2. Herramientas empleadas para simulación y evaluación experimental	9
2.2.1. UERANSIM	9
2.2.2. Amarisoft UE Simulator	9
2.2.3. MATLAB 5G Toolbox	10
2.2.4. Open Mobile Network Toolkit	11
2.2.5. Network Survey Android App	13
3. Fundamentos teóricos	15
3.1. Tecnologías de comunicaciones móviles 5G	15
3.2. Arquitectura de redes 5G	17
3.3. Movilidad en 5G: <i>handover</i> intercelular, movilidad intra-gNB y movilidad a nivel de haz	20
3.3.1. <i>Handover</i> intercelular en escenarios HetNet 5G	20

3.3.2. Movilidad intra-gNB y movilidad a nivel de haz en 5G NR	25
3.4. Principales métricas de rendimiento	26
4. Planificación y costes	29
4.1. Planificación temporal	29
4.2. Recursos	32
4.2.1. Recursos <i>software</i>	32
4.2.2. Recursos <i>hardware</i>	33
4.2.3. Recursos Humanos	37
4.3. Presupuesto estimado del proyecto	38
5. Diseño, despliegue e implementación	39
5.1. Arquitectura de red y despliegue	39
5.2. Elementos del escenario experimental	40
5.2.1. Recursos <i>hardware</i> de la red exterior	41
5.2.2. Dispositivos, USIMs y herramientas de medida	48
5.2.3. Recursos <i>software</i> de configuración y operación	49
5.3. Configuración del escenario experimental	50
5.3.1. Visión general del despliegue	51
5.3.2. Configuración radio de las celdas NR	53
5.3.3. Limitación de potencia radiada aparente	56
5.3.4. Configuración de red y conexión con el núcleo 5G	58
5.3.5. Configuración de movilidad y <i>handover</i>	59
5.3.6. Configuración de acceso de usuarios mediante USIM	63
5.3.7. Puesta en marcha y monitorización del escenario	64
5.3.8. Relación con las medidas realizadas con <i>5G Scanner</i>	68
5.4. Diseño e implementación de la aplicación 5G Scanner	68
5.4.1. Funcionamiento inicial, permisos y configuración de la aplicación	70
5.4.2. Panel de medición: captura, estado visual y pruebas activas	72
5.4.3. Panel de mapa y visualización espacial	79
5.4.4. Historial, consulta y exportación de pruebas	95
5.4.5. Panel de gráficas y análisis visual	99
5.4.6. Panel Phone Info	111
5.4.7. Flujo general de una prueba experimental	113
6. Pruebas realizadas y análisis de resultados	116
6.1. Metodología de medida	116
6.2. Mediciones realizadas	118
6.3. Análisis de la primera prueba	119
6.3.1. Resultados radio de la primera prueba	119
6.3.2. Conectividad en la primera prueba	123

6.4.	Análisis de la segunda prueba	126
6.4.1.	Resultados radio de la segunda prueba	126
6.4.2.	Conectividad en la segunda prueba	130
6.5.	Comparación entre ambas pruebas	133
6.5.1.	Comparación global	133
6.5.2.	Comparación de condiciones degradadas	134
6.5.3.	Comparación por PCI servidor	135
6.5.4.	Comparación de zonas críticas	136
6.5.5.	Comparación de <i>throughput</i>	142
6.5.6.	<i>Handover</i> y coordenadas	143
6.6.	Discusión de resultados	144
6.7.	Limitaciones observadas	145
7.	Conclusiones y trabajo futuro	147
7.1.	Trabajo futuro	148
	Bibliografía	149
A.	Manual de usuario de la aplicación 5G Scanner	156
A.1.	Inicio de la aplicación	156
A.2.	Configuración inicial	157
A.3.	Realización de una prueba de medición	157
A.4.	Pruebas de conectividad	158
A.5.	Visualización de medidas en el mapa	158
A.6.	Historial de pruebas	159
A.7.	Exportación de datos	160
A.8.	Visualización de gráficas	160
A.9.	Información del terminal	160
A.10.	Recomendaciones de uso	161
A.11.	Finalización de una prueba	162
B.	Estructura de los ficheros CSV generados	163
B.1.	CSV principal de medidas	163
B.2.	CSV de resultados de iperf3	164
B.3.	Uso de los CSV en el análisis experimental	165

Índice de figuras

1.1. Evolución del estándar 5G en los diferentes <i>releases</i> definidos por el 3GPP [3].	2
1.2. Principales áreas de aplicación de las redes 5G [2].	3
2.1. Arquitectura de una red 5G basada en srsRAN, incluyendo los componentes de acceso radio (RU, DU, CU), el núcleo de red y el equipo de usuario.[7]	2
2.2. Arquitectura de la red de acceso radio (RAN) en OpenAirInterface, basada en la separación CU/DU y en interfaces abiertas O-RAN. [8]	3
2.3. Arquitectura del núcleo de red 5G (5GC) en OpenAirInterface, mostrando las principales funciones de red y la separación entre plano de control y plano de usuario. [8]	4
2.4. Arquitectura del núcleo de red 5G basado en Open5GS utilizado como sistema bajo prueba, mostrando la arquitectura basada en servicios, las principales funciones de red y la separación entre el plano de control y el plano de usuario [9].	5
2.5. Hoja de ruta de desarrollo de free5GC, mostrando la evolución prevista de funcionalidades y versiones del sistema[11].	6
2.6. Ejemplo de arquitectura basada en free5GC para la monitorización y observabilidad del plano de usuario mediante eBPF y PFCP.	7
2.7. Arquitectura general de la solución software de Amarisoft, incluyendo red de acceso, núcleo 4G/5G, simulador de usuario y componentes adicionales [12].	8
2.8. Ejemplo de métricas de rendimiento obtenidas en una simulación a nivel de sistema con MATLAB 5G Toolbox, mostrando el <i>throughput</i> , el reparto de recursos, el <i>goodput</i> y el estado del búfer para varios UEs [16].	11
2.9. Interfaz de monitorización de <i>Open Mobile Network Toolkit</i> , mostrando información de celda y métricas radio como RSRP, RSRQ, RSSNR, PCI, TAC, PLMN y CQI [19][20].	12

2.10. Interfaz de <i>Network Survey Android App</i> , mostrando información de red celular, posición del terminal, parámetros de celda y métricas radio como RSRP, RSRQ, SNR, PCI, TAC y CQI [21][22].	13
3.1. Comparación de esquemas de transmisión en redes 4G y 5G, mostrando el uso de beamforming en 5G [4].	16
3.2. Principio de funcionamiento de NOMA mediante asignación de potencia [4].	16
3.3. Arquitectura general del núcleo de red 5G, mostrando la separación entre el plano de control y el plano de usuario [4].	18
3.4. Funciones de red de los componentes de 5G [4].	18
3.5. Arquitectura de la red de acceso radio NG-RAN [5].	19
3.6. Procedimiento de <i>handover</i> del plano de usuario (UP) desde una estación base macrocelular hacia un punto de acceso de celda pequeña [26].	22
3.7. Procedimiento de <i>handover</i> UP entre dos puntos de acceso de celdas pequeñas [26].	23
3.8. Procedimiento de <i>handover</i> entre dos estaciones base macrocelulares 5G con vector de autenticación disponible [26].	24
3.9. Procedimiento de <i>handover</i> entre dos estaciones base macrocelulares 5G sin vector de autenticación disponible [26].	24
3.10. Esquema conceptual de movilidad a nivel de celda y ejemplo de movilidad a nivel de haz dentro de una misma celda en 5G NR.	26
4.1. Diagrama de Gantt de la planificación temporal del proyecto.	31
5.1. Arquitectura de la red exterior.	40
5.2. Antenas situadas en el CITIC.	42
5.3. Antena situada en la ETSIIT.	43
5.4. Representación de la cobertura proporcionada por las antenas de la red exterior.	43
5.5. Conexión física con una de las antenas de la red exterior.	45
5.6. Conexión entre el <i>Switch</i> y la BBU.	46
5.7. <i>Gateway Router, Switch y Core Server</i>	47
5.8. Consola del núcleo Amarisoft con la lista de DNN/APN configurados y los gNB conectados al <i>core</i>	53
5.9. Comprobación en consola de los canales TRX de la estación base Amarisoft.	56
5.10. Terminales de las estaciones base gNB1 y gNB2. Se observa el estado setup_done en la conexión NG con el AMF y el listado de celdas NR configuradas en cada estación base.	59

5.11. Consulta de eventos de <i>handover</i> en gNB1 mediante el comando <code>cevent</code> . La salida permite comprobar los mensajes asociados al procedimiento de movilidad entre las celdas del escenario.	62
5.12. Consulta de eventos y errores de movilidad en gNB2. En la captura no se observan errores de <i>handover</i> asociados a la celda del segundo gNB.	63
5.13. Monitorización de eventos NR en gNB1 durante la operación del escenario.	66
5.14. Monitorización de eventos NR en gNB2 durante la operación del escenario.	66
5.15. Monitorización adicional de eventos NR en gNB1 durante una fase posterior de la operación del escenario.	67
5.16. Monitorización adicional de eventos NR en gNB2 durante una fase posterior de la operación del escenario.	68
5.17. Organización funcional de la aplicación 5G Scanner.	69
5.18. Pantalla de configuración opcional de Grafana e InfluxDB en la aplicación 5G Scanner.	71
5.19. Panel de configuración y visualización de antenas de referencia en 5G Scanner.	72
5.20. Panel principal de medición de la aplicación 5G Scanner antes de iniciar una prueba.	73
5.21. Guía visual de interpretación de las métricas radio empleada en el panel de medición.	74
5.22. Panel de ayuda general asociado al uso de 5G Scanner.	75
5.23. Panel de medición durante una prueba activa, mostrando métricas radio, información de celda, resultados de ping e iperf3.	76
5.24. Resultado de una prueba de ping e iperf3 ejecutada desde el panel de medición.	77
5.25. Resumen generado tras una prueba.	78
5.26. Flujo de secuencia del panel de medición.	79
5.27. Menú desplegable para elegir el parámetro que se quiere representar sobre el mapa.	80
5.28. Representación de la trayectoria coloreada según el valor de RSRP medido durante la prueba.	81
5.29. Representación de la trayectoria coloreada según el valor de SINR.	82
5.30. Representación de la trayectoria coloreada según el valor de CQI.	83
5.31. Representación de puntos de medida coloreados por PCI, mostrando una muestra asociada al PCI 1.	84
5.32. Representación de puntos de medida coloreados por PCI, mostrando una muestra asociada al PCI 2.	84

5.33. Marcador de <i>handover</i> generado tras detectarse un cambio de PCI de 2 a 1.	85
5.34. Representación por PCI incluyendo registros LTE o valores no asociados a 5G NR.	86
5.35. Representación por PCI aplicando el filtro de visualización únicamente a muestras 5G NR.	87
5.36. Visualización del mapa con antenas de referencia configuradas y trayectoria de medidas.	88
5.37. Representación geolocalizada de medidas de latencia obtenidas mediante ping.	89
5.38. Representación sobre el mapa de medidas de <i>throughput</i> obtenidas mediante iperf3.	90
5.39. Representación de una ejecución de iperf3 no válida, diferenciada de las medidas de <i>throughput</i> correctas.	91
5.40. Representación del mapa sin aplicar la vista simplificada, mostrando una mayor densidad de puntos de medida.	92
5.41. Representación del mapa con la vista simplificada activada, manteniendo la trayectoria y reduciendo el número de marcadores.	93
5.42. Panel de ayuda del mapa, donde se explican los parámetros representables y la interpretación de la visualización cartográfica.	94
5.43. Flujo de secuencia del panel de mapa.	95
5.44. Historial de pruebas almacenadas localmente en la aplicación.	96
5.45. Opciones disponibles para una prueba almacenada en el historial.	97
5.46. Flujo de secuencia del panel de historial.	99
5.47. Panel de gráficas para seleccionar una prueba CSV, el tipo de análisis y el parámetro a representar.	100
5.48. Opciones de parámetros disponibles para la representación gráfica.	101
5.49. Gráfica individual de RSRP.	102
5.50. Gráfica de CQI representado como índice de calidad de canal.	103
5.51. Selección de parámetros asociados a las pruebas de ping, incluyendo latencia y pérdida de paquetes.	104
5.52. Gráfica individual de ping medio representado en milisegundos.	105
5.53. Gráfica de <i>throughput</i> obtenido mediante iperf3 y representado en Mbps.	106
5.54. Gráfica comparativa de métricas radio, incluyendo RSRP, RSRQ y SINR con sus unidades indicadas en la leyenda.	107
5.55. Gráfica comparativa de ping medio y último ping, ambos representados en milisegundos.	108
5.56. Panel de ayuda asociado a la interpretación de las gráficas generadas por la aplicación.	109
5.57. Flujo de secuencia del panel de gráficas.	110

5.58. Panel de información del dispositivo, la SIM y la red móvil detectada por el terminal.	111
5.59. Pantalla de información del sistema Android accesible desde el panel Phone Info.	112
5.60. Flujo de secuencia del panel Phone Info.	113
5.61. Flujo general de funcionamiento de una prueba experimental con 5G Scanner.	114
6.1. Recorrido realizado durante la primera prueba de medida. . .	119
6.2. Distribución espacial del RSRP durante la primera prueba. . .	120
6.3. Distribución espacial del SINR durante la primera prueba. . .	121
6.4. Visualización temporal del RSRP en Grafana durante la primera prueba, agrupada por PCI y TAC.	121
6.5. Distribución espacial del CQI durante la primera prueba. . .	122
6.6. Evolución temporal de la latencia durante la primera prueba. .	124
6.7. Evolución temporal del <i>throughput</i> mediante <i>iperf3</i> en la primera prueba.	125
6.8. Visualización en Grafana del <i>throughput</i> obtenido mediante <i>iperf3</i> durante la primera prueba, diferenciando ejecuciones correctas y errores.	126
6.9. Distribución espacial del RSRP durante la segunda prueba. . .	127
6.10. Visualización temporal del RSRP en Grafana durante la segunda prueba, filtrada para los PCI 1, 2 y 3 con TAC 100. . .	128
6.11. Distribución espacial del SINR durante la segunda prueba. . .	128
6.12. Distribución espacial del CQI durante la segunda prueba. . .	129
6.13. Evolución temporal de la latencia durante la segunda prueba. .	131
6.14. Visualización en Grafana de la latencia medida mediante <i>ping</i> durante la segunda prueba.	131
6.15. Evolución temporal del <i>throughput</i> mediante <i>iperf3</i> en la segunda prueba.	132
6.16. Visualización en Grafana del <i>throughput</i> obtenido mediante <i>iperf3</i> durante la segunda prueba, diferenciando ejecuciones correctas y errores.	133
6.17. Representación espacial de las zonas críticas en la primera prueba.	138
6.18. Representación espacial de las zonas críticas en la segunda prueba.	138
6.19. Medida aproximada de distancia y perfil de elevación entre la celda asociada al PCI 2 y una zona crítica.	139
6.20. Medida aproximada de distancia y perfil de elevación entre la celda asociada al PCI 1 y una zona crítica.	140
6.21. Vista 3D del entorno entre la celda asociada al PCI 1 y una zona crítica.	141

6.22. Vista 3D del entorno entre la celda asociada al PCI 2 y una zona crítica.	141
--	-----

Índice de cuadros

4.1. Recursos <i>software</i> utilizados en el proyecto.	32
4.2. Características técnicas de los dispositivos <i>hardware</i> utilizados.	34
4.3. Uso de los dispositivos <i>hardware</i> en el proyecto.	34
4.4. Infraestructura <i>hardware</i> y recursos de conectividad utilizados.	35
4.5. Coste imputado de los recursos <i>hardware</i> utilizados.	36
4.6. Coste estimado de los recursos humanos.	38
4.7. Presupuesto estimado del proyecto.	38
5.1. Ubicación e identificación de las antenas configuradas en la red exterior.	42
5.2. Dispositivos Samsung utilizados durante las pruebas.	48
5.3. Elementos utilizados para la toma de medidas.	49
5.4. Recursos <i>software</i> empleados en la red exterior.	50
5.5. Resumen de nodos configurados en el escenario Amarisoft.	51
5.6. DNN/APN observados en la consola del núcleo Amarisoft.	52
5.7. Identificadores de las celdas NR configuradas en las gNB.	54
5.8. Parámetros radio principales de las celdas NR configuradas en el escenario Amarisoft.	54
5.9. Configuración de celdas vecinas para movilidad.	60
5.10. Parámetros de medida configurados para movilidad.	60
5.11. Parámetros de configuración USIM utilizados en la red Ama- risoft.	64
6.1. Resumen de las campañas de medida realizadas.	118
6.2. Resumen estadístico de las métricas radio en la primera prueba.	120
6.3. Resumen de métricas radio medias según el PCI registrado en la primera prueba.	122
6.4. Resumen de conectividad de la primera prueba.	123
6.5. Resumen estadístico de la segunda prueba 5G NR.	127
6.6. Resumen radio por PCI servidor en la segunda prueba.	129
6.7. Resumen de calidad y conectividad por PCI servidor en la segunda prueba.	129
6.8. Resumen de conectividad de la segunda prueba.	130

6.9. Comparación global entre las dos pruebas 5G NR.	134
6.10. Porcentaje de muestras que cumplen condiciones de degrada- ción radio y conectividad.	135
6.11. Comparación radio por PCI servidor.	135
6.12. Comparación de calidad y conectividad por PCI servidor. . .	136
6.13. Comparación de las principales zonas críticas y de los subtra- mos representados en los mapas.	137
6.14. Comparación de resultados de <i>iperf3</i>	142
6.15. Mejores y peores resultados de <i>throughput</i> en la red experi- mental.	143
6.16. Coordenadas de las transiciones entre PCI observadas duran- te la primera prueba.	143
6.17. Coordenadas de las transiciones entre PCI observadas duran- te la segunda prueba.	144
 B.1. Estructura general del CSV principal de medidas.	 164
B.2. Estructura general del CSV de resultados de <i>iperf3</i>	165

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto y Motivación

Hoy en día, el número de dispositivos móviles continúa creciendo de forma constante y la demanda de velocidad de transmisión en las comunicaciones es cada vez mayor. Este crecimiento está impulsado por la aparición de nuevos servicios digitales, el aumento del consumo de datos móviles y el desarrollo de aplicaciones que requieren mayores capacidades de red.

La *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, un organismo de estandarización formado por diversas organizaciones del sector de las telecomunicaciones, ha sido responsable del desarrollo de los principales estándares de comunicaciones móviles utilizados en las tecnologías 2G, 3G y 4G. Ante el incremento de las necesidades de conectividad y rendimiento, en 2015 el 3GPP inició el proceso de estandarización de la tecnología 5G, con el objetivo de dar respuesta a las nuevas demandas de una sociedad cada vez más digitalizada [1].

El desarrollo de las tecnologías 5G se realiza mediante diferentes versiones del estándar conocidas como *releases*. La primera versión completa del estándar 5G fue definida en *Release 15*, publicada en 2018, que sentó las bases para el despliegue comercial de las redes 5G. Posteriormente, las versiones *Release 16* y *Release 17* introdujeron mejoras destinadas a aumentar el rendimiento de la red y soportar nuevos escenarios de uso. Más recientemente, *Release 18* marca el inicio de la evolución conocida como 5G *Advanced*, que busca ampliar las capacidades de las redes 5G e introducir nuevas funcionalidades orientadas a mejorar el rendimiento, la eficiencia y el soporte para nuevos servicios [3].

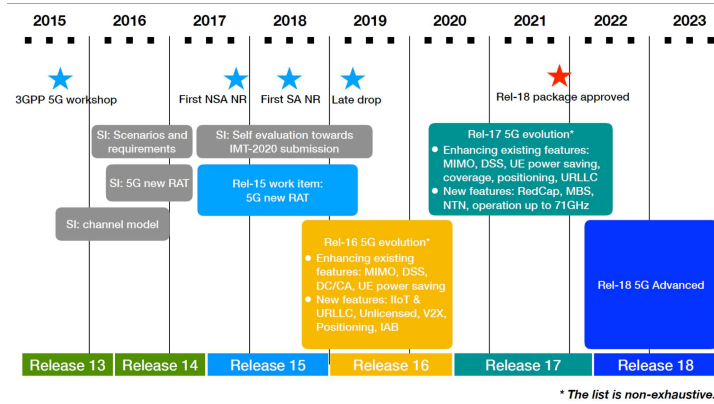


Figura 1.1: Evolución del estándar 5G en los diferentes *releases* definidos por el 3GPP [3].

Los sistemas de comunicaciones 5G introducen una arquitectura de red avanzada capaz de proporcionar mayores velocidades de transmisión, menor latencia y una mayor capacidad de conexión de dispositivos en comparación con generaciones anteriores. Estas mejoras se apoyan, entre otros factores, en el uso de distintos rangos de frecuencia dentro del estándar 5G. En particular, se definen dos grandes rangos de operación: *Frequency Range 1* (FR1), que abarca frecuencias inferiores a 7 GHz y proporciona una mayor cobertura, y *Frequency Range 2* (FR2), que utiliza frecuencias más altas, conocidas como *mmWave*, capaces de ofrecer mayores velocidades de transmisión en escenarios de corta distancia. Gracias a esta flexibilidad en el uso del espectro, las redes 5G pueden adaptarse a distintos entornos y requisitos de servicio [1] [2].

En este contexto, el 5G se enmarca dentro de la visión IMT-2020 definida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), en la que se identifican distintos escenarios de uso orientados a satisfacer las nuevas necesidades de conectividad de la sociedad digital. Dentro de esta visión, las redes 5G están diseñadas para soportar principalmente tres grandes categorías de servicios: *Enhanced Mobile Broadband (eMBB)*, *Massive Machine-Type Communications (mMTC)* y *Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC)* [1] [29].

La primera de ellas, *Enhanced Mobile Broadband (eMBB)*, está orientada a proporcionar altas velocidades de transmisión de datos y mejorar la experiencia del usuario en aplicaciones de gran ancho de banda, como vídeo de alta definición, realidad aumentada o acceso móvil a servicios en la nube. La segunda, *Massive Machine-Type Communications (mMTC)*, permite conectar un gran número de dispositivos simultáneamente, siendo especialmente relevante en aplicaciones relacionadas con el Internet de las Cosas (IoT), las

ciudades inteligentes y la sensorización masiva. Finalmente, *Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC)* está orientada a aplicaciones que requieren comunicaciones altamente fiables y con latencias muy reducidas, como la automatización industrial, la telemedicina o los sistemas de transporte inteligentes [1] [2] [29].

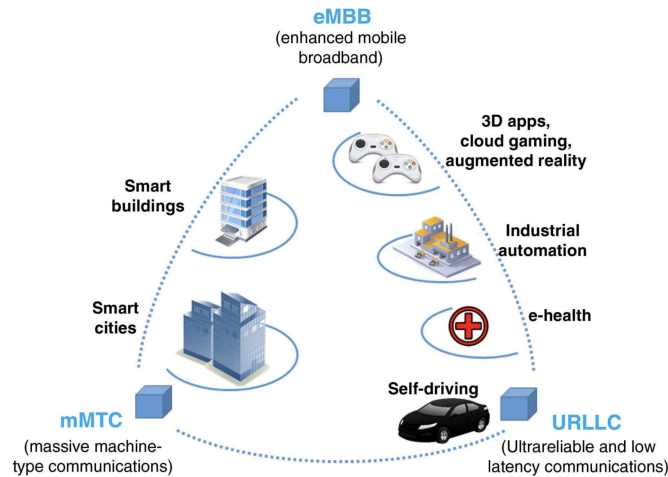


Figura 1.2: Principales áreas de aplicación de las redes 5G [2].

Otro aspecto relevante en las redes móviles 5G es la gestión de la movilidad del usuario, especialmente mediante los procedimientos de *handover*. Debido a la alta densidad de celdas pequeñas en redes 5G y a los exigentes requisitos de servicio, estos procedimientos resultan especialmente importantes, sobre todo en bandas de alta frecuencia, donde la cobertura de las celdas es más reducida y los cambios de celda pueden producirse con mayor frecuencia. Los mecanismos de *handover* permiten mantener la continuidad de la conexión cuando el usuario se desplaza entre distintas celdas, contribuyendo a mejorar la gestión de la movilidad respecto a generaciones anteriores mediante la reducción de la latencia y de la señalización asociada al proceso [26].

La motivación para la realización de este trabajo surge del interés por analizar el comportamiento real de las redes 5G en escenarios de uso cotidianos y de movilidad. Aunque las redes 5G ofrecen mejoras significativas en términos de velocidad, latencia, capacidad y eficiencia, su rendimiento percibido por el usuario puede variar en función de factores como la cobertura, la calidad de la señal, la celda servidora, la banda de frecuencia empleada o los cambios de celda durante el desplazamiento.

Por este motivo, este trabajo se centra en el desarrollo de una aplicación Android capaz de capturar y almacenar métricas, asociándolas a la posi-

ción geográfica del usuario. A partir de estas medidas, se pretende analizar parámetros como RSRP, RSRQ, SINR, CQI, PCI, NCI o ARFCN, así como identificar posibles cambios de celda durante las pruebas experimentales. De esta forma, el trabajo no solo aborda el estudio teórico de las redes 5G, sino también su evaluación práctica mediante mediciones reales obtenidas en campo.

1.2. Objetivos

El objetivo principal es analizar y evaluar el comportamiento de una red 5G real desplegada en el laboratorio WIN-NET-LAB, así como desarrollar una aplicación Android capaz de capturar, almacenar, visualizar y analizar métricas de red en escenarios reales de medida.

Para ello, se estudian los conceptos y tecnologías asociados a las redes 5G y a la infraestructura utilizada en el laboratorio. Posteriormente, se desarrolla una aplicación móvil orientada a la adquisición y representación de métricas de red, permitiendo finalmente realizar pruebas experimentales y analizar los resultados obtenidos.

Con el fin de alcanzar estos objetivos generales, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Estudio y configuración de una red 5G

- 1.1. Analizar los conceptos fundamentales y principales contribuciones relacionadas con las redes móviles 5G.
- 1.2. Estudiar la arquitectura de la red 5G desplegada en el laboratorio WIN-NET-LAB, incluyendo la plataforma Amarisoft, estaciones base, Core Network y equipos de usuario.
- 1.3. Comprender y validar la puesta en marcha de la red 5G utilizada para la realización de las pruebas experimentales.
- 1.4. Estudiar los mecanismos de movilidad y handover entre celdas en escenarios 5G.

2. Desarrollo de una herramienta de medición

- 2.1. Diseñar y desarrollar una aplicación móvil Android para la captura, almacenamiento y análisis de métricas de redes móviles 5G.
- 2.2. Obtener y registrar parámetros radio y de identificación de celda, tales como RSRP, RSRQ, SINR, CQI, PCI, NCI y ARFCN, asociándolos a coordenadas GPS.

- 2.3. Detectar eventos relevantes durante las pruebas de medida, como cambios de celda servidora u handovers.
- 2.4. Incorporar medidas activas de rendimiento de red, incluyendo pruebas de latencia mediante ping y pruebas de throughput mediante iperf3.
- 2.5. Almacenar los resultados de las pruebas en archivos CSV diferenciados, permitiendo su posterior consulta, exportación, eliminación y visualización.
- 2.6. Desarrollar una visualización cartográfica basada en OpenStreet-Map y osmdroid para representar la posición del usuario, la trayectoria seguida y las métricas medidas mediante marcadores coloreados.
- 2.7. Permitir la consulta de pruebas almacenadas en el historial y su representación sobre el mapa junto con sus métricas asociadas.
- 2.8. Incorporar herramientas de análisis visual mediante gráficas, indicadores de calidad de señal y resúmenes estadísticos de las pruebas realizadas.
- 2.9. Mejorar la usabilidad de la aplicación mediante una interfaz organizada en secciones de medición, mapa, historial, gráficas e información del terminal, incluyendo paneles de ayuda.
- 2.10. Integrar almacenamiento y monitorización en tiempo real mediante InfluxDB y Grafana.

3. Evaluación experimental y análisis de resultados

- 3.1. Realizar pruebas experimentales utilizando la aplicación desarrollada en distintos escenarios de medida.
- 3.2. Analizar los resultados obtenidos evaluando cobertura, calidad de señal, handovers, latencia y throughput.

1.3. Metodología

En esta sección se describen los procedimientos y tareas seguidos para alcanzar los objetivos planteados en este Trabajo Fin de Grado. Para ello, se emplea una metodología incremental, permitiendo desarrollar progresivamente la aplicación y añadir nuevas funcionalidades conforme avanzaba el proyecto.

Cabe destacar que varias tareas se han desarrollado de forma paralela. En particular, la redacción de los capítulos iniciales de la memoria, incluyendo el estado del arte, la metodología, la planificación y el coste, se realizó de

forma simultánea al desarrollo de la aplicación Android. Posteriormente, el desarrollo de la aplicación continuó incorporando nuevas funcionalidades, al mismo tiempo que se avanzaba en la revisión y ampliación de la memoria. Por tanto, la planificación temporal presentada debe entenderse como una estimación de dedicación por bloques de trabajo, y no como una secuencia estrictamente lineal.

1.3.1. Bloque de trabajo 1: Estudio y configuración de una red 5G

- **Tarea 1.1:** Análisis de los conceptos fundamentales y principales contribuciones relacionadas con las redes móviles 5G (2 semanas).
- **Tarea 1.2:** Estudio de la arquitectura y funcionamiento de la plataforma Amarisoft empleada en el laboratorio WIN-NET-LAB (2 semanas).
- **Tarea 1.3:** Comprensión de la configuración y puesta en marcha de la red 5G utilizada durante las pruebas experimentales (2 semanas).
- **Tarea 1.4:** Estudio de los mecanismos de movilidad y handover entre celdas en escenarios 5G (1 semana).

1.3.2. Bloque de trabajo 2: Desarrollo de la aplicación Android

- **Tarea 2.1: Desarrollo inicial de la aplicación Android y captura de métricas** (3 semanas). Diseño de la estructura base de la aplicación, implementación de permisos de ubicación, captura de métricas radioeléctricas y asociación de medidas a coordenadas GPS.
- **Tarea 2.2: Almacenamiento local y visualización cartográfica básica** (2 semanas). Implementación del almacenamiento en CSV y desarrollo inicial del mapa utilizando OpenStreetMap y osmdroid.
- **Tarea 2.3: Incorporación de pruebas activas de red** (2 semanas). Integración de medidas de latencia mediante ping, throughput mediante iperf3 y configuración dinámica de servidores.
- **Tarea 2.4: Representación de trayectorias y métricas sobre el mapa** (1 semana). Representación de recorridos, puntos coloreados y selección dinámica de parámetros sobre el mapa.
- **Tarea 2.5: Gestión de resultados e historial de pruebas** (1 semana). Separación de resultados en distintos CSV, visualización, exportación, eliminación de registros y representación de pruebas almacenadas sobre el mapa.

- **Tarea 2.6: Reestructuración de interfaz y análisis visual** (2 semanas). Incorporación del panel de navegación inferior, con secciones de medición, mapa, historial, gráficas y consulta de datos básicos del móvil y de la red conectada, junto con botones de ayuda para facilitar la interpretación de las métricas obtenidas y el uso de la aplicación.
- **Tarea 2.7: Integración con InfluxDB y Grafana** (1 semana). Incorporación de almacenamiento y monitorización en tiempo real mediante InfluxDB y Grafana.

1.3.3. Bloque de trabajo 3: Evaluación experimental y análisis de resultados

- **Tarea 3.1: Realización de pruebas experimentales y obtención de métricas** (3 semanas). Realización de pruebas utilizando la aplicación desarrollada en distintos escenarios de medida, obteniendo métricas relacionadas con cobertura, calidad de señal, handovers, latencia y throughput.
- **Tarea 3.2: Análisis de resultados** (2 semanas). Análisis de resultados obtenidos a partir de los datos almacenados en CSV, gráficas generadas en la aplicación y dashboards de Grafana.

1.3.4. Bloque de trabajo 4: Redacción y entrega de la memoria

- **Tarea 4.1:** Redacción de la memoria.
 - **Tarea 4.1.1:** Redacción de los capítulos iniciales, estado del arte, objetivos, metodología y fundamentos teóricos, comprobando las referencias empleadas (5 semanas).
 - **Tarea 4.1.2:** Redacción completa de la memoria, revisión del tutor y corrección final del documento (2 semanas).
- **Tarea 4.2:** Preparación y entrega final de la memoria (1 semana).

1.4. Estructura de la memoria

Capítulo 1. Introducción. Recoge los aspectos generales del trabajo.

- **Contexto y motivación:** se introduce el entorno de las redes 5G y la necesidad de evaluar su rendimiento en escenarios reales.

- **Objetivos:** se describen los objetivos principales del proyecto.
- **Metodología:** se explica la organización del trabajo en diferentes bloques relacionados con el estudio de la red 5G, el desarrollo de la aplicación Android y la realización de pruebas experimentales.
- **Estructura de la memoria:** se describe la organización del documento.

Capítulo 2. Estado del arte. Se revisan las principales plataformas y herramientas relacionadas con el despliegue y evaluación de redes 5G.

- **Plataformas de implementación y despliegue de redes 5G:** análisis de soluciones como srsRAN, OpenAirInterface, Open5GS, free5GC y Amarisoft.
- **Herramientas empleadas para simulación y evaluación experimental:** descripción de UERANSIM y de la aplicación desarrollada 5G Scanner.

Capítulo 3. Fundamentos teóricos. Se presentan los conceptos necesarios para comprender el trabajo.

- **Arquitectura de redes 5G.**
- **Tecnologías de comunicaciones móviles 5G.**
- **Métricas de rendimiento y evaluación en redes 5G.**
- **Escenarios y procedimientos de handover en redes 5G.**

Capítulo 4. Planificación y costes. Se describe la planificación temporal del proyecto y los recursos empleados durante su desarrollo.

- **Planificación temporal:** organización de tareas, bloques de trabajo y desarrollo incremental del proyecto.
- **Recursos hardware y software:** descripción de los dispositivos, herramientas y plataformas utilizadas.
- **Estimación de costes:** valoración económica de los recursos y del tiempo de desarrollo del proyecto.

Capítulo 5. Desarrollo e implementación. Se detalla el desarrollo práctico realizado durante el proyecto.

- **Despliegue y configuración de la red 5G.**

- Implementación de escenarios de handover.
- Desarrollo de la aplicación Android 5G Scanner para captura, almacenamiento y visualización de métricas de red.

Capítulo 6. Pruebas y resultados. Se presentan las pruebas experimentales realizadas y el análisis de resultados obtenidos.

- Metodología experimental y escenarios de medida.
- Resultados en escenarios estáticos y en movilidad.
- Análisis de métricas de rendimiento: RSRP, RSRQ, SINR, CQI, latencia y throughput.
- Evaluación del comportamiento del handover y calidad de señal.

Capítulo 7. Conclusiones y líneas futuras. Se recogen las conclusiones finales del trabajo y posibles ampliaciones futuras.

- Conclusiones principales obtenidas durante el desarrollo del proyecto.
- Líneas futuras y posibles mejoras de la aplicación y del entorno experimental.

Capítulo 2

Estado del Arte

En este capítulo se revisan diferentes plataformas y herramientas relacionadas con el despliegue, simulación y evaluación de redes 5G. En primer lugar, se presentan alternativas para implementar redes móviles, incluidas soluciones abiertas y comerciales destinadas a la red de acceso radio y al núcleo 5G. Posteriormente, se describen herramientas empleadas para la emulación de equipos de usuario y para la evaluación experimental de redes móviles. Finalmente, se comparan las herramientas analizadas con las necesidades concretas de este trabajo.

2.1. Plataformas de implementación y despliegue de redes 5G

2.1.1. srsRAN

srsRAN[7] es una plataforma de código abierto utilizada en entornos de investigación para la implementación de redes móviles 4G y 5G. Permite desplegar una red celular completa mediante software sobre hardware de propósito general, apoyándose en tecnologías SDR, lo que proporciona gran flexibilidad y capacidad de configuración. Su arquitectura modular está compuesta por los módulos srsEPC, srsENB y srsUE, que permiten emular el núcleo de red, la red de acceso radio (RAN) y los equipos de usuario, respectivamente [6][7].

El módulo srsEPC implementa el núcleo de red 4G (Evolved Packet Core, EPC). Incluye el MME (Mobility Management Entity), encargado de la gestión de movilidad y del control de acceso de los usuarios, y la base de datos HSS (Home Subscriber Server), que almacena la información de los suscriptores y permite su autenticación. También incorpora el S-GW (Serving Gateway), responsable del encaminamiento de paquetes entre el

2 2.1. Plataformas de implementación y despliegue de redes 5G

equipo de usuario y la red, y el P-GW (Packet Data Network Gateway), que actúa como punto de conexión con redes externas como Internet.

Por su parte, el módulo srsENB implementa la estación base de la red, actuando como eNodeB en 4G y gNodeB en 5G. Gestiona la comunicación radio con los equipos de usuario y soporta diferentes configuraciones de ancho de banda, modos de transmisión y técnicas MIMO. Además, permite operar en escenarios 4G y en despliegues 5G en modos NSA (Non-Standalone) y SA (Standalone), pudiendo conectarse a núcleos de red externos[6].

Finalmente, el módulo srsUE permite emular el comportamiento de un equipo de usuario (UE), incluyendo funciones de autenticación y comunicación con la estación base. Este módulo puede ejecutarse en un equipo independiente y utiliza hardware SDR para interactuar con la capa física, ofreciendo soporte para distintas configuraciones de red y modos de transmisión [6][7].

Además de esta organización modular, srsRAN permite desplegar arquitecturas desagregadas en la RAN de redes 5G. Como se observa en la Figura 2.1, esta arquitectura se estructura en unidades funcionales como la Radio Unit (RU), la Distributed Unit (DU) y la Central Unit (CU), siguiendo el modelo definido por 3GPP y O-RAN [7].

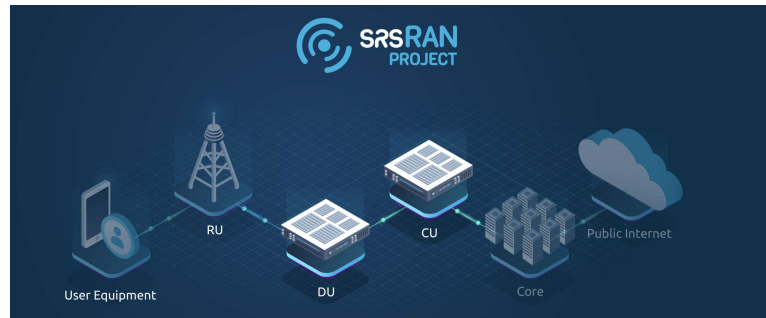


Figura 2.1: Arquitectura de una red 5G basada en srsRAN, incluyendo los componentes de acceso radio (RU, DU, CU), el núcleo de red y el equipo de usuario.[7]

Esta estructura modular y su integración con tecnologías SDR facilitan la evaluación de parámetros de rendimiento, la validación de arquitecturas de red y la experimentación en entornos controlados.

2.1.2. OpenAirInterface

OpenAirInterface(OAI)[8] es una plataforma de código abierto desarrollada por la OpenAirInterface Software Alliance, una organización sin ánimo

de lucro fundada por EURECOM en 2014. Su objetivo es proporcionar un entorno flexible para la investigación, desarrollo y validación de tecnologías de redes móviles 4G y 5G.

OAI ofrece una implementación software completa de los principales componentes de una red celular, incluyendo tanto la red de acceso radio (RAN) como el núcleo de red (Core Network). Esta plataforma permite desplegar sistemas de comunicaciones móviles sobre hardware de propósito general (COTS), apoyándose en tecnologías de radio definida por software (SDR), lo que facilita su uso en entornos de experimentación y prototipado.

En el ámbito de la red de acceso radio, OAI proporciona una implementación software de la RAN para redes 5G, permitiendo la simulación, el prototipado y el despliegue sobre hardware de propósito general. La plataforma soporta estaciones base 5G (gNodeB) con una arquitectura basada en la separación funcional en Central Unit (CU) y Distributed Unit (DU), así como equipos de usuario (UE) compatibles con distintas configuraciones de ancho de banda, numerologías y esquemas de modulación avanzados [8].

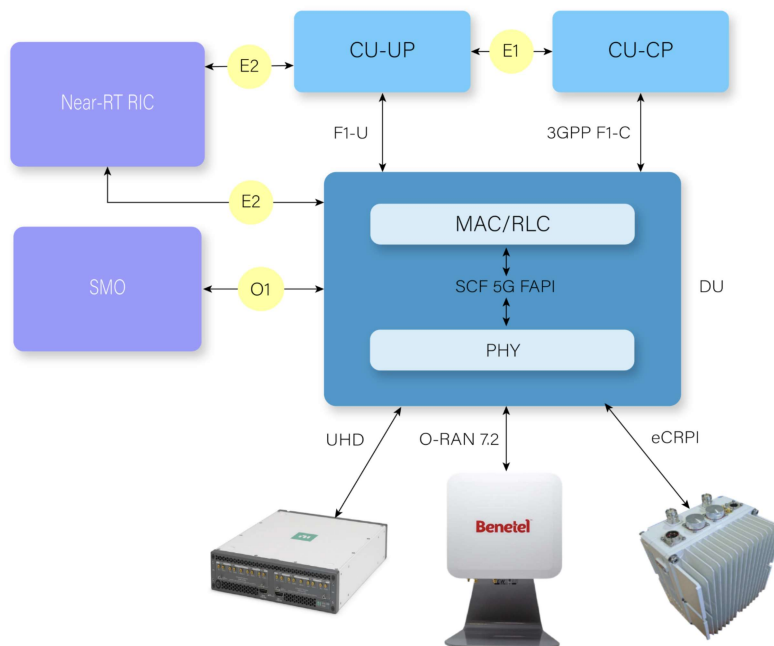


Figura 2.2: Arquitectura de la red de acceso radio (RAN) en OpenAirInterface, basada en la separación CU/DU y en interfaces abiertas O-RAN. [8]

Por otro lado, OAI incluye una implementación del núcleo de red 5G (5GC) conforme a las especificaciones del 3GPP, permitiendo el despliegue de redes en modo standalone (SA). Este núcleo integra funciones como

4 2.1. Plataformas de implementación y despliegue de redes 5G

AMF, SMF y UPF, entre otras, y puede implementarse en infraestructuras virtualizadas, contenedores y soluciones cloud-native.

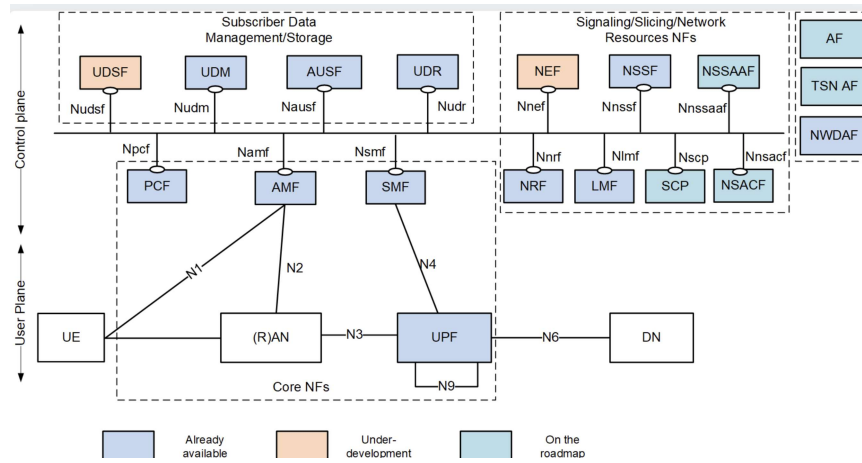


Figura 2.3: Arquitectura del núcleo de red 5G (5GC) en OpenAirInterface, mostrando las principales funciones de red y la separación entre plano de control y plano de usuario. [8]

OpenAirInterface está orientada a la investigación y proporciona un entorno configurable para realizar pruebas, validaciones y experimentos en condiciones cercanas a escenarios reales. Su carácter abierto y la colaboración de una comunidad internacional favorecen el desarrollo y la evaluación de tecnologías 5G[8].

2.1.3. Open5GS

Open5GS[10] es una plataforma de código abierto orientada a la implementación del núcleo de red en sistemas móviles LTE y 5G NR. Esta herramienta permite construir y gestionar el core de redes móviles basadas en estándares 3GPP, proporcionando soporte tanto para EPC como para 5GC [10].

A diferencia de otras soluciones que abarcan tanto la red de acceso radio como el núcleo, Open5GS se centra principalmente en la implementación del core de red, ofreciendo una arquitectura flexible que facilita su uso en entornos de investigación, pruebas y despliegues reales. Gracias a su carácter open source, permite a los usuarios configurar y adaptar los distintos componentes de la red según sus necesidades[10].

En el contexto de redes 5G, Open5GS implementa una arquitectura basada en servicios (Service-Based Architecture, SBA), en la que las funciones de red se comunican entre sí mediante interfaces basadas en servicios,

principalmente APIs RESTful estandarizadas. Entre las principales funciones del núcleo de red se encuentran el Access and Mobility Management Function (AMF), encargado de la gestión del acceso y la movilidad de los usuarios; el Session Management Function (SMF), responsable de la gestión de sesiones; y el User Plane Function (UPF), que se encarga del encaminamiento del tráfico de datos. Además, incluye otras funciones como el Unified Data Management (UDM), el Authentication Server Function (AUSF), el Policy Control Function (PCF) y el Network Repository Function (NRF), que permiten la gestión de suscriptores, autenticación y control de políticas de red[9].

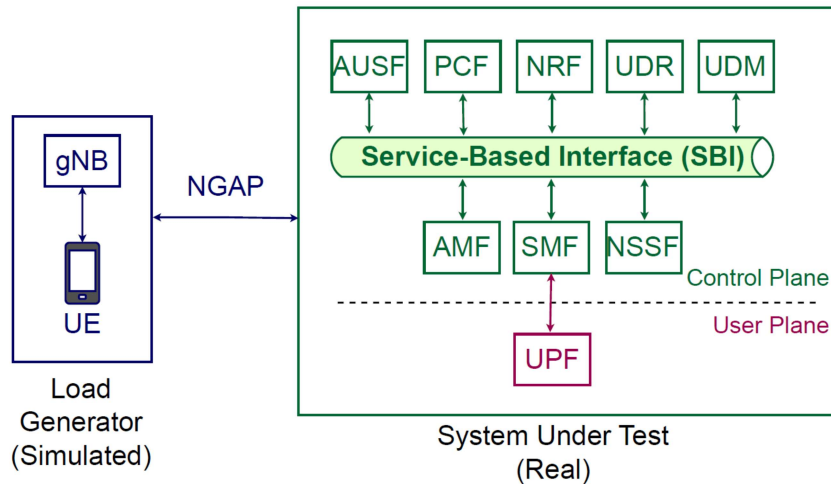


Figura 2.4: Arquitectura del núcleo de red 5G basado en Open5GS utilizado como sistema bajo prueba, mostrando la arquitectura basada en servicios, las principales funciones de red y la separación entre el plano de control y el plano de usuario [9].

Open5GS también es compatible con entornos virtualizados y cloud-native y puede desplegarse mediante contenedores e integrarse con plataformas como Kubernetes. Esto facilita la escalabilidad del sistema y su adaptación a diferentes escenarios de uso, desde entornos de laboratorio hasta redes privadas de mayor tamaño[9].

En conjunto, Open5GS se presenta como una solución accesible y flexible para la implementación del núcleo de red en sistemas móviles, siendo especialmente útil en el ámbito académico y de investigación para la experimentación y validación de tecnologías 5G[10].

2.1.4. free5GC

free5GC[11] es una plataforma de código abierto destinada a la implementación del núcleo de red 5G, desarrollada como parte de un proyecto de la Linux Foundation. Su objetivo principal es proporcionar una implementación software del núcleo 5G conforme a las especificaciones del 3GPP, especialmente a partir de la Release 15, permitiendo el estudio, desarrollo y validación de redes 5G en entornos controlados.

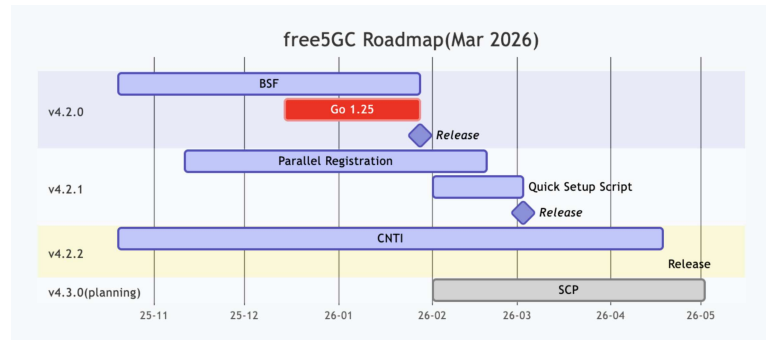


Figura 2.5: Hoja de ruta de desarrollo de free5GC, mostrando la evolución prevista de funcionalidades y versiones del sistema[11].

Además, presenta un diseño basado en la arquitectura orientada a servicios (Service-Based Architecture, SBA), en la que las funciones de red se implementan como servicios independientes que se comunican mediante interfaces estandarizadas.

El núcleo de red implementado en free5GC está compuesto por diversas funciones de red (Network Functions, NFs) que desempeñan roles específicos dentro del sistema. Entre las más relevantes se encuentran el AMF (Access and Mobility Management Function), encargado del registro, la conectividad y la movilidad de los equipos de usuario, y el AUSF (Authentication Server Function), responsable de los procedimientos de autenticación. También incluye el SMF (Session Management Function), que gestiona las sesiones PDU, y el UPF (User Plane Function), encargado del encaminamiento, el reenvío de paquetes y el tratamiento de QoS en el plano de usuario.

Estas funciones interactúan manteniendo la separación entre el plano de control y el plano de usuario. En particular, la comunicación entre el SMF y el UPF se realiza mediante el protocolo PFCP (Packet Forwarding Control Protocol), utilizado para configurar y controlar el encaminamiento y las reglas asociadas al tráfico de datos[11].

La Figura 2.6 presenta un ejemplo de arquitectura basada en free5GC para monitorizar y observar el plano de usuario mediante tecnologías eBPF

y PFCP.

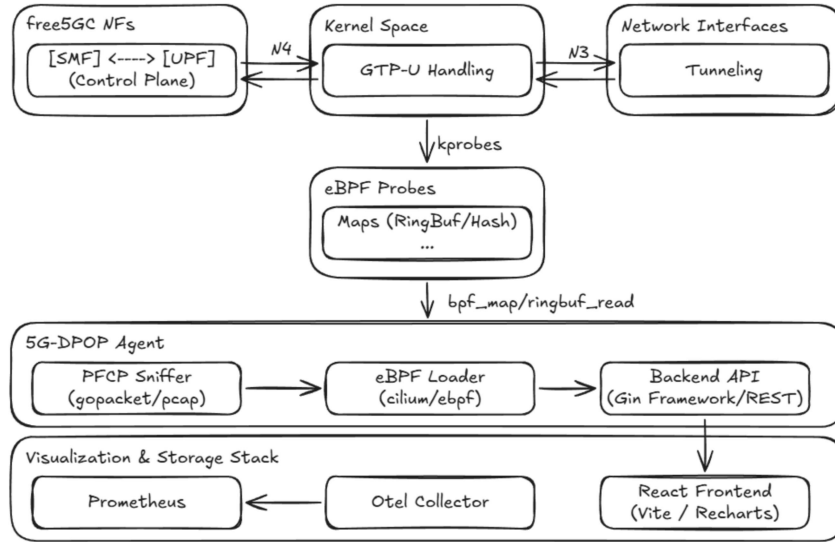


Figura 2.6: Ejemplo de arquitectura basada en free5GC para la monitorización y observabilidad del plano de usuario mediante eBPF y PFCP.

[11].

En este trabajo, free5GC resulta relevante por ofrecer una implementación abierta y modular del núcleo 5G, adecuada para analizar la interacción entre sus principales funciones y estudiar procedimientos de la red en escenarios controlados [11].

2.1.5. Amarisoft

Amarisoft [12] ofrece una solución desarrollada íntegramente mediante software para la implementación de conectividad inalámbrica en redes 4G y 5G. La plataforma dispone de implementaciones de eNodeB (eNB), gNodeB (gNB) y simuladores de equipos de usuario (UE). También incorpora un núcleo compacto compatible con 4G y 5G, un servidor IMS, una pasarela eMBMS y la función N3IWF, formando así una solución extremo a extremo [12].

En entornos de laboratorio, los componentes de Amarisoft pueden utilizarse junto con front-ends de radio definida por software (SDR) para efectuar pruebas de dispositivos y estaciones base. Las funciones de acceso radio se implementan mediante eNB y gNB e incluyen la capa física, la capa 2 y la capa 3. La plataforma también dispone de funciones de simulación de canal.

La comunicación con los front-ends de radio se lleva a cabo mediante

8 2.1. Plataformas de implementación y despliegue de redes 5G

interfaces abiertas, mientras que las interfaces estándar S1 y NG permiten conectar la red de acceso con los núcleos 4G y 5G. La solución también puede combinarse con software vRAN y radios de alta potencia basadas en arquitecturas split 8 y split 7.2 para su utilización en redes públicas y privadas. La configuración se define mediante archivos en formato JSON y el sistema dispone de una API WebSocket y de una interfaz de línea de comandos [12].

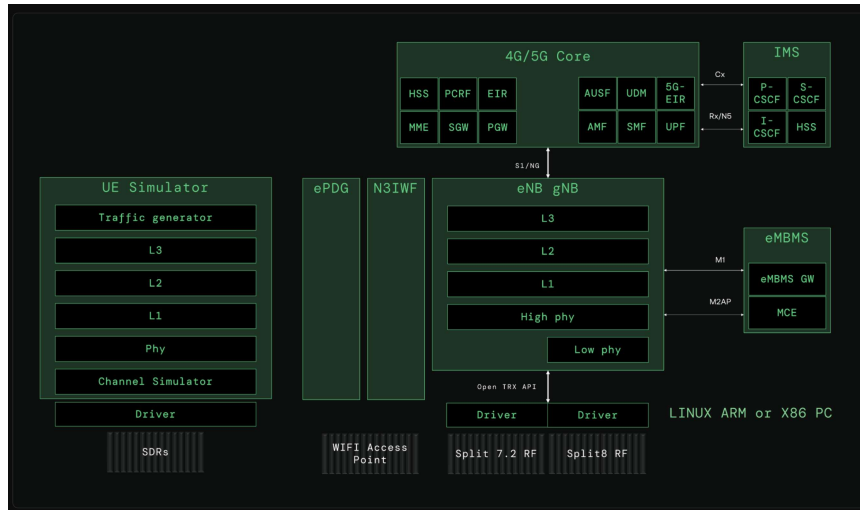


Figura 2.7: Arquitectura general de la solución software de Amarisoft, incluyendo red de acceso, núcleo 4G/5G, simulador de usuario y componentes adicionales [12].

En cuanto al núcleo de red, Amarisoft incluye una implementación compacta que integra en un único componente las principales funciones tanto de EPC como de 5GC. Entre ellas se encuentran MME, SGW, PGW, PCRF, HSS y EIR para 4G, así como AMF, AUSF, SMF, UPF y UDM para 5G. Esta integración permite gestionar aspectos como la movilidad, la autenticación, el control de sesiones y el encaminamiento del tráfico de usuario dentro de una arquitectura unificada.

Además, la plataforma incorpora un simulador de equipos de usuario capaz de emular simultáneamente múltiples dispositivos LTE y 5G NR, incluidas tecnologías como LTE-M, NB-IoT y escenarios NTN. Este simulador permite generar tráfico de red y evaluar el rendimiento del sistema en condiciones controladas, facilitando así la validación funcional y de prestaciones de redes móviles.

La integración del acceso radio, el núcleo de red y los equipos de usuario simulados permite utilizar Amarisoft en pruebas, validaciones y entornos experimentales de redes 4G y 5G [12].

2.2. Herramientas empleadas para simulación y evaluación experimental

2.2.1. UERANSIM

UERANSIM[14] es una herramienta de código abierto que implementa un simulador de equipo de usuario (UE) y de acceso radio 5G mediante gNodeB. Se ejecuta sobre sistemas Linux y sigue un modelo de desarrollo abierto basado en contribuciones de la comunidad[14].

Una de las principales aportaciones de UERANSIM es proporcionar una implementación abierta de UE y gNodeB para redes 5G en modo standalone (SA). Según sus responsables, fue el primer proyecto de código abierto que ofreció conjuntamente estos dos componentes para 5G-SA.

Desde el punto de vista funcional, UERANSIM implementa diferentes elementos asociados al plano de control y al plano de usuario. En el plano de control incorpora procedimientos NAS y NGAP, incluyendo autenticación, registro, establecimiento y liberación de sesiones PDU, paging y gestión de contexto de usuario. En el plano de usuario, el acceso radio implementa el protocolo GTP para el transporte de tráfico de usuario, con soporte actual únicamente para IPv4.

En relación con la interfaz radio, UERANSIM no implementa completamente los protocolos 5G por debajo de la capa RRC. La interfaz 5G NR se encuentra parcialmente simulada mediante el protocolo UDP, por lo que elementos como PHY, MAC, RLC y PDCP no están implementados [14].

Además, UERANSIM puede emplearse junto con otras plataformas de núcleo 5G. En trabajos recientes, como el presentado en [13], se combina UERANSIM con Open5GS para la validación de procedimientos relacionados con el roaming y la conectividad entre redes. Por ello, UERANSIM resulta útil para realizar pruebas sobre núcleos de red 5G y estudiar el funcionamiento del sistema [14].

2.2.2. Amarisoft UE Simulator

Amarisoft UE Simulator [15], también denominado AMARI UE Simbox, es una herramienta comercial orientada a la emulación de equipos de usuario en redes LTE y 5G NR. Esta solución permite simular múltiples UEs compatibles con distintas tecnologías móviles, incluyendo LTE, NB-IoT y NR, y soporta escenarios 5G en modo standalone (SA). La capacidad máxima alcanza los 1000 UEs activos simultáneamente, aunque el número disponible depende del modelo de AMARI UE Simbox y de la configuración del eNodeB/gNodeB.

La herramienta está orientada a escenarios profesionales de prueba, validación y evaluación de rendimiento. Entre sus funcionalidades se incluyen la generación de tráfico IP, la simulación de tráfico TCP, UDP, RTP, HTTP y VoIP, así como el uso de aplicaciones externas como *iperf*. Además, soporta procedimientos de *handover* intra e inter eNB/gNB, agregación de portadoras y pruebas de rendimiento en enlace descendente y ascendente

AMARI UE Simbox también incorpora funciones de registro, medición y simulación de canal. Según la información proporcionada por Amarisoft, el simulador de canal permite modificar las condiciones radio en función de la pérdida de trayecto del UE, actualizando medidas como RSRP y CQI. Estas funciones permiten analizar el comportamiento de la red bajo distintas condiciones de señal y validar redes 4G y 5G en condiciones controladas antes de realizar pruebas con terminales comerciales [15].

2.2.3. MATLAB 5G Toolbox

MATLAB 5G Toolbox [16] es una herramienta comercial de MathWorks orientada al modelado, simulación, análisis y verificación de sistemas de comunicaciones 5G y 5G Advanced. Proporciona funciones y ejemplos de referencia conformes con estándares, permitiendo trabajar con simulaciones a nivel de enlace y sistema, generación de formas de onda y pruebas de conformidad.

Una de sus funcionalidades principales es la generación y el análisis de formas de onda 5G NR mediante aplicaciones como *5G Waveform Generator* [17] y *5G Waveform Analyzer* [18]. Estas aplicaciones permiten crear, modificar, visualizar y estudiar señales adaptadas a distintos escenarios de prueba, así como emplear modelos de referencia para la validación de sistemas NR.

Además, la toolbox permite simular enlaces 5G NR extremo a extremo, incorporando transmisor, canal y receptor. También soporta modelos de canal como CDL (*Clustered Delay Line*) y TDL (*Tapped Delay Line*), escenarios terrestres y no terrestres (NTN), y el análisis de métricas como la tasa de error de bloque y la tasa de transferencia [16].

La toolbox también permite realizar simulaciones a nivel de sistema y analizar el reparto de recursos de tiempo y frecuencia entre varios equipos de usuario en una red 5G NR. Esto resulta útil para evaluar estrategias de planificación en modos TDD y FDD, así como métricas de rendimiento como el *throughput*, el *goodput*, el reparto de recursos y el estado del búfer [16].

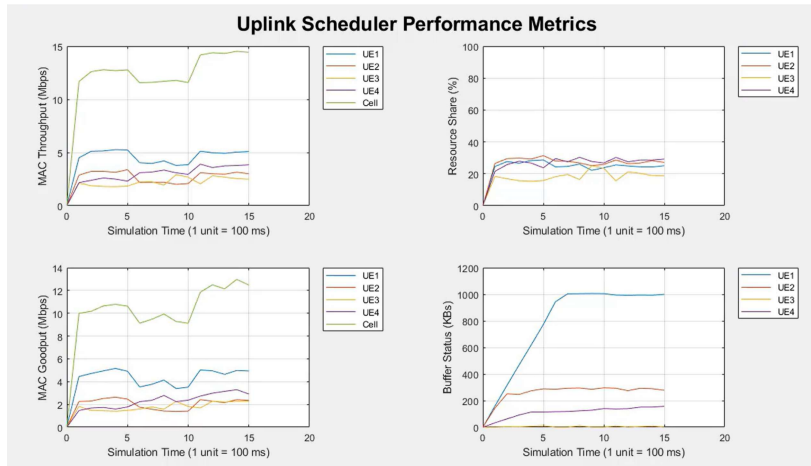


Figura 2.8: Ejemplo de métricas de rendimiento obtenidas en una simulación a nivel de sistema con MATLAB 5G Toolbox, mostrando el *throughput*, el reparto de recursos, el *goodput* y el estado del búfer para varios UEs [16].

En comparación con herramientas como UERANSIM o Amarisoft UE Simulator, MATLAB 5G Toolbox no se centra en la emulación directa de equipos de usuario conectados a una red real, sino en la simulación, análisis y validación de componentes y procedimientos 5G.

2.2.4. Open Mobile Network Toolkit

Open Mobile Network Toolkit (OMNT) es una herramienta de código abierto destinada a la monitorización experimental de redes móviles. Fraunhofer FOKUS la presenta como parte de su entorno de pruebas *xG Testbed*, y está diseñada para recopilar datos de medida desde terminales Android conectados a redes móviles [19].

OMNT registra información de la red móvil y del entorno radio, incluyendo parámetros como RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), RSRP, RSRQ, posición GNSS (*Global Navigation Satellite System*), identificadores de celda y PLMN (*Public Land Mobile Network*). Además de estas medidas, incorpora pruebas activas mediante *iperf3* y *ping*, con las que se evalúan el ancho de banda, la latencia, el *jitter* y el tiempo de ida y vuelta de los paquetes [19][20].

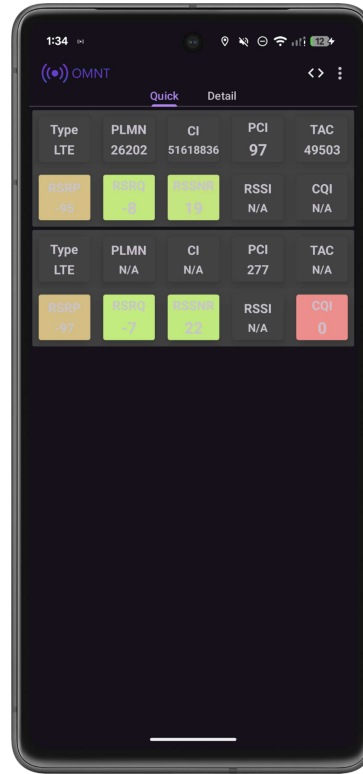


Figura 2.9: Interfaz de monitorización de *Open Mobile Network Toolkit*, mostrando información de celda y métricas radio como RSRP, RSRQ, RSSNR, PCI, TAC, PLMN y CQI [19][20].

OMNT permite conservar las medidas en el propio dispositivo o remitirlas a un servidor *InfluxDB 2.x*; posteriormente, estos resultados pueden consultarse mediante paneles de *Grafana* o tratarse con herramientas externas como *Python* [20]. Con esta integración, OMNT puede utilizarse como una solución para la captura, el almacenamiento y el análisis de medidas en redes móviles experimentales.

En comparación con la aplicación desarrollada en este trabajo, OMNT presenta una funcionalidad más amplia y está orientada a entornos de investigación generales. Ambas soluciones permiten complementar el análisis de las medidas mediante herramientas externas de visualización, como *Grafana*. No obstante, *5G Scanner* se ha desarrollado con un enfoque más específico en la captura y análisis de métricas 5G NR desde terminales Android, priorizando la asociación de cada muestra con coordenadas GPS, la detección de cambios de PCI, la generación de ficheros CSV locales y la representación de resultados sobre mapas.

2.2.5. Network Survey Android App

Network Survey Android App es una aplicación de código abierto destinada a la recogida y análisis de datos de redes inalámbricas desde terminales Android. La herramienta realiza medidas en campo sobre distintas tecnologías, incluyendo redes celulares, *Wi-Fi*, *Bluetooth* y GNSS, y está pensada para escenarios de análisis de cobertura, calidad de señal y caracterización de redes [21].

En el ámbito celular, la aplicación registra información de distintas tecnologías móviles, incluyendo GSM, CDMA, UMTS, LTE y 5G NR. Además, puede almacenar los datos recogidos en ficheros *CSV* o *GeoPackage*, lo que facilita su análisis posterior mediante herramientas externas [21][22].

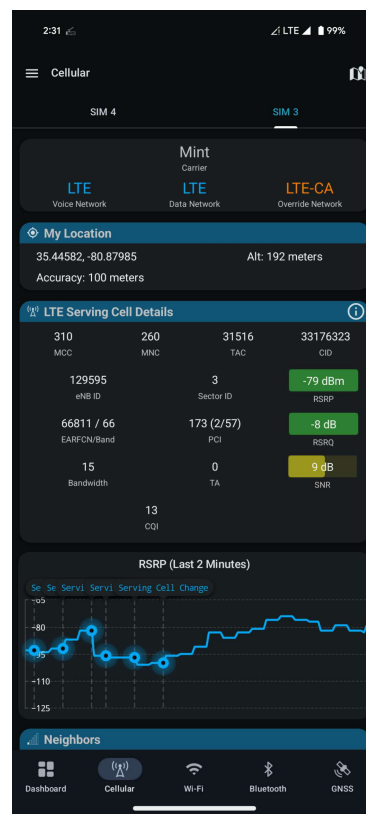


Figura 2.10: Interfaz de *Network Survey Android App*, mostrando información de red celular, posición del terminal, parámetros de celda y métricas radio como RSRP, RSRQ, SNR, PCI, TAC y CQI [21][22].

Otra característica relevante de *Network Survey Android App* es la transmisión de los registros de medida en tiempo real mediante protocolos como MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) o gRPC (*Google Remote*

Procedure Call). Esta funcionalidad facilita la integración de la aplicación con otros sistemas de monitorización o procesamiento, ampliando su uso en escenarios de análisis continuo o remoto [22].

En comparación con OMNT, *Network Survey Android App* presenta un enfoque todavía más amplio desde el punto de vista de las tecnologías soportadas, ya que no se limita al ámbito celular, sino que también permite registrar información de redes *Wi-Fi*, *Bluetooth* y GNSS. Las tres aplicaciones consideradas son soluciones software orientadas a la medida desde terminales Android, si bien OMNT y *Network Survey Android App* se presentan como herramientas de código abierto de propósito más general.

En conjunto, las herramientas analizadas abarcan distintos aspectos del despliegue, la simulación, la monitorización y la evaluación de redes móviles. Plataformas como srsRAN, OpenAirInterface, Open5GS, free5GC o Amarisoft permiten implementar redes completas o algunos de sus componentes principales, mientras que herramientas como UERANSIM, Amarisoft UE Simulator o MATLAB 5G Toolbox resultan útiles para simular escenarios, emular equipos de usuario y evaluar el comportamiento de la red en entornos controlados. Por otro lado, aplicaciones como OMNT y *Network Survey Android App* permiten realizar medidas desde terminales Android, registrar información radio y asociar las muestras a datos de localización.

A pesar de ello, las soluciones analizadas no se ajustan por completo a las necesidades concretas de este trabajo. Algunas están orientadas principalmente al despliegue de red, otras a la simulación o emulación, y otras a la monitorización generalista de redes móviles. Por este motivo, se plantea el desarrollo de una aplicación Android propia, orientada al análisis experimental de redes 5G NR en campo y capaz de capturar métricas radio, asociarlas a coordenadas GPS, representar las medidas sobre un mapa, registrar cambios de celda durante pruebas de movilidad, generar ficheros CSV locales y facilitar el análisis posterior de los datos obtenidos.

Capítulo 3

Fundamentos teóricos

3.1. Tecnologías de comunicaciones móviles 5G

Las redes 5G incorporan tecnologías que mejoran el rendimiento del sistema en términos de velocidad, capacidad y eficiencia. Estas tecnologías se centran principalmente en la interfaz radio y en el aprovechamiento del espectro electromagnético, constituyendo una evolución respecto a generaciones anteriores.

Una de las principales innovaciones en 5G es el uso de comunicaciones en bandas de frecuencia milimétricas (*millimeter Wave*, mmWave), que abarcan aproximadamente el rango entre 20 y 80 GHz. Estas bandas permiten disponer de anchos de banda mucho mayores que los utilizados en tecnologías anteriores, lo que hace posible alcanzar velocidades de transmisión del orden de Gbps. Sin embargo, las señales en estas frecuencias presentan una mayor atenuación y son más sensibles a obstáculos, lo que limita su alcance y requiere el uso de técnicas adicionales para garantizar una comunicación eficiente.

Para compensar estas limitaciones, 5G incorpora el uso de sistemas de antenas de gran escala, conocidos como *Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)*. Esta tecnología permite emplear un elevado número de antenas en las estaciones base, lo que mejora la eficiencia espectral y aumenta la capacidad del sistema. Además, se utilizan técnicas de *beamforming*, que permiten dirigir la señal de forma precisa hacia los usuarios, mejorando la calidad de la comunicación y reduciendo las interferencias [4].

Otra tecnología relevante en 5G es el acceso múltiple no ortogonal (*Non-Orthogonal Multiple Access*, NOMA), que permite que múltiples usuarios compartan simultáneamente el mismo canal de comunicación. A diferencia de las técnicas tradicionales, basadas en la ortogonalidad de los recursos,

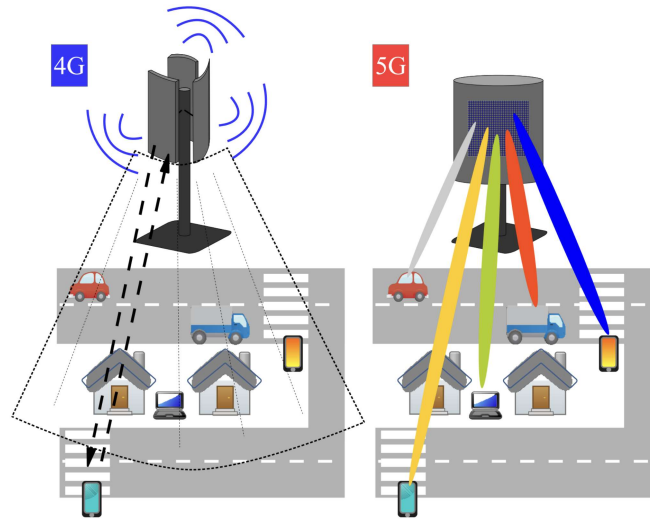


Figura 3.1: Comparación de esquemas de transmisión en redes 4G y 5G, mostrando el uso de beamforming en 5G [4].

NOMA mejora la eficiencia espectral y permite aumentar la capacidad de la red. No obstante, esta tecnología introduce una mayor complejidad en los receptores, ya que requiere técnicas avanzadas de cancelación de interferencias [4].

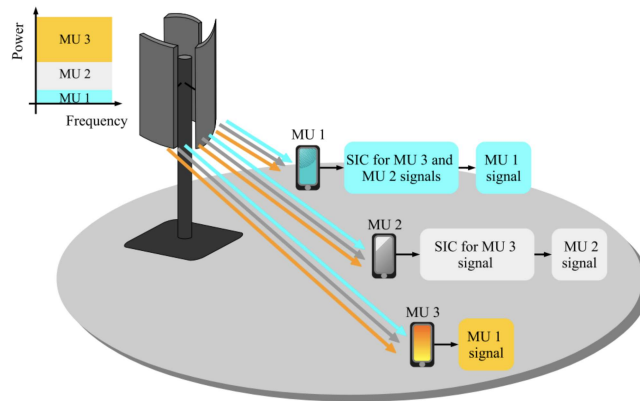


Figura 3.2: Principio de funcionamiento de NOMA mediante asignación de potencia [4].

Las redes 5G también recurren a la densificación mediante el despliegue de estaciones base de pequeño tamaño, conocidas como *small cells*. Estas

estaciones permiten mejorar la cobertura en entornos con alta densidad de usuarios y aumentar la capacidad del sistema al reducir la distancia entre el transmisor y el receptor. Sin embargo, su despliegue plantea nuevos desafíos relacionados con la gestión de la red, el consumo energético y la interferencia entre celdas [4].

Estas tecnologías mejoran la eficiencia espectral y espacial y aumentan la capacidad global del sistema. Así, las redes 5G pueden soportar mayores velocidades de transmisión, más usuarios conectados y despliegues más densos.

3.2. Arquitectura de redes 5G

Las técnicas de transmisión aplicadas en la capa física y en el control de acceso al medio permiten responder a necesidades como el aumento de la velocidad y la conexión simultánea de un gran número de dispositivos. Sin embargo, la baja latencia, la movilidad elevada y la capacidad de soportar un gran volumen de tráfico por unidad de área no dependen únicamente de estas capas, sino que también exigen cambios en el núcleo de red. Por esta razón, la arquitectura constituye una de las principales evoluciones introducidas por 5G. Frente a generaciones anteriores, ofrece una mayor flexibilidad gracias a la segmentación lógica y a la softwarización y virtualización tanto de la red como de los servicios que proporciona.

De forma general, la arquitectura de una red 5G está compuesta por tres elementos principales: la red de acceso radio (*Radio Access Network, RAN*), el núcleo de red y el equipo de usuario (*User Equipment, UE*). Estos elementos se representan mediante distintas funciones de red (*Network Functions, NF*) que interactúan entre sí a través de interfaces estandarizadas. En este contexto, las redes 5G siguen una arquitectura basada en servicios (*Service-Based Architecture, SBA*), en la que las funciones de red se implementan como servicios independientes. Este enfoque aporta mayor modularidad al sistema, facilita la actualización de sus componentes y permite incorporar nuevas funcionalidades. Además, favorece la reutilización de servicios y la automatización de la red, así como la reducción de costes mediante el despliegue de funciones virtualizadas (*Virtual Network Functions, VNF*) en centros de datos.

La distribución de las funciones también se beneficia de la separación entre el plano de control (*Control Plane, CP*) y el plano de usuario (*User Plane, UP*), denominada *Control and User Plane Separation (CUPS)*. Gracias a esta separación, las funciones encargadas del tráfico de usuario pueden situarse cerca de las aplicaciones cuando se busca disminuir la latencia y

mejorar el rendimiento. En cambio, las funciones de control pueden centralizarse para ofrecer una gestión más fiable de la red. De este modo, el plano de usuario transporta los datos, mientras que el plano de control gestiona la señalización. La comunicación entre ambos se realiza mediante interfaces estandarizadas, y los servicios 5G se construyen mediante cadenas de funciones de red [4].

En la Figura 3.3 se muestra una representación general de la arquitectura del núcleo de red 5G, donde se distinguen el plano de control y el plano de usuario, así como las principales funciones de red y sus interacciones. Entre estas funciones destacan el *Access and Mobility Management Function (AMF)*, encargado de la gestión del acceso y la movilidad; el *Session Management Function (SMF)*, responsable de la gestión de las sesiones; y el *User Plane Function (UPF)*, que se encarga del encaminamiento del tráfico de datos. En la Figura 3.4 se resumen las principales funciones de red que componen la arquitectura 5G junto con una breve descripción de su funcionalidad [4].

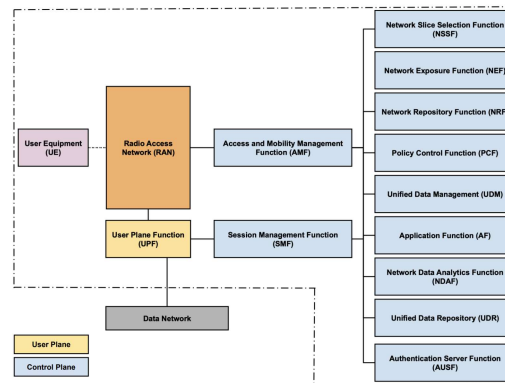


Figura 3.3: Arquitectura general del núcleo de red 5G, mostrando la separación entre el plano de control y el plano de usuario [4].

Network Function	Description
Application function	Interact with the 5G core, especially PCF and NEF, to help in traffic routing.
Access and mobility management function	End point of the no-access layer which includes registration, connection, and access and mobility management.
Authentication server function	Supervise the authentication process of UEs.
Data network	Connectivity function to any data network.
Network data analytics function	Data analytics of the NFs.
Network exposure function (NEF)	Expose the functionalities and events of the NF by allowing the communication to external applications.
Network repository function	Register the NFs and allows their identification to facilitate composite services.
Network slice selection function	Select the logic network instances that serve the UE.
Policy control function (PCF)	Support the selected policies which are used by CP to control the network.
Radio access network	Allow the radio access to the NF by UP and the CP by the core of the 5G network.
Session management function	Request of the session beginning, modification and liberation of the data, and IP assignment of the UEs.
Unified data management (UDM)	Support the generation of authentication credentials, user identification and subscriptions management.
Unified data repository	Allow to UDM and PCF to obtain subscriptions and policies information, respectively.
User equipment (UE)	Allow the final users to use the 5G network services.
User plane function	Manage mobility and QoS among radio access technologies, routes packages, and generate traffic records.

Figura 3.4: Funciones de red de los componentes de 5G [4].

Además, la arquitectura 5G se apoya en diversas tecnologías que permi-

ten mejorar su flexibilidad y capacidad de adaptación. Entre ellas destacan el *Mobile Edge Computing (MEC)*, el fog computing, el cloud computing, las redes definidas por *software (Software Defined Networking, SDN)* y la virtualización de funciones de red (NFV), consideradas elementos clave en el despliegue de redes 5G [4].

En cuanto a la red de acceso radio de nueva generación (*Next Generation Radio Access Network, NG-RAN*), esta es la encargada de proporcionar conectividad inalámbrica a los dispositivos. Un nodo NG-RAN puede ser de dos tipos: un gNB, que proporciona las terminaciones de protocolo del plano de usuario y del plano de control de *New Radio (NR)* hacia el equipo de usuario, o un ng-eNB, que proporciona dichas terminaciones utilizando la tecnología *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)* [5].

La arquitectura de la NG-RAN se muestra en la Figura 3.5, donde se representan las interconexiones entre los distintos nodos de acceso y su relación con el núcleo de red.

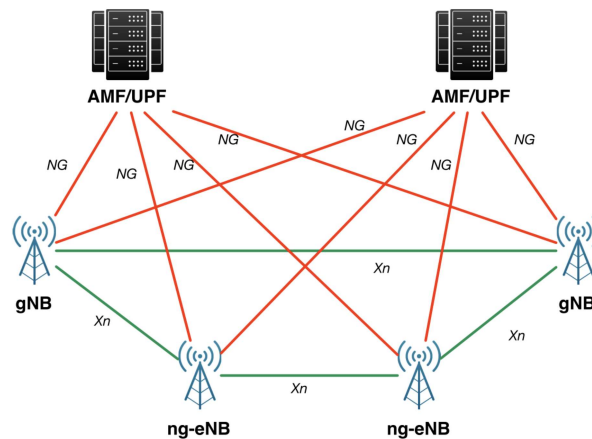


Figura 3.5: Arquitectura de la red de acceso radio NG-RAN [5].

La flexibilidad y modularidad de la arquitectura 5G permiten atender servicios con distintos requisitos de latencia, capacidad, movilidad y densidad de conexión.

3.3. Movilidad en 5G: *handover* intercelular, movilidad intra-gNB y movilidad a nivel de haz

Teniendo en cuenta la alta densidad de celdas pequeñas en redes 5G y los exigentes requisitos de servicio, los *handovers* en bandas de alta frecuencia resultan inevitables. Por ello, una gestión de movilidad eficiente es fundamental para garantizar el rendimiento del sistema [26].

Con el objetivo de explicar distintos tipos de movilidad en 5G, en esta sección se diferencian dos enfoques. Para la movilidad intercelular, se toma como referencia el estudio presentado en [26], basado en un modelo HetNet 5G con estaciones base macrocelulares y puntos de acceso de celdas pequeñas. Para la movilidad intra-gNB y la movilidad a nivel de haz, se emplean las especificaciones 3GPP TS 38.300 y TS 38.401, que describen la movilidad a nivel de celda, la movilidad a nivel de haz y procedimientos internos de la arquitectura NG-RAN [27, 28].

3.3.1. *Handover* intercelular en escenarios HetNet 5G

En el modelo HetNet considerado en [26], los procedimientos intercelulares analizados incluyen la movilidad entre una estación base macrocelular y un AP de celda pequeña, entre dos APs bajo la misma macrocelda y entre dos estaciones base macrocelulares 5G.

Escenarios de *handover*

En arquitecturas *HetNet* 5G, los usuarios pueden disponer de conectividad dual con una estación base macrocelular (BS) y un punto de acceso (AP) de celda pequeña. Mientras que la BS proporciona robustez en la conexión, los APs permiten alcanzar mayores tasas de datos.

En cada macrocelda, el equipo de usuario (UE) mantiene conexión tanto en el plano de control (CP) como en el plano de usuario (UP), y los *handovers* pueden activarse por condiciones de señal o requisitos de servicio.

En el modelo HetNet considerado en [26], se analizan los siguientes escenarios de *handover*:

- Entre una estación base macrocelular y un AP de celda pequeña.
- Entre dos APs de celda pequeña bajo la misma estación base macrocelular.
- Entre dos estaciones base macrocelulares 5G.

A diferencia de LTE, donde determinados *handovers* requieren una elevada señalización con el núcleo de red, el modelo de arquitectura 5G analizado en [26] busca simplificar estos procesos mediante la separación entre el plano de control y el plano de usuario, la virtualización de funciones de red y la independencia del AMF respecto a la tecnología de acceso radio.

Procedimientos de *handover*

En función del escenario considerado, los procedimientos de *handover* presentan diferencias en términos de señalización, latencia y participación del núcleo de red.

En 5G, estos procedimientos buscan reducir la latencia y la sobrecarga de señalización mediante una mayor participación de la RAN.

***Handover* desde una estación base macrocelular hacia un AP de celda pequeña**

La transición desde una estación base macrocelular hacia un punto de acceso de celda pequeña puede producirse cuando el UE detecta mejores condiciones de señal o cuando el servicio requiere mayores tasas de datos. Este escenario es habitual en redes 5G densificadas, donde las celdas pequeñas permiten mejorar la capacidad y el rendimiento.

En el procedimiento propuesto para la transición desde una estación base macrocelular hacia un AP de celda pequeña, únicamente se transfiere el plano de usuario, mientras que el plano de control se mantiene en la estación base macrocelular. Este enfoque, basado en conectividad dual, permite garantizar la continuidad del servicio y reducir la latencia del proceso.

El procedimiento se inicia con el envío de un informe de mediciones por parte del UE, tras el cual la estación base toma la decisión de *handover* y envía una solicitud al punto de acceso destino. Una vez confirmada, se transmite la orden de *handover* al UE, que se sincroniza con la nueva celda [26].

Tal como se muestra en la Figura 3.6, este proceso se gestiona íntegramente en la RAN, sin intervención del núcleo de red, lo que permite reducir la señalización en comparación con LTE y contribuye a mejorar la eficiencia en la gestión de movilidad.

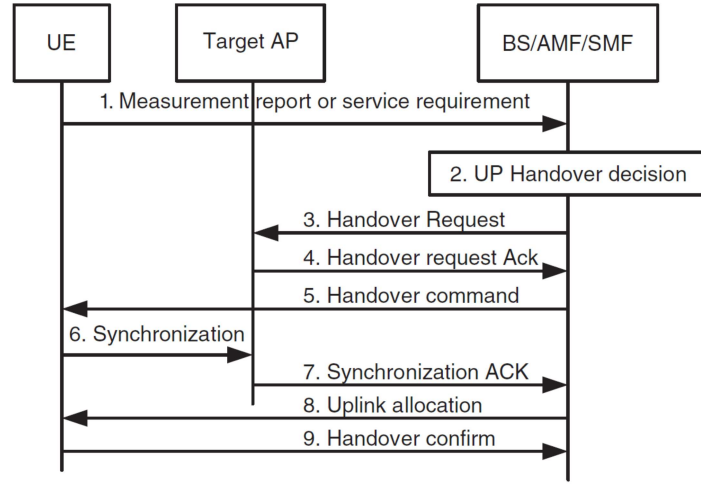


Figura 3.6: Procedimiento de *handover* del plano de usuario (UP) desde una estación base macrocelular hacia un punto de acceso de celda pequeña [26].

***Handover* entre celdas pequeñas**

En este escenario, los handovers entre puntos de acceso (AP) de celdas pequeñas bajo la cobertura de una misma estación base macrocelular pueden producirse con alta frecuencia debido al uso de bandas de alta frecuencia (superiores a 10 GHz), lo que incrementa la sensibilidad a cambios en la calidad de la señal.

En redes LTE, este tipo de handover requiere la participación tanto del plano de control (CP) como del plano de usuario (UP), implicando interacción con el núcleo de red (CN) y, por tanto, mayores latencias. Además, el uso de diferentes tecnologías de acceso radio (RAT) introduce señalización adicional.

En el modelo HetNet propuesto en [26], el cambio entre dos APs pertenecientes a una misma macrocelda se realiza únicamente sobre el plano de usuario y es controlado por la estación base macrocelular. Gracias a que la función AMF es independiente del RAT, estos handovers no dependen de la tecnología de acceso utilizada.

El procedimiento consiste en que el UE envía un informe de mediciones a la BS, que toma la decisión de handover y coordina la transición entre el AP origen y el AP destino a través de la interfaz Xn. Posteriormente, el UE se sincroniza con el AP destino y continúa la transmisión.

Al mantenerse ambos APs bajo la misma macrocelda, no es necesario realizar handover del plano de control, lo que reduce la sobrecarga de señali-

zación y la latencia. Toda la gestión del handover se realiza dentro de la RAN [26].

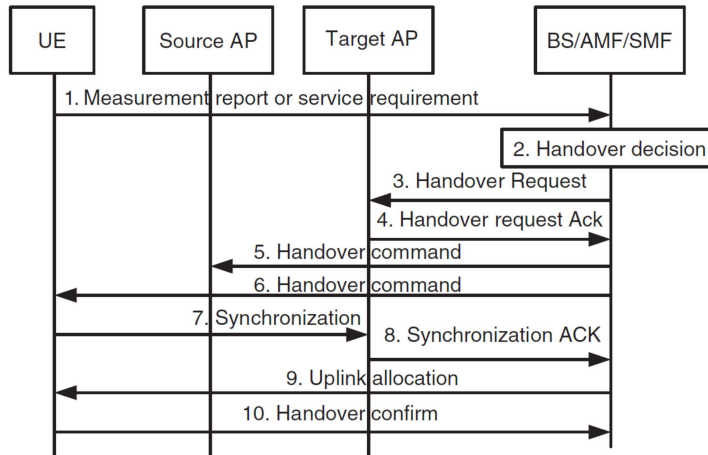


Figura 3.7: Procedimiento de *handover* UP entre dos puntos de acceso de celdas pequeñas [26].

Este enfoque se adapta a entornos densificados, donde son frecuentes los cambios entre celdas pequeñas.

***Handover* entre dos estaciones base macrocelulares 5G**

En este escenario, los *handovers* pueden producirse entre estaciones base macrocelulares 5G, incluso utilizando diferentes tecnologías de acceso radio (*multi-RAT*). A diferencia de LTE, donde estos procesos implican una elevada señalización en el núcleo de red, en 5G se simplifican gracias a la arquitectura basada en SDN y a la independencia de la función AMF respecto al RAT.

El procedimiento de *handover* depende de la disponibilidad de vectores de autenticación en la estación base origen. Si existe al menos un vector disponible, el *handover* puede gestionarse completamente dentro de la RAN, utilizando dicho vector para establecer la autenticación mutua (AKA) entre el UE y la estación base destino, tal y como se muestra en la Figura 3.8 [26].

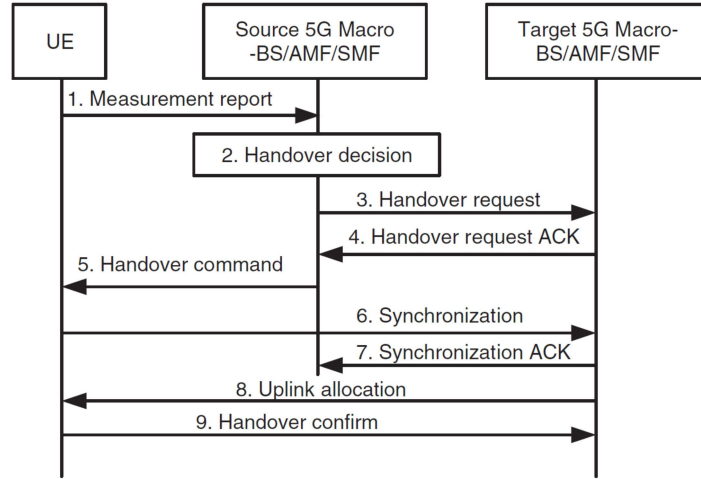


Figura 3.8: Procedimiento de *handover* entre dos estaciones base macrocelulares 5G con vector de autenticación disponible [26].

En caso contrario, es necesario recurrir al núcleo de red 5G para generar nuevos vectores de autenticación, lo que introduce una mayor sobrecarga de señalización y aumenta la latencia del proceso, como se muestra en la Figura 3.9.

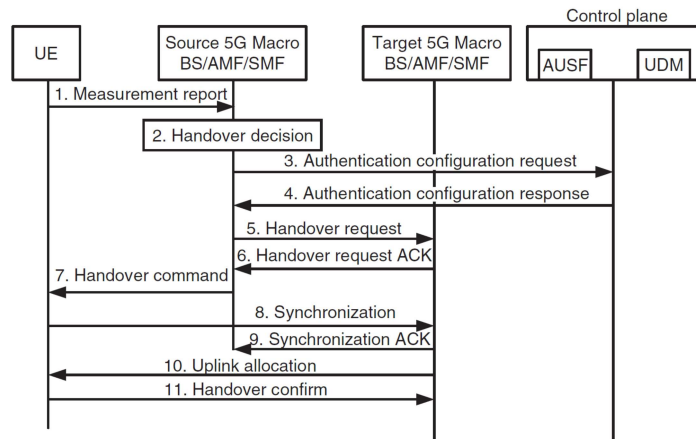


Figura 3.9: Procedimiento de *handover* entre dos estaciones base macrocelulares 5G sin vector de autenticación disponible [26].

Dentro de este mecanismo, los autores proponen que las estaciones base mantengan al menos un vector de autenticación disponible para evitar retrasos durante el *handover* [26].

3.3.2. Movilidad intra-gNB y movilidad a nivel de haz en 5G NR

Además de los *handovers* entre estaciones base, 5G NR contempla distintos niveles de movilidad. La especificación 3GPP TS 38.300, titulada *NR and NG-RAN Overall Description; Stage-2*, distingue entre movilidad a nivel de celda y movilidad a nivel de haz [27]. Esta distinción es relevante porque no todos los cambios asociados a la movilidad del UE implican necesariamente el mismo tipo de procedimiento ni se reflejan de la misma forma en las medidas capturadas.

La movilidad a nivel de celda se produce cuando el UE cambia de celda servidora. Este cambio puede ocurrir entre celdas pertenecientes al mismo gNB o entre celdas asociadas a gNBs diferentes. En este tipo de movilidad pueden modificarse identificadores como el PCI o el NCI, por lo que resulta posible detectar estos eventos a partir de las medidas registradas por la aplicación.

En cambio, la movilidad a nivel de haz puede producirse dentro de una misma celda servidora, aunque la especificación también contempla movilidad de haz entre celdas. En este caso, el UE no cambia necesariamente de celda ni de gNB, sino que la red adapta el enlace radio mediante la selección o actualización del haz más adecuado.

A diferencia de un *handover* a nivel de celda, la movilidad a nivel de haz no requiere necesariamente señalización RRC explícita ni tiene por qué reflejarse como un cambio de PCI, TAC o NCI, especialmente cuando se produce dentro de la misma celda servidora.

De forma complementaria, la especificación 3GPP TS 38.401, titulada *NG-RAN; Architecture Description*, contempla procedimientos internos de movilidad dentro de la arquitectura NG-RAN, como el *Intra-gNB-DU handover*. Este procedimiento no debe confundirse con una simple actualización de haz, pero muestra que 5G NR incorpora mecanismos de movilidad internos al gNB, además del *handover* intercelular clásico [28].

En el escenario experimental de este trabajo se dispone de un núcleo de red común y de dos estaciones base 5G NR. Una de ellas, situada en el CITIC, proporciona dos sectores mediante antenas directivas, mientras que la segunda estación base se encuentra en la ETSIIT.

En particular, un cambio entre los dos sectores asociados al gNB del CITIC puede interpretarse como un posible caso de movilidad dentro del mismo gNB, ya que el UE cambia de sector o celda servidora dentro de la misma estación base. Por otro lado, un cambio desde una celda del CITIC hacia la celda asociada al gNB de la ETSIIT corresponde a un caso de movilidad entre gNBs.

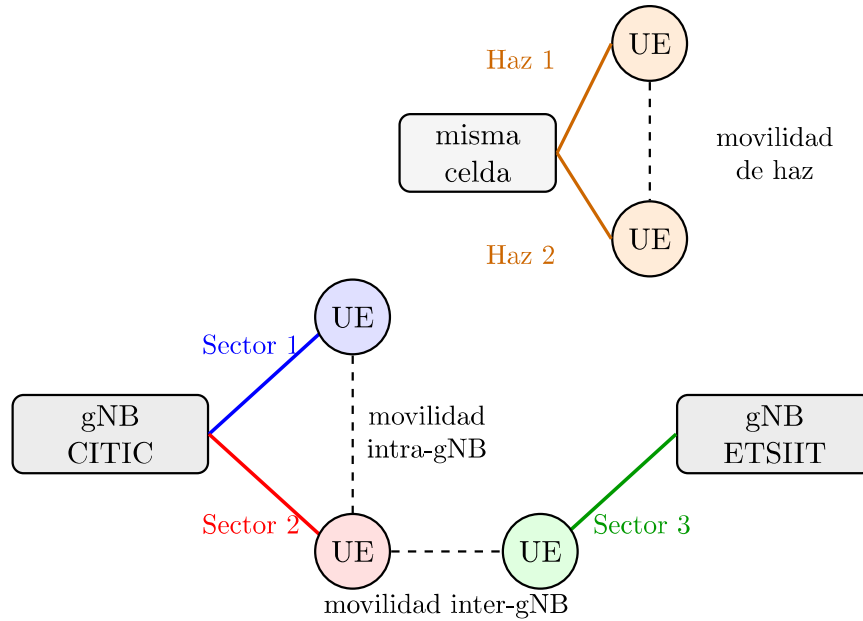


Figura 3.10: Esquema conceptual de movilidad a nivel de celda y ejemplo de movilidad a nivel de haz dentro de una misma celda en 5G NR.

Por tanto, en este trabajo la movilidad observada se analiza principalmente a partir de cambios en identificadores de celda, como el PCI o el NCI, y de la evolución de métricas radio como RSRP, RSRQ, SINR y CQI. La movilidad a nivel de haz se incluye como concepto relevante en 5G NR, aunque no se identifica directamente en las pruebas realizadas, ya que la aplicación desarrollada no registra el haz activo.

3.4. Principales métricas de rendimiento

Para evaluar el comportamiento de una red 5G no basta únicamente con conocer si el dispositivo tiene cobertura o no. Es necesario analizar la potencia recibida, la calidad de la señal y las condiciones del canal radio mediante distintas métricas. Estas medidas ayudan a interpretar cómo se comporta la red en distintos entornos y permiten detectar zonas con buena cobertura, áreas con degradación de señal o posibles cambios de celda durante un recorrido.

A continuación, se describen las principales métricas utilizadas para evaluar el estado de la conexión en redes 5G [24][25] :

- **RSRP (*Reference Signal Received Power*):** indica la potencia media de la señal de referencia recibida desde la estación base. Es

una de las métricas más utilizadas para analizar la cobertura, ya que permite saber si la señal que llega al terminal es fuerte o débil. Además, se utiliza en procesos de selección de celda y handover. Se expresa en dBm.

- **RSRQ (*Reference Signal Received Quality*)**: mide la calidad de la señal recibida, teniendo en cuenta no solo la potencia de la señal, sino también la interferencia y el ruido presentes en el entorno. Por ello, complementa al RSRP y permite valorar mejor si la conexión es estable o si puede verse afectada por interferencias.
- **RSSI (*Received Signal Strength Indicator*)**: representa la potencia total recibida en una determinada banda de frecuencia. A diferencia del RSRP, incluye tanto la señal útil como las interferencias y el ruido, por lo que ofrece una visión más general del nivel de energía recibido por el terminal. Se mide en dBm.
- **SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*)**: expresa la relación entre la señal útil y la suma de interferencia y ruido. Es una métrica importante para evaluar la calidad real del enlace radio, ya que valores altos suelen estar relacionados con mejores velocidades y una comunicación más estable. Se expresa en dB.
- **CQI (*Channel Quality Indicator*)**: indica la calidad del canal radio mediante un valor numérico utilizado por la red para adaptar la modulación y la codificación. Cuando las condiciones del canal son buenas, pueden emplearse esquemas de transmisión más eficientes; en cambio, si la calidad empeora, se utilizan configuraciones más robustas para mantener la comunicación.
- **PCI (*Physical Cell Identifier*)**: identifica la celda física a la que está conectado el terminal. En pruebas de movilidad, esta métrica es especialmente útil para detectar cuándo el dispositivo cambia de celda durante el recorrido.
- **NCI (*NR Cell Identity*)**: corresponde al identificador de celda en redes 5G NR. Permite distinguir de forma más precisa la celda servidora dentro de la red y complementar la información proporcionada por el PCI.
- **ARFCN (*Absolute Radio Frequency Channel Number*)**: identifica el canal de frecuencia utilizado por la conexión radio. Gracias a esta métrica se puede conocer la frecuencia o banda sobre la que está trabajando el terminal durante la medición.

Tras exponer los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del trabajo, en los siguientes capítulos se incluye la estimación de costes del proyecto y se muestra, mediante un diagrama de Gantt, la planificación temporal seguida durante su desarrollo. Posteriormente, se describe el proceso de diseño e implementación llevado a cabo para la aplicación.

Capítulo 4

Planificación y costes

En este capítulo se presenta la planificación temporal del proyecto y la estimación de costes asociada a su desarrollo. En primer lugar, se presenta la organización temporal de las tareas realizadas, previamente definidas y justificadas en la metodología, junto con la duración aproximada de cada una de ellas.

Posteriormente, se recogen los recursos *hardware*, *software* y humanos empleados durante el desarrollo. A partir de estos recursos, se realiza una estimación económica que permite obtener un presupuesto aproximado del coste total del proyecto.

4.1. Planificación temporal

El proyecto se ha planificado con una duración total de 17 semanas, lo que equivale aproximadamente a 119 días naturales. Desde el inicio del trabajo se establecieron las principales fases de desarrollo, organizando las tareas en distintos bloques relacionados con el estudio previo, la configuración del entorno, el desarrollo de la aplicación, la realización de pruebas experimentales y la redacción de la memoria.

La planificación se ha estructurado en cuatro bloques principales. El primer bloque, dedicado al estudio previo y a la configuración de la red 5G, se ha desarrollado durante las siete primeras semanas. En esta fase se han analizado los conceptos fundamentales de las redes 5G, se ha estudiado la plataforma Amarisoft, se ha comprendido la configuración de la red experimental y se han revisado los mecanismos de movilidad y *handover*. Esta etapa ha sido necesaria para disponer de una base técnica suficiente antes de abordar el desarrollo de la aplicación y la realización de las pruebas experimentales.

El segundo bloque, correspondiente al desarrollo de la aplicación Android, ha sido el más extenso del proyecto y se ha prolongado aproximadamente desde la semana 2 hasta la semana 15. Su duración se debe a que el desarrollo se ha realizado de forma progresiva, comenzando con la captura de métricas radio y coordenadas GPS, y añadiendo posteriormente el almacenamiento en CSV, la visualización sobre mapa, las pruebas activas mediante *ping* e *iperf3*, el historial de medidas, las gráficas internas y la integración con InfluxDB y Grafana. Algunas de estas tareas se han solapado con el estudio inicial y con las pruebas experimentales, ya que la aplicación se ha ido ajustando conforme se han detectado nuevas necesidades durante su uso.

El tercer bloque, centrado en la evaluación experimental y el análisis de resultados, se ha llevado a cabo durante las cinco últimas semanas del proyecto. En este periodo se han realizado las pruebas de medida en la red 5G exterior, se han obtenido métricas de cobertura, calidad radio, conectividad y movilidad, y se han analizado los resultados mediante los archivos CSV generados, las gráficas de la aplicación y los paneles de Grafana.

Por último, el cuarto bloque, correspondiente a la redacción de la memoria, se ha desarrollado de forma transversal desde la semana 3 hasta la semana 17. Esta tarea no se ha realizado únicamente al final del proyecto, sino que se ha avanzado conforme se han completado las distintas fases de estudio, desarrollo y pruebas. En las últimas semanas se ha concentrado la revisión completa del documento, la corrección de errores y la preparación de la entrega final.

La planificación temporal se representa de forma gráfica mediante el diagrama de Gantt mostrado en la Figura 4.1.

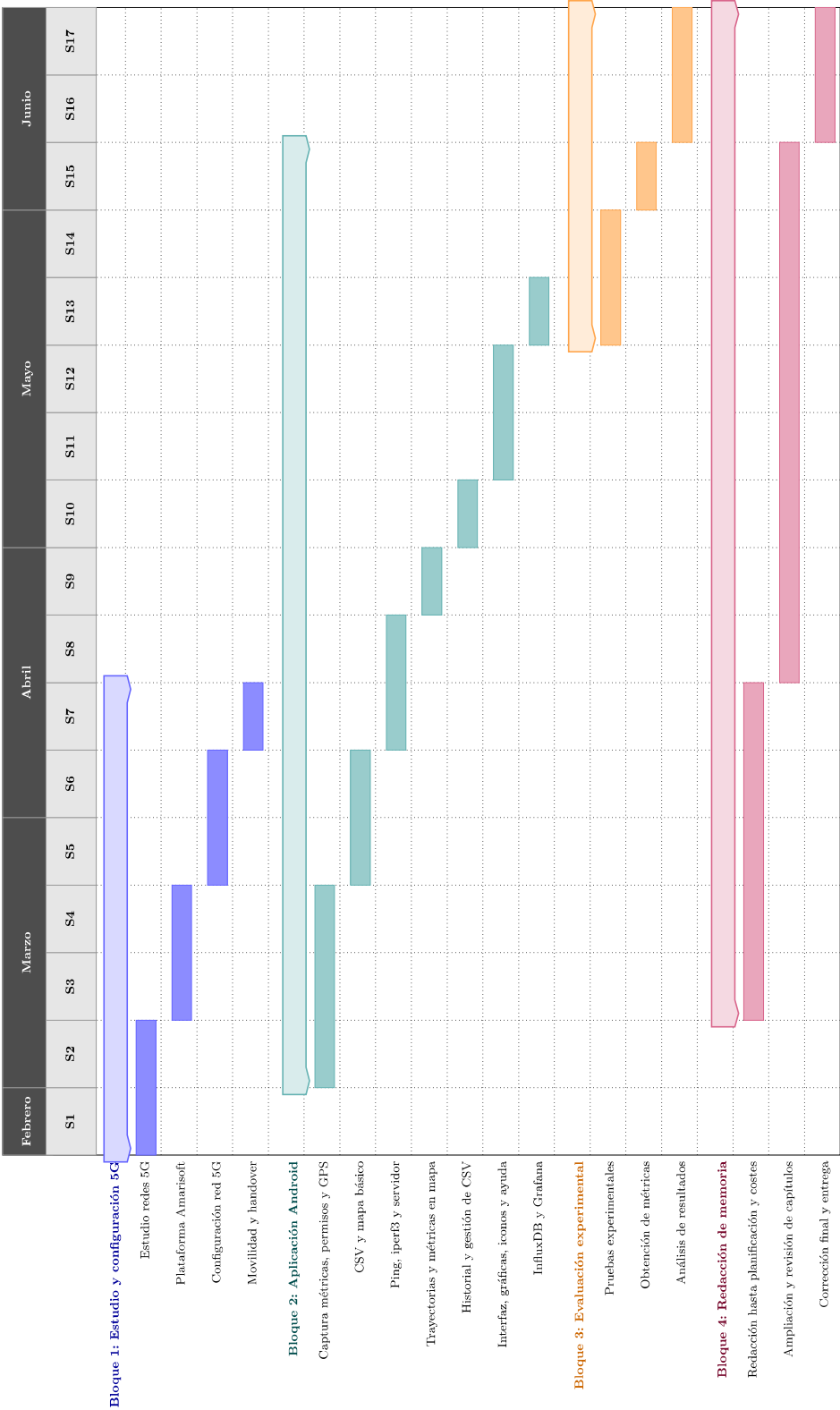


Figura 4.1: Diagrama de Gantt de la planificación temporal del proyecto.

4.2. Recursos

En esta sección se recogen los recursos utilizados durante el desarrollo del proyecto, diferenciando entre recursos humanos, hardware y *software*. Además, se incluye el coste asociado a cada tipo de recurso y se calcula el presupuesto total estimado del proyecto a partir de la suma de todos ellos.

4.2.1. Recursos *software*

Los recursos *software* corresponden a las aplicaciones, herramientas de desarrollo y plataformas utilizadas durante la realización del proyecto. En este caso, se han empleado tanto herramientas propias, como la aplicación Android desarrollada, como *software* de apoyo para la programación, la supervisión de la red, la realización de medidas y la visualización de los datos obtenidos.

En la Tabla 4.1 se recogen los principales recursos *software* utilizados, indicando su función dentro del proyecto y el coste asociado.

Cuadro 4.1: Recursos *software* utilizados en el proyecto.

<i>Software</i>	Definición	Coste
Aplicación <i>5G Scanner</i>	Aplicación propia desarrollada para la captura de parámetros 5G, registro de coordenadas GPS y almacenamiento de medidas.	0 €
Android Studio [30]	Entorno de desarrollo utilizado para programar la aplicación Android.	0 €
Java [34]	Lenguaje principal utilizado en la creación de la aplicación Android.	0 €
APIs nativas de Android	APIs utilizadas para acceder a información de telefonía móvil, obtener métricas LTE y 5G NR, asociar cada muestra a coordenadas GPS y exportar archivos: <code>TelephonyManager</code> [23], <code>CellInfo</code> [41], <code>CellInfoNr</code> [42], <code>CellInfoLte</code> [43], <code>CellSignalStrengthNr</code> [24], <code>CellSignalStrengthLte</code> [40], <code>LocationManager</code> [38] y <code>FileProvider</code> [39].	0 €
osmdroid / OpenStreetMap [33]	Librería <i>open source</i> utilizada para integrar mapas en la aplicación y representar trayectorias, puntos de medida, <i>handovers</i> y antenas configuradas.	0 €

<i>Software</i>	<i>Definición</i>	<i>Coste</i>
MPAndroidChart [35]	Librería utilizada para generar gráficas dentro de la aplicación a partir de los datos almacenados en CSV.	0 €
Licencia Amarisoft / AMARI NW 4000	Licencia comercial empleada para habilitar las funciones de estación base 5G NR, núcleo 5G SA, soporte y actualizaciones de la plataforma Amarisoft. Su coste se encuentra incluido dentro del bloque AMARI vBBU y se imputa en la estimación de recursos <i>hardware</i> .	Incluida en <i>hardware</i>
iperf3 para Android [31]	Herramienta utilizada para realizar pruebas de <i>throughput</i> TCP/UDP desde el terminal.	0 €
InfluxDB Cloud [36]	Base de datos temporal utilizada para almacenar medidas y facilitar su visualización externa.	0 €
Grafana [37]	Herramienta empleada para visualizar las métricas enviadas a InfluxDB mediante paneles gráficos.	0 €
Git / GitHub [32]	Control de versiones y almacenamiento del código desarrollado.	0 €
Ping ICMP [44]	Herramienta utilizada para medir latencia, pérdida de paquetes y tiempo de ida y vuelta mediante mensajes ICMP enviados desde el terminal.	0 €
Coste total <i>software</i>		0 €

4.2.2. Recursos *hardware*

Los recursos *hardware* hacen referencia a los componentes físicos y dispositivos tecnológicos empleados durante el desarrollo del proyecto. En este trabajo, estos recursos incluyen tanto los equipos utilizados para la programación y documentación como los dispositivos necesarios para la realización de las pruebas experimentales y la captura de medidas.

En primer lugar, en la Tabla 4.2 se recogen las características técnicas principales de los dispositivos empleados directamente durante el desarrollo de la aplicación y la toma de medidas.

Cuadro 4.2: Características técnicas de los dispositivos *hardware* utilizados.

Componente	S.O.	CPU	RAM	Almac.
Portátil ASUS VivoBook OLED K3402ZA-KM079W [45]	Windows 11 Home	Intel® Core™ i7-12700H	16 GB	512 GB SSD
Samsung Galaxy A17 5G [46]	Android	Octa-Core	8 GB	256 GB
Samsung Galaxy S24 [48]	Android	Samsung Exynos 2400 Deca-Core	8 GB	128 GB

Además de las características técnicas, en la Tabla 4.3 se indica el uso concreto de estos dispositivos dentro del proyecto.

Cuadro 4.3: Uso de los dispositivos *hardware* en el proyecto.

Dispositivo	Uso en el proyecto
Portátil ASUS VivoBook OLED K3402ZA-KM079W [45]	Equipo utilizado para la programación de la aplicación, la redacción de la memoria y el tratamiento de los datos obtenidos.
Samsung Galaxy A17 5G [46]	Dispositivo principal utilizado para instalar la aplicación desarrollada y recoger muestras durante las pruebas experimentales.
Samsung Galaxy S24 [48]	Dispositivo de apoyo utilizado para comprobar el funcionamiento de la aplicación y realizar pruebas.

Por otro lado, en la Tabla 4.4 se recogen los recursos *hardware* asociados a la infraestructura experimental de red 5G y a la conectividad empleada durante el desarrollo.

Cuadro 4.4: Infraestructura *hardware* y recursos de conectividad utilizados.

Recurso	Características principales	Uso en el proyecto
AMARI vBBU	Equipamiento de banda base de Amarisoft utilizado en la estación base exterior. Incluye licencia AMARI, PC base, tarjetas PCIe CPRI, soporte técnico y actualizaciones de <i>software</i> .	Funcionamiento de la infraestructura de red 5G del laboratorio.
RRH Package n78 Amarisoft	Paquete de radio remota para la estación base exterior. Incluye RRH, fibra CPRI, cableado RF y antenas direccionales.	Transmisión y recepción de señal radio en el despliegue experimental.
Antenas Amarisoft	Tres antenas empleadas en el despliegue experimental de la red 5G.	Transmisión y recepción de señal radio durante las pruebas realizadas.
Servidor Amarisoft	Ordenador de torre que alberga el servidor de Amarisoft y permite ejecutar los componentes necesarios para el funcionamiento del entorno experimental de red 5G.	Ejecución de los servicios necesarios para operar la red 5G del laboratorio.
Tarjeta SIM prepago Vodafone [47]	Tarjeta prepago utilizada para disponer de conectividad móvil durante el desarrollo de la aplicación.	Comprobación del funcionamiento de la aplicación cuando no se dispone de acceso al laboratorio y no es posible conectarse a la infraestructura Amarisoft.

Una vez descritas las características principales de los recursos utilizados, en la Tabla 4.5 se recoge el coste de referencia asociado a los recursos *hardware* empleados en el proyecto.

Cuadro 4.5: Coste imputado de los recursos *hardware* utilizados.

Recurso	Coste adquisición	Uso	Coste imputado
Portátil ASUS VivoBook OLED K3402ZA-KM079W [45]	1.100 €	4 meses	91,67 €
Samsung Galaxy A17 5G [46]	280 €	4 meses	23,33 €
Samsung Galaxy S24 [48]	620,74 €	4 meses	51,73 €
Tarjeta SIM prepago Vodafone [47]	10 €	Gasto directo	10 €
Tarjetas USIM experimentales	100 €	4 meses	8,33 €
AMARI vBBU para estación base exterior	70.000 €	4 meses	5.833,33 €
Incluye: 2 unidades AMARI vBBU, PC base, tarjetas PCIe CPRI, soporte técnico, actualizaciones y licencia AMARI NW 4000 considerada dentro de los recursos <i>software</i> .			
RRH Package n78 Amarisoft	30.000 €	4 meses	2.500 €
Incluye: 2 paquetes RRH n78 utilizados en el despliegue, conectores, antenas direccionales y garantía hardware. Aunque el paquete comercial puede incluir otros elementos de interconexión, solo se destacan los recursos empleados directamente en el trabajo.			
Core Server, Gateway Router y Switch	Infraestructura del laboratorio	–	–
Antenas GPS de sincronización	Infraestructura del laboratorio	–	–
Servidor de pruebas para ping e iperf3	Infraestructura del laboratorio	–	–
Total <i>hardware</i> imputado			8.518,39 €

El coste imputado se ha calculado considerando una vida útil de 4 años para los equipos principales y un uso aproximado de 4 meses durante el desarrollo del proyecto. Por tanto, para cada recurso amortizable se aplica la siguiente expresión:

$$C_{\text{imputado}} = C_{\text{adquisición}} \cdot \frac{4}{4 \cdot 12}$$

En el caso de la infraestructura de red exterior Amarisoft, el coste se divide en dos bloques principales. El primero corresponde al bloque AMARI vBBU, con un coste de adquisición de 70.000 €, e incluye las unidades AMARI vBBU, servidores asociados, tarjetas PCIe CPRI, soporte técnico, actualizaciones y licencias necesarias para la operación de la red. El segundo

corresponde al paquete RRH n78, con un coste de adquisición de 30.000 €, e incluye las unidades radio remotas, fibra CPRI, cableado RF, conectores, antenas direccionales y garantía hardware.

Los costes imputados al proyecto son:

$$70.000 \cdot \frac{4}{4 \cdot 12} = 5.833,33$$

$$30.000 \cdot \frac{4}{4 \cdot 12} = 2.500$$

Aunque la tabla recoge el coste de referencia de los recursos *hardware* utilizados, parte de la infraestructura pertenece al laboratorio y no supone un coste de adquisición directa para el proyecto.

4.2.3. Recursos Humanos

Los recursos humanos hacen referencia a las personas que han participado en el desarrollo, supervisión y seguimiento del proyecto.

- **Alejandra Cabrera Estepa:** Estudiante del Grado en Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Granada. Responsable del desarrollo del Trabajo de Fin de Grado.
- **Jorge Navarro Ortiz:** Profesor Titular e investigador de Universidad del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada. Tutor académico del proyecto, encargado de la orientación práctica y teórica del trabajo.
- **Félix Delgado Ferro:** Estudiante de doctorado e investigador en el grupo WiMuNet [49] del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada. Cotutor del proyecto, encargado del apoyo técnico, el seguimiento del desarrollo experimental y la revisión de las pruebas realizadas.

En la Tabla 4.6 se muestra una estimación del coste asociado a los recursos humanos empleados durante el desarrollo del proyecto.

Cuadro 4.6: Coste estimado de los recursos humanos.

Persona	Horas	Coste/hora	Coste total
Alejandra Cabrera Estepa	450	20 €	9.000 €
Jorge Navarro Ortiz	25	50 €	1.250 €
Félix Delgado Ferro	25	30 €	750 €
Total recursos humanos			11.000 €

4.3. Presupuesto estimado del proyecto

Por último, se presenta el presupuesto estimado del proyecto, teniendo en cuenta los recursos *software*, *hardware* y humanos descritos en los apartados anteriores. En la Tabla 4.7 se recoge el coste total de referencia asociado al desarrollo del Trabajo de Fin de Grado.

Cuadro 4.7: Presupuesto estimado del proyecto.

Concepto	Coste
Recursos <i>software</i>	0 €
Recursos <i>hardware</i>	8.518,39 €
Recursos humanos	11.000 €
Total estimado del proyecto	19.518,39 €

El coste total estimado del proyecto asciende a 19.518,39 €.

Capítulo 5

Diseño, despliegue e implementación

En este capítulo se describen los elementos que conforman el laboratorio experimental y las herramientas utilizadas para llevar a cabo este trabajo. En primer lugar, se presenta la arquitectura de la red exterior 5G NR instalada en el laboratorio WIN-NET-LAB del grupo WiMuNet [49], identificando las antenas, equipos de red y elementos de procesamiento que intervienen en su funcionamiento. Posteriormente, se describen los recursos *hardware* y *software* empleados, así como las soluciones integradas utilizadas o consideradas en el entorno de laboratorio.

Finalmente, se aborda la implementación de la aplicación Android 5G Scanner desarrollada para la toma de medidas de red y su posterior análisis. Esta aplicación constituye una parte fundamental del trabajo, ya que permite obtener información desde la perspectiva del terminal de usuario durante las pruebas experimentales. Para ello, incorpora funcionalidades orientadas a la captura de parámetros radio y de conectividad, el registro de la posición geográfica, la representación de las medidas obtenidas y el almacenamiento de los datos para su posterior tratamiento. De esta forma, la aplicación permite relacionar el comportamiento de la red 5G con el recorrido realizado y con las condiciones reales observadas durante las pruebas.

5.1. Arquitectura de red y despliegue

La red exterior 5G NR con tecnología Amarisoft utilizada en este trabajo se encuentra desplegada en dos instalaciones de la Universidad de Granada: el Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CITIC-UGR) y la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación (ETSIIT).

Desde el punto de vista de red, el despliegue está formado por dos estaciones base 5G NR, identificadas como gNB1 y gNB2, y tres sectores radio. La estación gNB1 se encuentra asociada al CITIC y proporciona servicio mediante dos sectores. Por su parte, la estación gNB2 se encuentra asociada a la ETSIIT y proporciona servicio mediante un único sector. Cada sector se constituye por una antena directiva, una unidad radio remota y una unidad de procesamiento de banda base. De esta forma, la red permite generar varias zonas de cobertura en el entorno exterior y facilita la realización de medidas.

La Figura 5.1 muestra la arquitectura general de la red exterior utilizada en este trabajo. En ella se representa la distribución física del despliegue entre CITIC-UGR y ETSIIT, así como la relación entre los elementos radio, las unidades de banda base, el núcleo de red y la infraestructura de transporte.

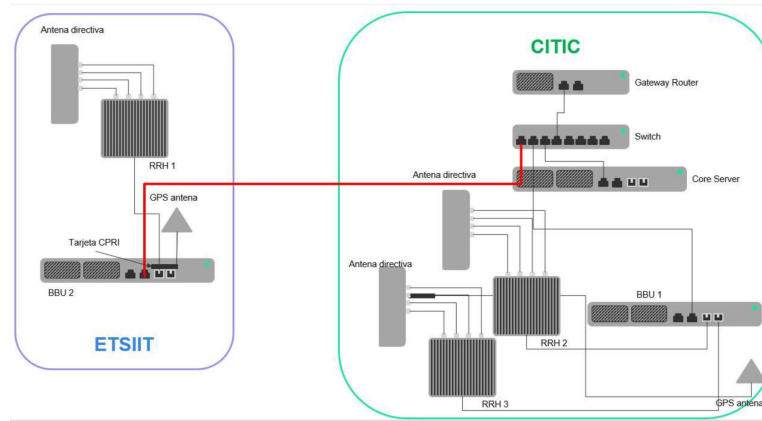


Figura 5.1: Arquitectura de la red exterior.

Los elementos físicos que componen cada una de estas partes se describen con mayor detalle en los apartados siguientes, donde se presentan los recursos *hardware* empleados en la red exterior y su relación con el escenario experimental utilizado.

5.2. Elementos del escenario experimental

El escenario utilizado corresponde a una red privada 5G SA de carácter experimental desplegada en el entorno CITIC-UGR y ETSIIT. La red se emplea para realizar medidas de cobertura, calidad radio, conectividad, latencia, *throughput* y movilidad entre celdas. Su uso está limitado a dispositivos autorizados mediante USIMs registradas en el núcleo de red, por lo que se trata de un entorno controlado y no abierto a usuarios finales.

La red opera en la banda n77, dentro del rango 3400–4200 MHz, con una portadora situada en torno a 3900 MHz y un ancho de banda de 50 MHz. Esta configuración permite evaluar el comportamiento de una red 5G NR en exteriores, utilizando duplexación TDD y varios sectores radio.

Los recursos del escenario pueden agruparse en tres bloques. El primero corresponde a la infraestructura de red, formada por antenas, unidades radio remotas (RRUs), unidades de banda base (BBUs), servidores, tarjetas CPRI (*Common Public Radio Interface*) y equipos de transporte. El segundo incluye los terminales, USIMs (*Universal Subscriber Identity Module*) y herramientas de medida utilizadas para obtener datos desde la perspectiva del usuario. El tercero está formado por los recursos *software* necesarios para configurar, operar y supervisar la red.

5.2.1. Recursos *hardware* de la red exterior

Los recursos *hardware* constituyen la base física del despliegue exterior. En conjunto, estos elementos permiten implementar la parte radio, realizar el procesamiento de banda base, interconectar los equipos de red y proporcionar conectividad extremo a extremo a los terminales autorizados.

Antenas directivas Alpha Wireless AW3923-T0-F

Las antenas empleadas en la red exterior son modelos de antenas directivas Alpha Wireless AW3923-T0-F [50]. Este modelo está diseñado para aplicaciones en banda C, incluyendo escenarios de acceso inalámbrico fijo y redes móviles privadas. Su rango de operación cubre aproximadamente de 3300 a 4200 MHz, por lo que resulta compatible con bandas 5G NR como n48, n77 y n78.

Además, estas antenas presentan una anchura de haz de 65° , una ganancia de 17.5 ± 0.5 dBi, polarización *Dual Slant* y pérdidas de retorno superiores a 14 dB. Su diseño de cuatro puertos permite trabajar con configuraciones MIMO 4x4.

En el escenario considerado se utilizan tres antenas directivas asociadas a los tres sectores radio de la red exterior. Dos de ellas se encuentran instaladas en el CITIC, mientras que la tercera está ubicada en la ETSIIT. La ubicación exacta de estas antenas, junto con los parámetros de identificación de celda asociados, se recoge en la Tabla 5.1.

Cuadro 5.1: Ubicación e identificación de las antenas configuradas en la red exterior.

Antena	PCI	TAC	Latitud	Longitud
Antena 1	1	100	37.19770	-3.62427
Antena 2	2	100	37.19750	-3.62431
Antena 3	3	100	37.19697	-3.62445

En las Figuras 5.2 y 5.3 se muestran las antenas instaladas en las dos ubicaciones del despliegue. En el caso del CITIC se observan dos antenas situadas en la misma zona del edificio, mientras que la tercera antena se encuentra en la ETSIIT.

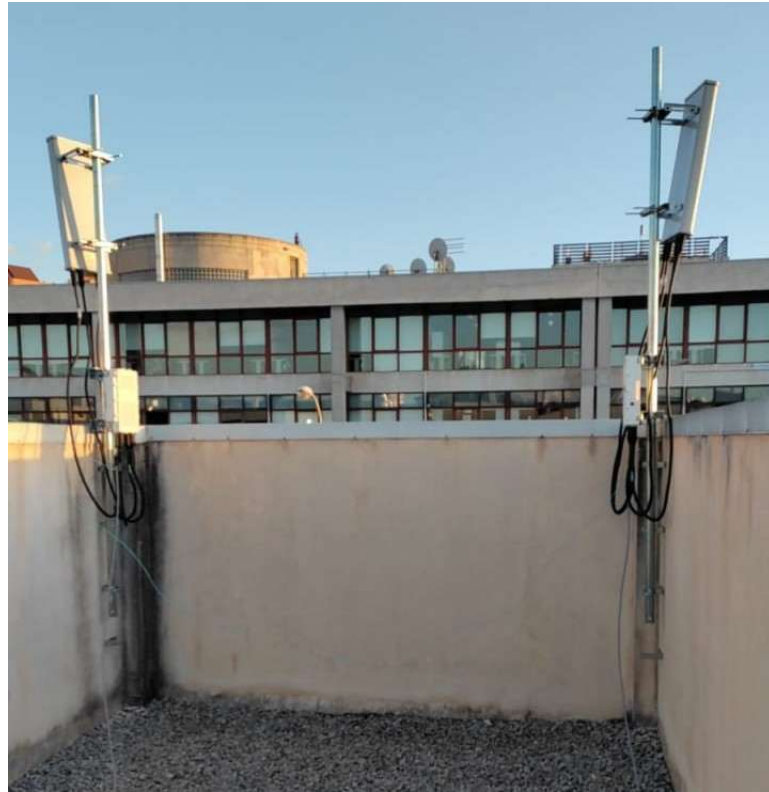


Figura 5.2: Antenas situadas en el CITIC.



Figura 5.3: Antena situada en la ETSIIT.

Cada antena presenta una orientación diferente, lo que permite dirigir la señal hacia distintas zonas del exterior. En concreto, la documentación del despliegue identifica un sector asociado a la ETSIIT orientado a 0° respecto al norte y dos sectores asociados al CITIC orientados a 266° y 102° respecto al norte. La representación de la cobertura asociada a las antenas se muestra en la Figura 5.4.

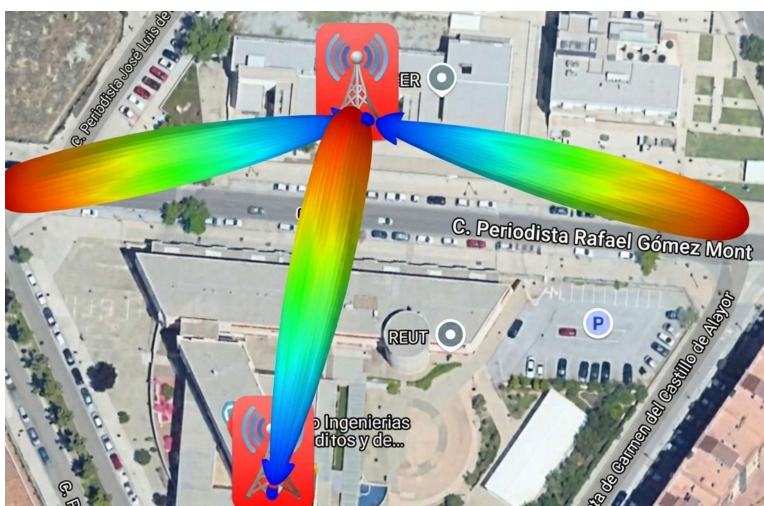


Figura 5.4: Representación de la cobertura proporcionada por las antenas de la red exterior.

Unidades radio AW2S RRH NEO

Las unidades AW2S RRH NEO [51] forman la parte radio activa del sistema. Su función es generar y recibir la señal radio asociada a cada sector, actuando como enlace entre el procesamiento de banda base y las antenas instaladas en el exterior. En el escenario considerado se emplean unidades AW2S RRH NEO para banda n77, con operación TDD y soporte para configuraciones MIMO de hasta 4x4.

Cada unidad radio remota se conecta a la antena correspondiente mediante sus puertos RF. A su vez, la comunicación con la parte de procesamiento se realiza mediante enlaces de fibra óptica. Esta separación permite ubicar las unidades radio próximas a las antenas, mientras que los servidores y las BBU permanecen en espacios interiores, donde resulta más sencillo garantizar alimentación, conectividad y condiciones de operación estables.

Desde el punto de vista de transmisión, la documentación técnica de las estaciones fijas indica una potencia máxima de salida en transmisión de 2 W por puerto, equivalente a 8 W cuando se utiliza una configuración MIMO 4x4. Este valor permite caracterizar la capacidad de transmisión de las unidades radio dentro del escenario desplegado.

La Figura 5.5 muestra la conexión física con una de las antenas de la red exterior.



Figura 5.5: Conexión física con una de las antenas de la red exterior.

BBU, servidores y tarjetas CPRI

El procesamiento de banda base se realiza mediante las BBU y los servidores asociados a las estaciones base. En estos equipos se ejecutan las funciones necesarias para operar las celdas 5G NR definidas en el escenario. La conexión entre los servidores y las unidades radio remotas se realiza mediante tarjetas AW2S PCIe to CPRI, que actúan como interfaz entre la parte de procesamiento y la parte radio.

El equipamiento de estación fija está compuesto por el *AMARISOFT gNodeB stack SW*, tarjetas AW2S PCIe to CPRI, unidades AW2S RRH NEO y el núcleo *AMARISOFT 5GCORE*. La plataforma soporta operación en modo TDD y distintos anchos de banda de canal, entre ellos 5, 10, 20, 40,

50 y 100 MHz, aunque en el escenario considerado se emplea una portadora de 50 MHz debido al espectro.

La Figura 5.6 muestra una conexión física entre el equipamiento de red y la BBU. Esta imagen permite relacionar la arquitectura lógica del despliegue con la instalación real, ya que muestra cómo se integra la infraestructura de transporte con el procesamiento de banda base.

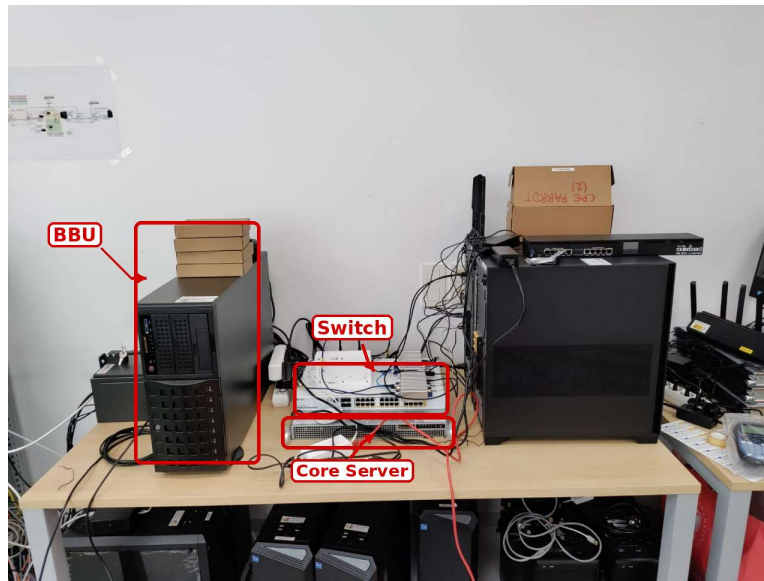


Figura 5.6: Conexión entre el *Switch* y la BBU.

Núcleo de red, encaminamiento y conmutación

El núcleo de red se ejecuta sobre el *Core Server* y proporciona las funciones necesarias para el registro de los usuarios, la gestión de sesiones y la conectividad de datos en modo 5G SA. Gracias a este núcleo, los terminales autorizados pueden acceder a la red privada y generar tráfico durante las pruebas.

El *Gateway Router* y el *Switch* completan la infraestructura de transporte. El primero permite encaminar el tráfico hacia los segmentos de red correspondientes, mientras que el segundo proporciona la interconexión física entre los distintos equipos. En conjunto, estos elementos permiten que el escenario funcione como una red 5G completa, con acceso radio, núcleo de red y conectividad extremo a extremo.

La Figura 5.7 muestra parte del equipamiento empleado para el núcleo y la infraestructura de transporte, incluyendo el *Gateway Router*, el *Switch* y el *Core Server*.

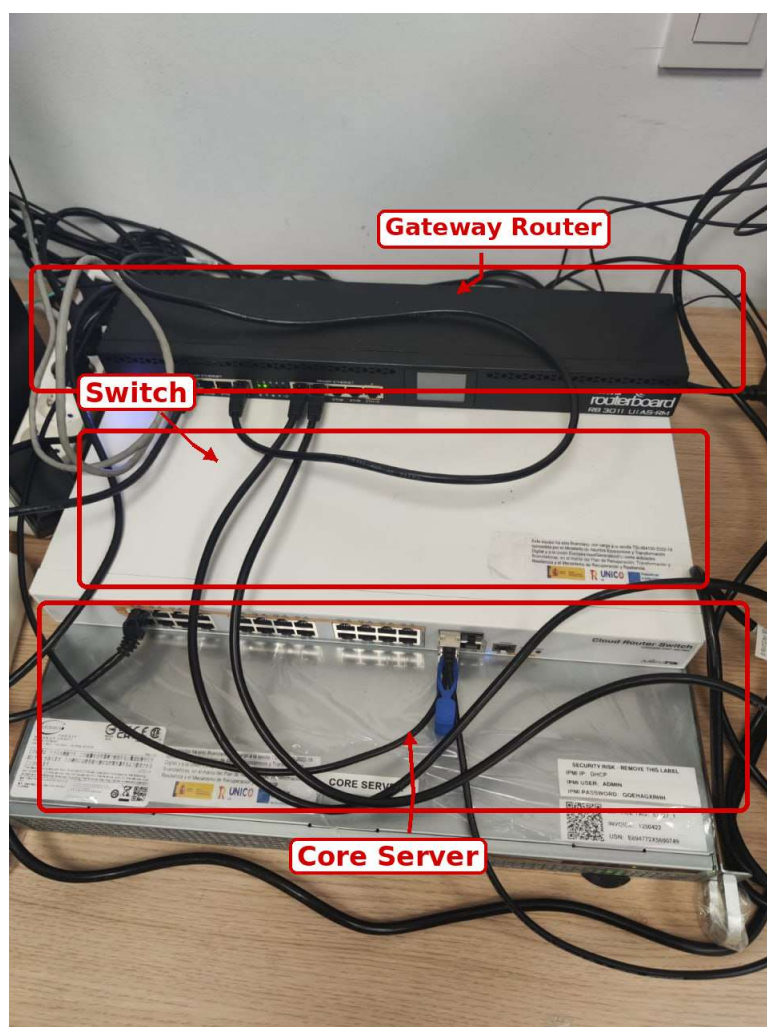


Figura 5.7: *Gateway Router, Switch y Core Server.*

Sincronización mediante antenas GPS

Las antenas GPS se emplean como elementos auxiliares de sincronización. Esta función es especialmente importante en redes TDD, donde transmisión y recepción utilizan la misma banda de frecuencia en intervalos temporales diferentes. Una referencia temporal adecuada contribuye a la correcta coordinación de las celdas y al funcionamiento estable del sistema durante las pruebas.

5.2.2. Dispositivos, USIMs y herramientas de medida

Para la evaluación experimental se emplean móviles que actúan como equipos de usuario reales y permiten observar el comportamiento de la red desde la perspectiva del terminal final. La aplicación *5G Scanner*, instalada en dichos dispositivos, se encarga de capturar las métricas radio disponibles mediante las interfaces proporcionadas por Android, asociarlas a la posición GPS y almacenarlas para su posterior análisis.

Aunque, la documentación del despliegue también contempla el uso de estaciones móviles o portátiles tipo CPE (*Customer Premises Equipment*), compuestas por un ordenador portátil y un módem 5G. En concreto, se recoge el módem Quectel RM500Q [52], compatible con 5G NR en banda n77, con sensibilidad de -86.0 dBm y antena externa 5G Quectel YECN009AA, cuya ganancia máxima es de 2.2 dBi.

Los terminales Android utilizados durante las pruebas se recogen en la Tabla 5.2. Ambos dispositivos permiten ejecutar la aplicación desarrollada y obtener medidas radio y de conectividad en el entorno de la red exterior.

Cuadro 5.2: Dispositivos Samsung utilizados durante las pruebas.

Terminal	Procesador	RAM	Almacenamiento
Samsung Galaxy A17 5G	Octa-Core	8 GB	256 GB
Samsung Galaxy S24	Samsung Exynos 2400 Deca-Core	8 GB	128 GB

El acceso a la red se restringe mediante USIMs programables previamente registradas en el núcleo de red. Esta limitación mantiene el carácter privado y experimental del despliegue, evitando que dispositivos no autorizados puedan conectarse a la red.

Además de los terminales móviles, el escenario se complementa con un servidor de pruebas accesible desde la red del usuario. Este servidor permite ejecutar pruebas de conectividad mediante *ping* e *iperf3*, empleadas para medir latencia, pérdida de paquetes y *throughput* extremo a extremo.

La aplicación también contempla una integración opcional con InfluxDB y Grafana. Cuando esta funcionalidad está habilitada, las medidas pueden enviarse a una base de datos temporal y visualizarse externamente en Grafana. No obstante, el almacenamiento local en CSV se mantiene como mecanismo principal de registro de resultados, de forma que la aplicación puede utilizarse aunque no exista conexión con la infraestructura externa de monitorización.

De forma resumida, la Tabla 5.3 recoge los principales dispositivos y

herramientas empleados durante la toma de medidas, indicando la función de cada uno dentro del escenario experimental.

Cuadro 5.3: Elementos utilizados para la toma de medidas.

Elemento	Descripción	Uso en el trabajo
Terminal Android	Teléfono comercial con conectividad 5G.	Captura de métricas radio, ubicación GPS y ejecución de pruebas activas.
USIM experimental	Tarjeta registrada en el núcleo de red.	Autenticación del terminal en la red privada 5G.
Servidor de pruebas	Equipo accesible desde la red del terminal.	Destino de las pruebas de <i>ping</i> e <i>iperf3</i> .
Aplicación <i>5G Scanner</i>	Aplicación Android desarrollada en este trabajo.	Registro, visualización y análisis de las medidas obtenidas.
InfluxDB/Grafana	Integración opcional para almacenamiento y visualización externa.	Apoyo al análisis temporal de las medidas cuando se habilita esta funcionalidad.

5.2.3. Recursos *software* de configuración y operación

Además del equipamiento físico, el despliegue requiere distintos recursos *software* para configurar, controlar y operar la red. El componente principal es Amarisoft, utilizado tanto para implementar las funciones de estación base 5G NR como las funciones del núcleo 5G SA. Su configuración se realiza mediante ficheros editables, donde se definen las celdas NR, los parámetros radio, las listas de celdas vecinas, los criterios de movilidad y otros aspectos de operación del escenario.

Otro aspecto importante es el uso de licencias AMARI NW 4000 para habilitar las funcionalidades necesarias de las estaciones base. Asimismo, la solución se plantea sobre una arquitectura compatible con especificaciones 3GPP actuales, incluyendo soporte de funcionalidades asociadas a Release 17. Esta capacidad resulta relevante para mantener la flexibilidad del escenario y permitir su actualización o adaptación a configuraciones futuras.

La Tabla 5.4 recoge los recursos *software* más relevantes.

Cuadro 5.4: Recursos *software* empleados en la red exterior.

Recurso <i>software</i>	Función principal
AMARISOFT gNodeB stack SW	Implementación de las funciones de estación base 5G NR.
AMARISOFT 5G <i>CORE</i>	Gestión de las funciones del núcleo de red 5G SA.
Licencias AMARI NW 4000	Habilitación de las funcionalidades necesarias para operar las estaciones base del escenario.
Licencia de soporte y actualizaciones	Mantenimiento software y soporte técnico durante el periodo contemplado.
Ficheros de configuración	Definición de parámetros radio, red, operación, vecindad y movilidad.
Interfaces de operación	Supervisión y control de los módulos de red durante la puesta en marcha y las pruebas.
Interfaces virtuales	Gestión del tráfico IP asociado a las sesiones de datos y a las pruebas de conectividad.

Para el desarrollo de la aplicación Android se ha utilizado Android Studio [30], junto con las APIs de Android asociadas a telefonía, localización, almacenamiento y conectividad. La representación cartográfica se apoya en la librería *osmdroid* [33], mientras que la integración de *iperf3* en Android se ha realizado tomando como referencia el repositorio *android-iperf3* [31].

5.3. Configuración del escenario experimental

Una vez descrita la arquitectura general del sistema y los elementos *hardware* utilizados en el despliegue, en esta sección se detalla la configuración concreta empleada para poner en funcionamiento el escenario experimental. El objetivo principal es disponer de una red 5G privada con varias celdas diferenciables por sus identificadores radio, de forma que sea posible realizar medidas de cobertura, observar cambios de celda y analizar eventos de movilidad mediante la aplicación Android *5G Scanner*.

Al estar el escenario formado por una estación base que proporciona dos celdas y por una segunda estación base que proporciona una tercera celda, el despliegue permite estudiar dos tipos de movilidad. Por un lado, permite analizar la movilidad entre sectores pertenecientes a una misma estación base. Por otro lado, permite estudiar la movilidad hacia una celda perteneciente a una estación base diferente. En términos de configuración, el cambio entre las dos celdas del gNB situado en CITIC se considera un *handover* intra-gNB, mientras que el cambio hacia la celda del gNB situado

en ETSIIT corresponde a un *handover* inter-gNB.

5.3.1. Visión general del despliegue

La red desplegada utiliza un núcleo Amarisoft 5GC al que se conectan las estaciones base mediante la interfaz correspondiente. El núcleo se ejecuta en el equipo identificado como **core**, mientras que las estaciones base aparecen como gNB1 y gNB2. El núcleo mantiene las funciones de control de acceso, registro de usuarios, asignación de sesión de datos y conexión con los gNB.

La Tabla 5.5 resume los nodos principales del escenario.

Cuadro 5.5: Resumen de nodos configurados en el escenario Amarisoft.

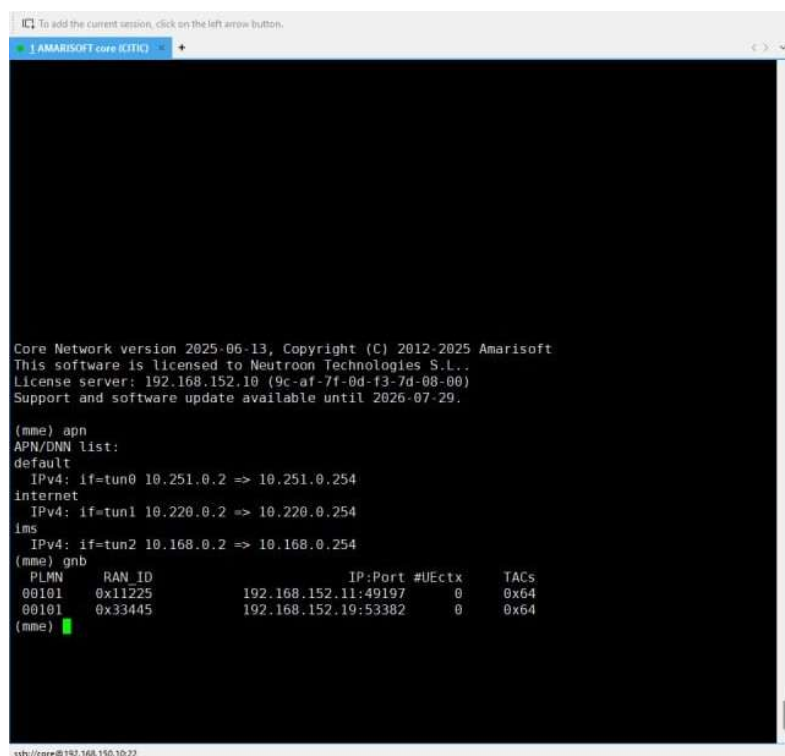
Nodo	Configuración observada
Core Amarisoft	Núcleo 5G encargado de las funciones de AMF y gestión de sesiones. Se usa el <i>PLMN id</i> 00101. El servidor AMF está asociado al dominio amarisoft.amf.5gc.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org . La dirección de acceso SSH es 192.168.150.10 , con puerto 22. La interfaz del AMF se encuentra en la IP 192.168.152.10 , con puerto 38412.
gNB1 (CITIC)	Estación base situada en el CITIC. Se identifica con gNB ID 0x11225 y <i>PLMN id</i> 00101. En el <i>core</i> , la gNB aparece con IP 192.168.152.11 , puerto observado 49197 y <i>Tracking Area Code (TAC)</i> 100. Proporciona dos celdas NR, identificadas como 0x001 y 0x002 .
gNB2 (ETSIIT)	Estación base situada en la ETSIIT. Se identifica con gNB ID 0x33445 y <i>PLMN id</i> 00101. En el <i>core</i> , la gNB aparece con IP 192.168.152.19 , puerto observado 53382 y <i>Tracking Area Code TAC</i> . Se observa la dirección de acceso SSH 192.168.150.12 , con puerto 22. Proporciona una celda NR, identificada como 0x003 .

En el núcleo también se configuran varias redes de datos o DNN, asociadas a interfaces tipo túnel. La DNN utilizada por el terminal durante las pruebas mostradas en consola es **internet**. La Tabla 5.6 recoge las DNN visibles en la captura de configuración del *core*.

Cuadro 5.6: DNN/APN observados en la consola del núcleo Amarisoft.

DNN/APN	Configuración observada
default	Asociada a la interfaz <code>if-tun0</code> , con rango desde 10.251.0.2 hasta 10.251.0.254.
internet	Asociada a la interfaz <code>if-tun1</code> . La dirección 10.220.0.1 corresponde a la interfaz del <i>core</i> para esta red de datos. El rango mostrado para los terminales va desde 10.220.0.2 hasta 10.220.0.254. En las pruebas de conectividad, el servidor <code>iperf3</code> se ejecutó sobre 10.220.0.1 y el UE se conectó desde una dirección del mismo rango, 10.220.0.2.
ims	Asociada a la interfaz <code>if-tun2</code> , con rango mostrado desde 10.168.0.2 hasta 10.168.0.254.

La Figura 5.8 muestra la consola del núcleo 5G, donde se observa la lista de APN/DNN configurados y los dos gNB conectados al *core*. Esta comprobación permite validar que el núcleo está operativo y que las estaciones base han establecido correctamente la conexión con el AMF.



```

To add the current session, click on the left arrow button.
1 AMARISOFT core (CITIC)

Core Network version 2025-06-13, Copyright (C) 2012-2025 Amarisoft
This software is licensed to Neutroon Technologies S.L.
License server: 192.168.152.10 (9c-af-7f-0d-f3-7d-08-00)
Support and software update available until 2026-07-29.

(mme) apn
APN/DNN list:
default
  IPv4: if=tun0 10.251.0.2 => 10.251.0.254
internet
  IPv4: if=tun1 10.220.0.2 => 10.220.0.254
ims
  IPv4: if=tun2 10.168.0.2 => 10.168.0.254
(mme) gnb
  PLMN   RAN_ID      IP:Port #UEctx  TACs
  00101  0x11225      192.168.152.11:49197  0    0x64
  00101  0x33445      192.168.152.19:53382  0    0x64
(mme)

```

Figura 5.8: Consola del núcleo Amarisoft con la lista de DNN/APN configurados y los gNB conectados al *core*.

Desde el punto de vista funcional, cada gNB actúa como punto de acceso radio de la red 5G. La parte de procesamiento de banda base se ejecuta en la estación Amarisoft, mientras que los puertos RF se asocian a los elementos radio y a las antenas utilizados para radiar cada celda. En el caso de gNB1 se configuran dos puertos RF, uno por cada celda, lo que permite disponer de dos sectores diferenciados en el emplazamiento de CITIC. El gNB2 configura una única celda asociada a su puerto RF principal.

5.3.2. Configuración radio de las celdas NR

Las tres celdas del escenario se han configurado en 5G NR, banda n77, con frecuencia central de 3900 MHz. En los ficheros de configuración se utiliza el valor `dl_nr_arfcn = 660000`, que es equivalente a 3900 MHz. El ancho de banda configurado es de 50 MHz y el espaciado entre subportadoras es de 30 kHz. Además, las celdas utilizan modo TDD, con un patrón de trama definido mediante el campo `tdd_ul_dl_config`.

La Tabla 5.7 resume los identificadores principales de las celdas NR configuradas en cada gNB. Por su parte, la Tabla 5.8 recoge los parámetros radio

más relevantes, incluyendo banda, frecuencia, ancho de banda, espaciado entre subportadoras, modo dúplex y configuración MIMO.

Cuadro 5.7: Identificadores de las celdas NR configuradas en las gNB.

gNB	Cell ID	RAT	PCI	TAC	PLMN
gNB1 (CITIC)	0x001	NR	1	100	00101
gNB1 (CITIC)	0x002	NR	2	100	00101
gNB2 (ETSIIT)	0x003	NR	3	100	00101

Cuadro 5.8: Parámetros radio principales de las celdas NR configuradas en el escenario Amarisoft.

Parámetro	Cell 1 – gNB1	Cell 2 – gNB1	Cell 3 – gNB2
Banda NR	n77	n77	n77
DL NR-ARFCN	660000	660000	660000
Frecuencia central	3900 MHz	3900 MHz	3900 MHz
Ancho de banda	50 MHz	50 MHz	50 MHz
Espaciado entre subportadoras	30 kHz	30 kHz	30 kHz
Modo dúplex	TDD	TDD	TDD
Antenas en transmisión	n_antenna_dl = 4	n_antenna_dl = 4	n_antenna_dl = 2
Antenas en recepción	n_antenna_ul = 4	n_antenna_ul = 4	n_antenna_ul = 2
Configuración MIMO	4x4	4x4	2x2

Además de los identificadores anteriores, en la configuración se fija el campo `ssb_pos_bitmap` a 10000000, lo que indica la posición de transmisión del bloque SS/PBCH dentro del conjunto configurado. Este parámetro es relevante para la detección inicial de la celda por parte del terminal y, por tanto, para que la aplicación *5G Scanner* pueda asociar correctamente las medidas al PCI detectado.

En cuanto al número de antenas configuradas, las dos celdas del gNB1 aparecen con cuatro antenas en transmisión y cuatro antenas en recepción, es decir, una configuración MIMO 4x4. En el fichero del gNB2, la celda 3 aparece configurada con dos antenas en transmisión y dos en recepción. Por tanto, el MIMO 4x4 queda confirmado para las dos celdas del gNB1, mientras que la celda del gNB2 figura como MIMO 2x2.

El siguiente fragmento muestra los campos más relevantes de la configuración radio del gNB1.

```
band: 77,  
dl_nr_arfcn: 660000, /* 3900.00 MHz */  
subcarrier_spacing: 30, /* kHz */  
ssb_pos_bitmap: "10000000",  
  
bandwidth: 50,  
n_antenna_dl: 4,  
n_antenna_ul: 4,  
  
tdd_ul_dl_config: {  
    pattern1: {  
        period: 5, /* in ms */  
        dl_slots: 7,  
        dl_symbols: 6,  
        ul_slots: 2,  
        ul_symbols: 4  
    }  
},
```

Para el gNB2 se mantiene la misma banda, frecuencia central y anchura de canal, aunque el fichero de configuración muestra una configuración de antenas diferente:

```
band: 77,  
dl_nr_arfcn: 660000,  
subcarrier_spacing: 30,  
ssb_pos_bitmap: "10000000",  
  
bandwidth: 50, /* MHz */  
n_antenna_dl: 2,  
n_antenna_ul: 2,  
  
tdd_ul_dl_config: {  
    pattern1: {  
        period: 5, /* in ms */  
        dl_slots: 7,  
        dl_symbols: 2,  
        ul_slots: 2,  
        ul_symbols: 2  
    }  
},
```

Además, la interfaz de Amarisoft permite comprobar que los transmisores y receptores están operativos. En la captura correspondiente al estado

TRX se observa que todos los canales TX/RX se encuentran a una frecuencia de 3900 MHz, con potencia absoluta de transmisión de 39 dBm en los canales TX mostrados y ganancia de recepción de 0 dB.

```

1 AMARISOFT gNB1 (CTTC) 2 AMARISOFT gNB2 (ETSIT)
TRX API version 15
Chan Port Gain(dB) Freq(MHz)
TX0 0 0.0 3900.000000
TX1 0 0.0 3900.000000
TX2 0 0.0 3900.000000
TX3 0 0.0 3900.000000
TX4 1 0.0 3900.000000
TX5 1 0.0 3900.000000
TX6 1 0.0 3900.000000
TX7 1 0.0 3900.000000
RX0 0 0.0 3900.000000
RX1 0 0.0 3900.000000
RX2 0 0.0 3900.000000
RX3 0 0.0 3900.000000
RX4 1 0.0 3900.000000
RX5 1 0.0 3900.000000
RX6 1 0.0 3900.000000
RX7 1 0.0 3900.000000
C&M state: Connected

(enb) abs_tx_power
Chan Port Abs TX Power(dB)
TX0 0 39.0
TX1 0 39.0
TX2 0 39.0
TX3 0 39.0
TX4 1 39.0
TX5 1 39.0
TX6 1 39.0
TX7 1 39.0

(enb) rx_gain
Chan Port Gain(dB)
RX0 0 0.0
RX1 0 0.0
RX2 0 0.0
RX3 0 0.0
RX4 1 0.0
RX5 1 0.0
RX6 1 0.0
RX7 1 0.0

(enb)
ugr:root
  
```

Figura 5.9: Comprobación en consola de los canales TRX de la estación base Amarisoft.

5.3.3. Limitación de potencia radiada aparente

La potencia efectiva de transmisión del despliegue se encuentra limitada por la autorización temporal de uso del dominio público radioeléctrico, que establece una Potencia Radiada Aparente (PRA) máxima de 20 W para las estaciones base. Este valor equivale a:

$$PRA_{\text{máx}}(\text{dBm}) = 10 \log_{10}(20 \cdot 10^3) = 43.01 \text{ dBm} \quad (5.1)$$

La PRA se obtiene a partir de la potencia conducida de transmisión, las pérdidas entre transmisor y antena y la ganancia del sistema radiante. Se calcula mediante:

$$PRA(\text{dBm}) = P_{TX, \text{total}}(\text{dBm}) - L_{TX-A}(\text{dB}) + G_{Ant}(\text{dBi}) - 2.15(\text{dB}) \quad (5.2)$$

donde $(P_{TX,total})$ es la potencia conducida total transmitida por la celda, (L_{TX-A}) representa las pérdidas entre transmisor y antena, (G_{Ant}) a ganancia de antena, y el término 2.15 dB permite expresar dicha ganancia respecto a un dipolo, al tratarse de Potencia Radiada Aparente.

Las antenas empleadas en el despliegue son antenas directivas Alpha Wireless AW3923-T0-F, con una ganancia nominal de 17.5 dBi. Además, se consideran unas pérdidas entre transmisor y antena de 0.1 dB, al existir una conexión directa entre el frontal radio y la antena.

Aunque las unidades radio permiten una potencia máxima de salida de 2 W por puerto, equivalente a 8 W de potencia conducida total en una configuración MIMO 4x4, la configuración de potencia debe ajustarse para cumplir la limitación de PRA establecida en la autorización. A partir de los ficheros de configuración se observa que la gNB1 contiene dos celdas, celda 1 y celda 2, configuradas con dos puertos de transmisión, mientras que la gNB2 corresponde a la celda 3, también con dos puertos de transmisión.

Para cumplir el límite de 20 W PRA con una ganancia de antena de 17.5 dBi y unas pérdidas de 0.1 dB, la potencia conducida total máxima por celda debe ser:

$$P_{TX,total,m\acute{a}x} = PRA_{m\acute{a}x} + L_{TX-A} - G_{Ant} + 2.15 \quad (5.3)$$

Sustituyendo los valores anteriores:

$$P_{TX,total,m\acute{a}x} = 43.01 + 0.1 - 17.5 + 2.15 = 27.76 \text{ dBm} \quad (5.4)$$

lo que equivale aproximadamente a:

$$P_{TX,total,m\acute{a}x} = 10^{\frac{27.76-30}{10}} = 0.597 \text{ W} \quad (5.5)$$

En las configuraciones consideradas, cada celda emplea dos puertos de transmisión activos. Suponiendo un reparto uniforme de potencia entre ambos puertos, la potencia máxima por puerto debe ser:

$$P_{TX,puerto,m\acute{a}x} = P_{TX,total,m\acute{a}x} - 10 \log_{10}(2) \quad (5.6)$$

$$P_{TX,puerto,m\acute{a}x} = 27.76 - 10 \log_{10}(2) = 24.75 \text{ dBm} \quad (5.7)$$

equivalente aproximadamente a:

$$P_{TX,puerto,m\acute{a}x} = 10^{\frac{24.75-30}{10}} = 0.298 \text{ W} \quad (5.8)$$

es decir, aproximadamente 298 mW por puerto de transmisión.

Por tanto, para garantizar el cumplimiento de la limitación de 20 W PRA con una ganancia de antena de 17.5 dBi y unas pérdidas de 0.1 dB, las estaciones base deben configurarse con una potencia máxima aproximada de 24.75 dBm por puerto cuando se empleen dos puertos de transmisión activos por celda.

Este ajuste de potencia debe tenerse en cuenta en la planificación radio del despliegue, ya que modifica las zonas relativas de cobertura de las celdas y, en consecuencia, puede desplazar los puntos en los que se producen los trasposos o *handovers* entre estaciones base.

5.3.4. Configuración de red y conexión con el núcleo 5G

La conexión entre las estaciones base y el núcleo se realiza contra el servidor AMF mostrado en las consolas de los gNB:

```
server=192.168.152.10:38412
state=setup_done
name=amarisoft.amf.5gc.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org
```

El estado `setup_done` indica que el procedimiento NG Setup se ha completado correctamente entre cada gNB y el núcleo. En la pantalla del *core* se observa la lista de gNB conectados, donde aparecen los identificadores 0x11225 y 0x33445, correspondientes respectivamente a gNB1 y gNB2. Ambos anuncian el PLMN 00101 y el TAC 0x64.

La Figura 5.10 muestra la salida de las consolas de gNB1 y gNB2. En ella se observa que gNB1 anuncia dos celdas NR con PCI 1 y PCI 2, mientras que gNB2 anuncia una celda NR con PCI 3. Esta separación de PCIs es fundamental para las pruebas realizadas, ya que permite distinguir de forma directa el sector servidor en cada punto de medida y detectar los cambios de celda en los registros de Android.

```

1 AMARISOFT gNB1 (CITIC)
[CELL1_TX2] operational
[CELL1_TX3] operational
[CELL1_RX0] operational
[CELL1_RX1] operational
[CELL1_RX2] operational
[CELL1_RX3] operational

(enb) ng
gNB NG connection state:
- server=192.168.152.10:38412 state=setup_done name=amarisoft.amf.5gc.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org P
(enb) cell
[gnb0011225] PLMN=00101 gNB_ID=0x11225
Cell RAT BAND TAC dl_arfcn pci prach_seq dl_gain ul_dis plmn
0x001 NR n77 0x000064 660000 1 1 0.0 N 00101
0x002 NR n77 0x000064 660000 2 1 0.0 N 00101
(enb) ng
gNB NG connection state:
- server=192.168.152.10:38412 state=setup_done name=amarisoft.amf.5gc.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org P
(enb)
ugr:root ]] 0*6$1teenb 12/06/26 9:34

1 AMARISOFT gNB2 (ETSIT)
[SYNC] No GNRMC fix found in ttySwallowGps0 yet...
[SYNC] GNRMC message found !
[SYNC] Date from Swallow GPS receiver : Fri Oct 27 07:36:42 2006

[SYNC] Seconds elapsed since 1970: 1161949039
[SYNC] Swallow FW do not support PPS Data Sync. n(enb) [CELL0_TX0] operational
[CELL0_TX1] operational
[CELL0_RX0] operational
[CELL0_RX1] operational

(enb) ng
gNB NG connection state:
- server=192.168.152.10:38412 state=setup_done name=amarisoft.amf.5gc.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org P
LMN=00101
(enb) cell
[gnb0033445] PLMN=00101 gNB_ID=0x33445
Cell RAT BAND TAC dl_arfcn pci prach_seq dl_gain ul_dis plmn
0x003 NR n77 0x000064 660000 3 1 0.0 N 00101
(enb)
ugr:root ]] 0*$1teenb 12/06/26 3:37

```

Figura 5.10: Terminales de las estaciones base gNB1 y gNB2. Se observa el estado `setup_done` en la conexión NG con el AMF y el listado de celdas NR configuradas en cada estación base.

5.3.5. Configuración de movilidad y *handover*

El escenario se ha configurado para permitir movilidad entre las tres celdas NR. Para ello, cada celda incluye una lista de celdas vecinas mediante el campo `ncell_list`. En el gNB1, la celda 1 incluye como vecinas la celda 2 del mismo gNB y la celda 3 del gNB2. De forma simétrica, la celda 2 incluye como vecinas la celda 1 y la celda 3. En el gNB2, la celda 3 incluye como vecinas las dos celdas del gNB1.

La Tabla 5.9 resume la relación entre celdas servidoras y celdas vecinas.

Cuadro 5.9: Configuración de celdas vecinas para movilidad.

Celda servidora	Vecindad y tipo de movilidad esperado
Cell 1 – gNB1	Tiene configuradas como vecinas Cell 2 – gNB1 y Cell 3 – gNB2. La movilidad esperada es <i>handover</i> intra-gNB hacia Cell 2 y <i>handover</i> inter-gNB hacia Cell 3.
Cell 2 – gNB1	Tiene configuradas como vecinas Cell 1 – gNB1 y Cell 3 – gNB2. La movilidad esperada es <i>handover</i> intra-gNB hacia Cell 1 y <i>handover</i> inter-gNB hacia Cell 3.
Cell 3 – gNB2	Tiene configuradas como vecinas Cell 1 – gNB1 y Cell 2 – gNB1. La movilidad esperada es <i>handover</i> inter-gNB hacia las celdas del emplazamiento de CITIC.

La ejecución del *handover* se activa mediante el parámetro `ho_from_meas`, lo que indica que la decisión de movilidad se basa en medidas radio reportadas por el terminal. En los tres casos se configura una descripción de medidas basada en eventos A1, A2 y A3 sobre RSRP. El evento A3, con `a3_offset = 6`, es especialmente relevante para el cambio de celda, ya que permite comparar la calidad de la celda vecina respecto a la celda servidora. La Tabla 5.10 recoge los umbrales configurados.

Cuadro 5.10: Parámetros de medida configurados para movilidad.

Evento de medida	Configuración
A1	Medida basada en RSRP, con umbral <code>-60</code> , histéresis <code>10</code> y <i>time-to-trigger</i> de <code>100</code> ms. Este evento indica que la celda servidora presenta una calidad radio suficientemente buena, por lo que el terminal puede mantenerse conectado a ella sin necesidad de iniciar movilidad.
A2	Medida basada en RSRP, con umbral <code>-70</code> , histéresis <code>0</code> y <i>time-to-trigger</i> de <code>100</code> ms. Este evento indica que la calidad de la celda servidora ha descendido por debajo del umbral configurado, por lo que se considera necesario evaluar posibles celdas vecinas para movilidad.
A3	Medida basada en RSRP, con <i>offset</i> <code>6</code> , histéresis <code>0</code> y <i>time-to-trigger</i> de <code>100</code> ms. Este evento se utiliza para comparar la celda vecina con la celda servidora y favorecer el cambio de celda cuando la vecina presenta mejores condiciones radio.

El fragmento siguiente muestra la parte de configuración asociada a la activación del *handover* por medidas y a los eventos de medida:

```
ho_from_meas: true,

meas_config_desc: {
  a1_report_type: "rsrp",
  a1_rsrp: -60,
  a1_hysteresis: 10,
  a1_time_to_trigger: 100,

  a2_report_type: "rsrp",
  a2_rsrp: -70,
  a2_hysteresis: 0,
  a2_time_to_trigger: 100,

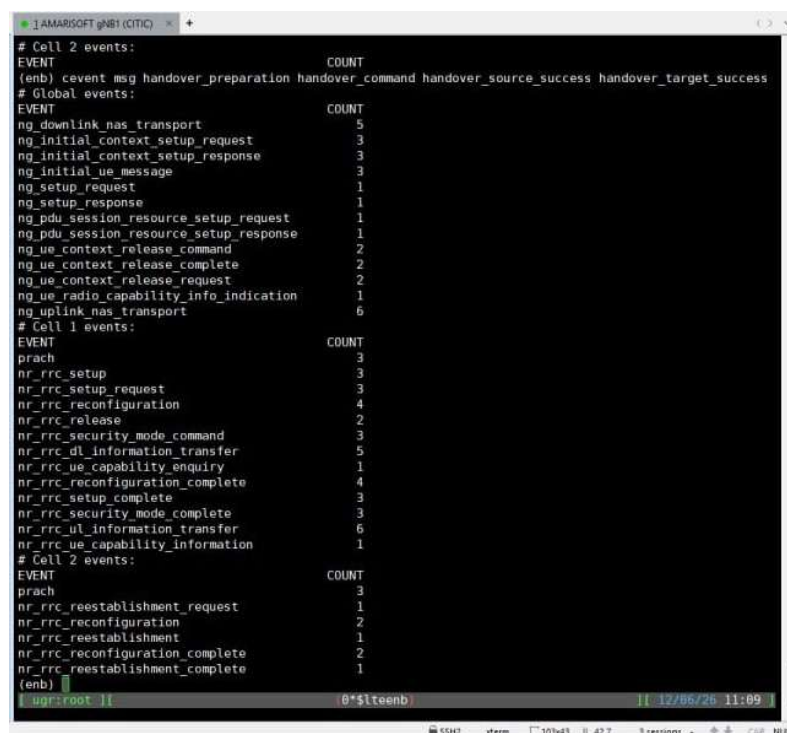
  a3_report_type: "rsrp",
  a3_offset: 6,
  a3_hysteresis: 0,
  a3_time_to_trigger: 100
},

meas_gap_config: {
  pattern_id: 0
}
```

Para comprobar los eventos de movilidad se utilizan los comandos de consola de Amarisoft `cevent`. En particular, se consultaron tanto los mensajes de *handover* como los posibles errores asociados:

```
cevent msg handover_preparation handover_command
handover_source_success handover_target_success

cevent error handover_command_drops handover_preparation_errors
handover_intra_enb_failure
```



```

1-AMARIS/soft/gNB1 (CITIC)
# Cell 2 events:
EVENT                                COUNT
(enb) event msg handover_preparation handover_command handover_source_success handover_target_success
# Global events:
EVENT                                COUNT
ng_downlink_nas_transport            5
ng_initial_context_setup_request     3
ng_initial_context_setup_response    3
ng_initial_ue_message                3
ng_setup_request                     1
ng_setup_response                    1
ng_pdu_session_resource_setup_request 1
ng_pdu_session_resource_setup_response 1
ng_ue_context_release_command        2
ng_ue_context_release_complete       2
ng_ue_context_release_request        2
ng_ue_radio_capability_info_indication 1
ng_uplink_nas_transport              6
# Cell 1 events:
EVENT                                COUNT
prach                                3
nr_rrc_setup                         3
nr_rrc_setup_request                 3
nr_rrc_reconfiguration               4
nr_rrc_release                       2
nr_rrc_security_mode_command         3
nr_rrc_dl_information_transfer       5
nr_rrc_ue_capability_enquiry         1
nr_rrc_reconfiguration_complete      4
nr_rrc_setup_complete                3
nr_rrc_security_mode_complete        3
nr_rrc_ul_information_transfer       6
nr_rrc_ue_capability_information     1
# Cell 2 events:
EVENT                                COUNT
prach                                3
nr_rrc_reestablishment_request       1
nr_rrc_reconfiguration               2
nr_rrc_reestablishment               1
nr_rrc_reconfiguration_complete      2
nr_rrc_reestablishment_complete      1
(enb)
lgr:root ]]
0*${teeb}
11/12/26/26 11:09
55Hz xterm 102x43 42.7 3 sessions CAP NUM

```

Figura 5.11: Consulta de eventos de *handover* en gNB1 mediante el comando `event`. La salida permite comprobar los mensajes asociados al procedimiento de movilidad entre las celdas del escenario.

```

To add the current session, click on the left arrow button.
1 AMARISOFT core (CITIC) 2 AMARISOFT gNB2 (RFSH)
Rx burst order: 3, available bandwidth: 53767 Mb/s
[SYNC][SWALLOWB] GPS is synchronized
[SYNC] Reading GPS Time from NMEA stream...
[CM] connected
[SYNC] No GNSS fix found in ttySwallowGps0 yet...
[SYNC] No GNSS fix found in ttySwallowGps0 yet...
[SYNC] No GNSS fix found in ttySwallowGps0 yet...
[SYNC] No GNSS fix found in ttySwallowGps0 yet...
[SYNC] No GNSS fix found in ttySwallowGps0 yet...
[CELL0 TX0] operational
[CELL0 TX1] operational
[CELL0 RX0] operational
[CELL0 RX1] operational
[SYNC] No GNSS fix found in ttySwallowGps0 yet...
[SYNC] No GNSS fix found in ttySwallowGps0 yet...
[SYNC] No GNSS fix found in ttySwallowGps0 yet...
[SYNC][SWALLOWB] Couldn't get time from NMEA, using system time instead
[SYNC] System time: seconds elapsed since 1970: 1781253913
[SYNC] No GPS sync found. Using system time.
[SYNC] System time: seconds elapsed since 1970: 1781253913
[SYNC] Swallow FW do not support PPS Data Sync. n(enb)
(enb) ng
gNB NG connection state:
- server=192.168.152.10:38412 state=setup_done name=amarisoft.amf.5gc.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org P
LMN=00101
(enb) cell
[gnb0033445] PLMN=00101 gNB_ID=0x33445
Cell RAT BAND TAC dl_arfcn pci prach_seq dl_gain ul_dis plmn
0x003 NR n77 0x000064 660000 3 1 0.0 N 00101
(enb) cevent msg handover_preparation handover_command handover_source_success handover_target_success
# Global events:
EVENT COUNT
ng_setup_request 1
ng_setup_response 1
# Cell 3 events:
EVENT COUNT
(enb) cevent error handover_command_drops handover_preparation_errors handover_intra_enb_failure
# Global events:
EVENT COUNT
# Cell 3 events:
EVENT COUNT
(enb)
[shu@gnb2 ~]$

```

Figura 5.12: Consulta de eventos y errores de movilidad en gNB2. En la captura no se observan errores de *handover* asociados a la celda del segundo gNB.

5.3.6. Configuración de acceso de usuarios mediante USIM

El acceso de usuarios a la red se realiza mediante USIMs configuradas en el núcleo Amarisoft. Estas USIMs se asocian al PLMN 00101 y utilizan parámetros de autenticación definidos en la configuración del *core*. La autenticación se basa en el algoritmo *milennage*, junto con los valores de clave KI/K, OPC, AMF y SQN configurados para los usuarios. La Tabla 5.11 resume los parámetros USIM utilizados en la red Amarisoft.

Cuadro 5.11: Parámetros de configuración USIM utilizados en la red Amarisoft.

Campo	Valor observado/configurado
MCC	001
MNC	01
PLMN	00101
Algoritmo de autenticación	milennage
OPC	000102030405060708090A0B0C0D0E0F
KI/K	00112233445566778899AABBCCDDEEFF
AMF	0x9001
SQN inicial	000000000000
Formato del IMSI/SUPI	MCC + MNC + MSIN
IMSI configurados	001010000000001 – 001010000000010

Los valores temporales de identidad, como M-TMSI/5G-TMSI, no se consideran parámetros fijos de configuración, ya que pueden cambiar entre registros o sesiones. Por ello, no se incluyen como identificadores permanentes de la red.

Las tarjetas USIM empleadas en el escenario experimental fueron programadas mediante la herramienta *pySim*, un conjunto de utilidades desarrollado en Python para la lectura, escritura y gestión de tarjetas SIM, UICC, USIM e ISIM [53]. A través de esta herramienta se introdujeron en las tarjetas los parámetros de abonado necesarios para el acceso a la red privada, como el IMSI/SUPI, las claves de autenticación y los identificadores asociados al PLMN. Estos valores deben coincidir con los definidos en el núcleo Amarisoft para que el terminal pueda registrarse correctamente en la red.

5.3.7. Puesta en marcha y monitorización del escenario

La puesta en marcha del escenario se realiza reiniciando los servicios Amarisoft tanto en el *core* como en las estaciones base. Para el núcleo se usa el servicio `core.amarisoft.service`, mientras que en las estaciones base se emplea `radio.amarisoft.service`. Tras el reinicio, la monitorización se lleva a cabo mediante sesiones `screen`, que permiten acceder a las consolas interactivas de Amarisoft.

En el *core*, los comandos son:

```
sudo systemctl restart core.amarisoft.service
```



```
sudo screen -x ltemme
```

En cada estación base, los comandos son:

```
sudo systemctl restart radio_amarisoft.service  
sudo screen -x lteenb
```

La secuencia de comprobación se realiza de forma ordenada. En primer lugar, se reinicia el servicio del núcleo y se verifica desde *ltemme* que el *core* está operativo. A continuación, se reinicia el servicio radio en las estaciones base y se comprueba desde *lteenb* que cada gNB alcanza el estado *setup_done* frente al AMF. Finalmente, se verifica en el *core* que los gNB están registrados y que las celdas NR aparecen anunciadas con sus correspondientes PCIs y TACs.

Una vez completada esta comprobación, se procede al registro del terminal. La consola del *core* permite verificar que la USIM está autorizada y que el UE se registra correctamente en la red 5G configurada. Esta verificación es importante antes de iniciar las pruebas con *5G Scanner*, ya que garantiza que las medidas se realizan sobre la red privada configurada y no sobre otra red disponible en el terminal.

Además, durante el funcionamiento del escenario se monitorizan los contadores de eventos de las estaciones base. Esta información permite comprobar que la red está configurada correctamente y que cursa señalización real procedente de los terminales conectados. Las Figuras 5.13 y 5.14 muestran ejemplos de contadores de eventos NR observados durante la operación del escenario.

```

1AMARISOFT gNB1 (CITIC)
nr_rrc_ue_capability_information 1
# Cell 2 events:
EVENT COUNT
(enb) cevent msg handover_preparation handover_command handover_source_success handover_target_success
# Global events:
EVENT COUNT
ng_downlink_nas_transport 1
ng_initial_context_setup_request 8
ng_initial_context_setup_response 8
ng_initial_ue_message 9
ng_setup_request 1
ng_setup_response 1
ng_ue_context_release_command 8
ng_ue_context_release_complete 8
ng_ue_context_release_request 7
ng_ue_radio_capability_info_indication 1
ng_uplink_nas_transport 1
# Cell 1 events:
EVENT COUNT
prach 9
nr_rrc_setup 9
nr_rrc_setup_request 9
nr_rrc_reconfiguration 16
nr_rrc_release 8
nr_rrc_security_mode_command 8
nr_rrc_dl_information_transfer 1
nr_rrc_ue_capability_enquiry 1
nr_rrc_measurement_report 8
nr_rrc_reconfiguration_complete 16
nr_rrc_setup_complete 9
nr_rrc_security_mode_complete 8
nr_rrc_ul_information_transfer 1
nr_rrc_ue_capability_information 1
# Cell 2 events:
EVENT COUNT
(enb)

```

Figura 5.13: Monitorización de eventos NR en gNB1 durante la operación del escenario.

```

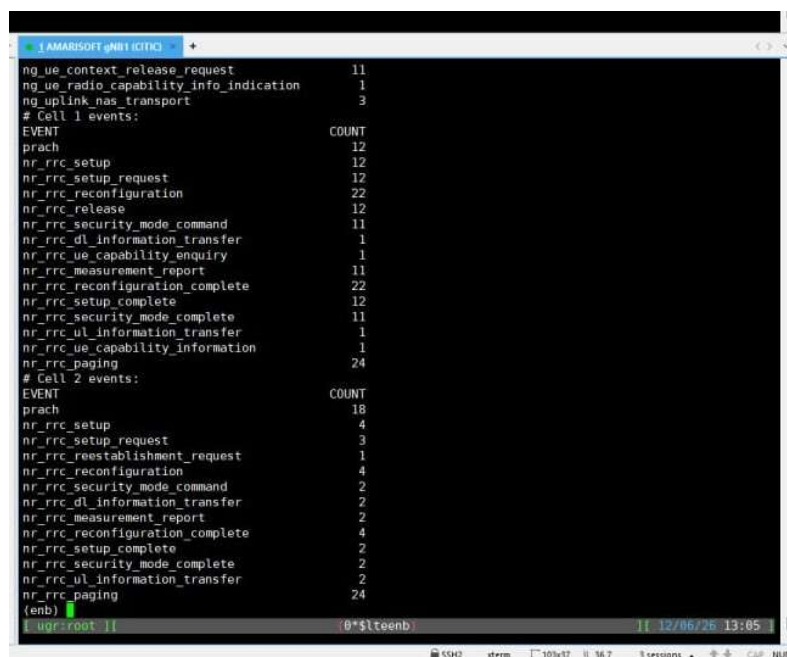
1AMARISOFT gNB2 (ETSIT)
(enb) cevent msg handover_preparation handover_command handover_source_success handover_target_success
# Global events:
EVENT COUNT
ng_downlink_nas_transport 3
ng_initial_context_setup_request 3
ng_initial_context_setup_response 3
ng_initial_ue_message 5
ng_setup_request 1
ng_setup_response 1
ng_paging 136
ng_ue_context_release_command 5
ng_ue_context_release_complete 5
ng_ue_context_release_request 3
ng_ue_radio_capability_info_indication 2
ng_uplink_nas_transport 3
# Cell 3 events:
EVENT COUNT
prach 149
nr_rrc_setup 14
nr_rrc_setup_request 12
nr_rrc_reestablishment_request 3
nr_rrc_reconfiguration 9
nr_rrc_release 3
nr_rrc_reestablishment 1
nr_rrc_security_mode_command 3
nr_rrc_dl_information_transfer 3
nr_rrc_ue_capability_enquiry 2
nr_rrc_measurement_report 4
nr_rrc_reconfiguration_complete 9
nr_rrc_setup_complete 5
nr_rrc_reestablishment_complete 1
nr_rrc_security_mode_complete 3
nr_rrc_ul_information_transfer 3
nr_rrc_ue_capability_information 2
nr_rrc_paging 126
(enb)

```

Figura 5.14: Monitorización de eventos NR en gNB2 durante la operación del escenario.

Las Figuras 5.15 y 5.16 muestran una monitorización posterior de los

contadores de eventos NR. En ellas se aprecia que la red continúa cursando señalización y que los contadores asociados a procedimientos RRC y NG aumentan durante la operación del escenario.



```
ng_ue_context_release_request      11
ng_ue_radio_capability_info_indication  1
ng_uplink_nas_transport            3
# Cell 1 events:
EVENT                                COUNT
prach                                12
nr_rrc_setup                         12
nr_rrc_setup_request                 12
nr_rrc_reconfiguration               22
nr_rrc_release                       12
nr_rrc_security_mode_command         11
nr_rrc_dl_information_transfer        1
nr_rrc_ue_capability_enquiry          1
nr_rrc_measurement_report             11
nr_rrc_reconfiguration_complete       22
nr_rrc_setup_complete                12
nr_rrc_security_mode_complete         11
nr_rrc_ul_information_transfer         1
nr_rrc_ue_capability_information       1
nr_rrc_paging                         24
# Cell 2 events:
EVENT                                COUNT
prach                                18
nr_rrc_setup                         4
nr_rrc_setup_request                 3
nr_rrc_reestablishment_request        1
nr_rrc_reconfiguration                4
nr_rrc_security_mode_command           2
nr_rrc_dl_information_transfer          2
nr_rrc_measurement_report              2
nr_rrc_reconfiguration_complete         4
nr_rrc_setup_complete                 2
nr_rrc_security_mode_complete           2
nr_rrc_ul_information_transfer           2
nr_rrc_paging                         24
(enb)
```

The screenshot shows a terminal window with a black background and white text. It displays a list of NR events and their counts for two cells. The events include NG and RRC related procedures. The counts are listed in two columns: EVENT and COUNT. The terminal window has a title bar that says '1 AMARISOFIT (gNB1) (CTN3)' and a status bar at the bottom showing 'SSH2', 'stern', '102x37', '33.3%', '3 sessions', and 'CAP. NUM'.

Figura 5.15: Monitorización adicional de eventos NR en gNB1 durante una fase posterior de la operación del escenario.

```

(enb) cevent msg handover_preparation handover_command handover_source_success handover_target_success
# Global events:
EVENT                                COUNT
ng_downlink_nas_transport             4
ng_initial_context_setup_request      4
ng_initial_context_setup_response     4
ng_initial_ue_message                 6
ng_setup_request                      1
ng_setup_response                     1
ng_paging                             162
ng_ue_context_release_command         6
ng_ue_context_release_complete        6
ng_ue_context_release_request         3
ng_ue_radio_capability_info_indication 2
ng_uplink_nas_transport               4
# Cell 3 events:
EVENT                                COUNT
prach                                155
nr_rrc_setup                         15
nr_rrc_setup_request                 12
nr_rrc_reestablishment_request        4
nr_rrc_reconfiguration               11
nr_rrc_release                       4
nr_rrc_reestablishment                1
nr_rrc_security_mode_command          4
nr_rrc_dl_information_transfer        4
nr_rrc_ue_capability_enquiry          2
nr_rrc_measurement_report             5
nr_rrc_reconfiguration_complete       11
nr_rrc_setup_complete                 6
nr_rrc_reestablishment_complete       1
nr_rrc_security_mode_complete         4
nr_rrc_ul_information_transfer        4
nr_rrc_ue_capability_information       2
nr_rrc_paging                        150
(enb)

```

Figura 5.16: Monitorización adicional de eventos NR en gNB2 durante una fase posterior de la operación del escenario.

5.3.8. Relación con las medidas realizadas con *5G Scanner*

La configuración descrita en los apartados anteriores es necesaria para interpretar correctamente las medidas realizadas con la aplicación *5G Scanner*. Al existir tres celdas con PCIs diferenciados, la aplicación puede asociar cada muestra a la celda servidora detectada por el terminal. En concreto, las medidas asociadas al PCI 1 y al PCI 2 corresponden a las dos celdas del gNB1, mientras que las vinculadas al PCI 3 corresponden a la celda del gNB2.

Además, la configuración de *handover* por medidas permite relacionar los cambios de celda observados en Android con los eventos registrados.

5.4. Diseño e implementación de la aplicación 5G Scanner

La aplicación *5G Scanner* se ha desarrollado en Android Studio con el objetivo de evaluar experimentalmente la red Amarisoft 5G NR desplegada. Para ello, la aplicación se centra en la captura, almacenamiento, visualización y análisis de métricas de redes móviles 4G/5G en escenarios reales.

A diferencia de un simulador de equipos de usuario, *5G Scanner* permite obtener medidas directamente desde un terminal comercial. Esto resulta especialmente útil para analizar la cobertura, la calidad radio, la movilidad, la latencia y el rendimiento extremo a extremo en condiciones reales de uso.

La aplicación no modifica ni configura físicamente la red 5G, ni activa o desactiva antenas reales, ni interviene en la configuración del núcleo de red. Su función consiste en solicitar los permisos necesarios, leer la información disponible a través del sistema Android, registrar las métricas proporcionadas por el terminal, ejecutar pruebas activas de conectividad IP y representar los resultados obtenidos para facilitar su análisis posterior.

Desde el punto de vista funcional, *5G Scanner* se organiza mediante varios paneles diferenciados. Esta estructura permite separar las funciones de medida en tiempo real, consulta de información del terminal, almacenamiento y revisión de pruebas, visualización espacial y análisis gráfico de los datos registrados. Para complementar la descripción técnica incluida en este capítulo, el Apéndice A recoge el manual de usuario de la aplicación, mientras que el Apéndice B detalla la estructura de los ficheros CSV generados durante las pruebas.

Para introducir la organización interna de la aplicación, la Figura 5.17 muestra los principales paneles funcionales de *5G Scanner* y su relación con las tareas de captura, almacenamiento, visualización y análisis de datos.

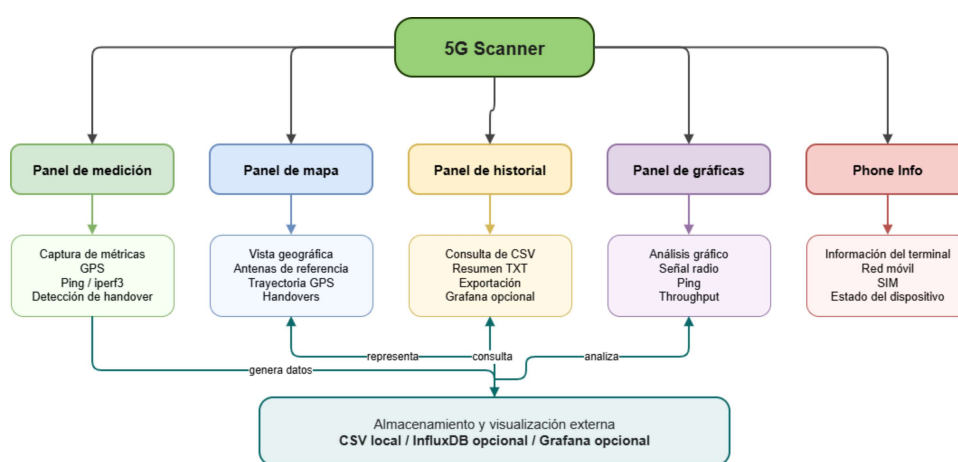


Figura 5.17: Organización funcional de la aplicación 5G Scanner.

Como se observa, el panel de medición constituye el punto de partida de las pruebas, ya que desde él se capturan las métricas radio, la posición GPS y los resultados de conectividad. Los datos generados se almacenan localmente en ficheros CSV y pueden consultarse posteriormente desde el historial, representarse espacialmente en el mapa o analizarse mediante gráficos. De

forma complementaria, el panel *Phone Info* permite consultar información del dispositivo, de la SIM y de la red móvil detectada por el terminal.

5.4.1. Funcionamiento inicial, permisos y configuración de la aplicación

Al abrir la aplicación por primera vez, se realiza una configuración inicial orientada a preparar el entorno de medida. En esta fase, la aplicación comprueba si dispone del permiso de ubicación y, en caso contrario, lo solicita al usuario. Este permiso es necesario para asociar cada muestra capturada a unas coordenadas GPS y para acceder a parte de la información de celda que Android restringe cuando no se concede acceso a la localización. Sin esta autorización, la aplicación no puede realizar correctamente la captura geolocalizada de las medidas ni representar después la trayectoria sobre el mapa.

Además del permiso de ubicación, la aplicación declara otros permisos necesarios para su funcionamiento. El permiso de Internet se utiliza para ejecutar pruebas activas de conectividad, como *ping* e *iperf3*, así como para enviar muestras a InfluxDB cuando esta integración se encuentra configurada. Por su parte, el permiso de vibración se emplea como mecanismo de aviso ante determinados eventos, como la detección de un cambio de celda durante una prueba.

También se emplea el permiso de estado del teléfono. Este permiso no se solicita al inicio de la aplicación, sino al acceder al panel *Phone Info*. Su finalidad es permitir la consulta de información adicional relacionada con el terminal y la red móvil, como la red de datos, la red de voz, el operador, el estado de la SIM y otras propiedades de la conexión. Si el permiso no está concedido, la aplicación continúa mostrando la información disponible, aunque algunos campos aparecen como no disponibles o *N/A*.

La aplicación permite configurar la conexión con InfluxDB y Grafana de forma opcional. Esta integración no es obligatoria, ya que *5G Scanner* puede funcionar únicamente con almacenamiento local en CSV. En caso de configurarse, InfluxDB se utiliza como base de datos temporal para recibir las muestras enviadas durante el escaneo, mientras que Grafana permite abrir un panel externo de visualización. Esta configuración puede introducirse al inicio y modificarse posteriormente desde el panel de historial.

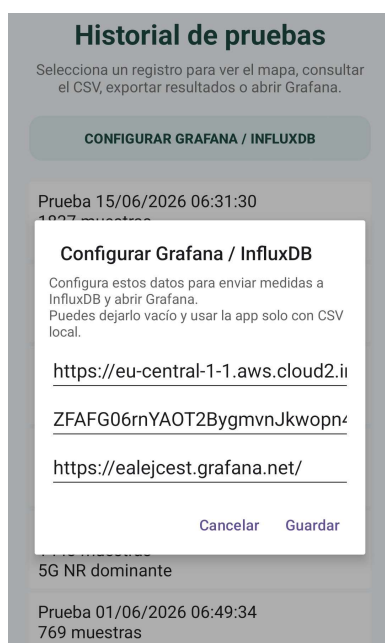


Figura 5.18: Pantalla de configuración opcional de Grafana e InfluxDB en la aplicación 5G Scanner.

También se ofrece la posibilidad de configurar antenas de referencia. Para cada antena se pueden introducir datos como el nombre, las coordenadas geográficas, el PCI y el TAC. Esta información se emplea posteriormente para mostrar las antenas en el mapa y para calcular la distancia a la antena asociada cuando existe coincidencia entre el PCI y el TAC configurados y los valores detectados por el terminal. La configuración de antenas puede introducirse al inicio si todavía no existe una configuración previa y modificarse más adelante desde el panel de mapa.

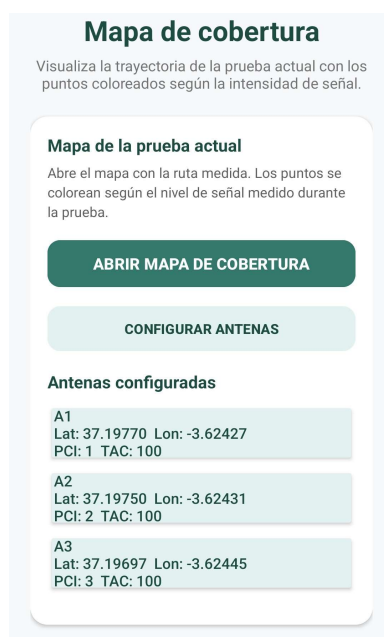


Figura 5.19: Panel de configuración y visualización de antenas de referencia en 5G Scanner.

El acceso a determinadas métricas puede variar según el modelo del terminal, la versión de Android, el operador y las restricciones propias del sistema. Por este motivo, algunos campos pueden aparecer como *N/A*.

5.4.2. Panel de medición: captura, estado visual y pruebas activas

El panel de medición es la pantalla principal de *5G Scanner*. Desde este panel se inicia y detiene la prueba experimental, se consultan las métricas instantáneas obtenidas por el terminal y se ejecutan las pruebas activas de red. Antes de comenzar el escaneo, la interfaz solicita el servidor de referencia que se utilizará para las pruebas de conectividad y rendimiento.

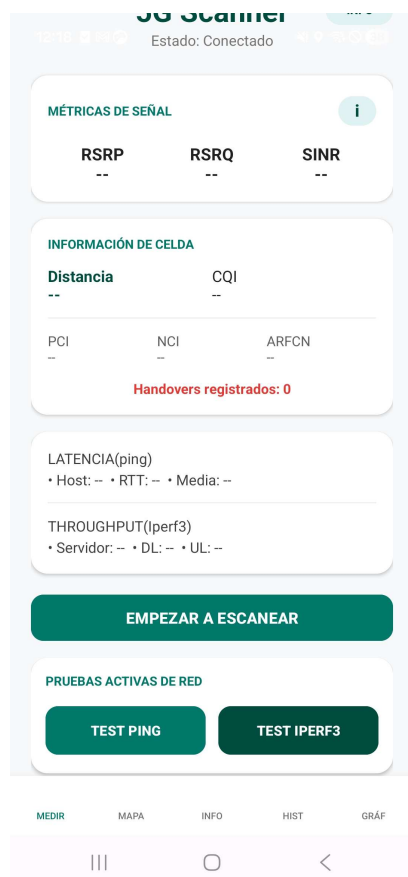


Figura 5.20: Panel principal de medición de la aplicación 5G Scanner antes de iniciar una prueba.

Durante una prueba activa, el panel se actualiza cada segundo con las métricas radio disponibles, la información de celda, la posición GPS y el contador de *handovers*. Entre las métricas radio consideradas se encuentran RSRP, RSRQ, SINR y CQI. Además, se registran identificadores como PCI, NCI, ARFCN y TAC, que permiten relacionar cada muestra con la celda observada por el dispositivo.

Además de mostrar valores numéricos, el panel incorpora símbolos de barras de cobertura en las métricas RSRP, RSRQ, SINR y CQI. Estos iconos permiten identificar de forma rápida si el valor obtenido se clasifica como *Bueno*, *Mejorable*, *Malo* o *No disponible*. Para facilitar la interpretación, el panel incluye un botón informativo, identificado con la letra “i”, donde se resumen los criterios utilizados para clasificar la calidad de las métricas radio.

De esta forma, el usuario no necesita interpretar manualmente cada valor

durante la toma de datos, sino que puede comprobar de manera inmediata si la señal recibida y la calidad radio se encuentran dentro de rangos adecuados.



Figura 5.21: Guía visual de interpretación de las métricas radio empleada en el panel de medición.

El panel de medición incorpora también una ayuda general que resume el funcionamiento de la aplicación y facilita la interpretación de sus bloques principales.



Figura 5.22: Panel de ayuda general asociado al uso de 5G Scanner.

La aplicación incluye un mecanismo de detección de cambios de celda basado en el PCI. Durante la prueba, se compara el PCI de la celda registrada con el valor observado en la muestra anterior. Cuando se detecta un cambio, se incrementa el contador de *handovers* y se registra el evento. Esta detección permite localizar transiciones entre celdas durante recorridos experimentales y relacionarlas posteriormente con variaciones de cobertura, latencia o rendimiento.

En el mismo panel se integran las pruebas activas de red. La prueba de *ping* se utiliza para estimar la latencia y la pérdida de paquetes. A partir de la salida obtenida, la aplicación extrae valores como la latencia media, el último RTT medido y el porcentaje de pérdida. Estos datos se incorporan al registro de la prueba para analizarlos junto con las métricas radio y la posición GPS. Los resultados de *ping* se actualizan de forma automática cada 30 segundos, aunque la prueba también puede ejecutarse manualmente desde la interfaz.

Por su parte, *iperf3* se emplea para medir el *throughput* extremo a extremo sobre la conectividad IP proporcionada por la red. La aplicación permite ejecutar pruebas en TCP o UDP, tanto en sentido *uplink* como *downlink*. En el caso de UDP, se puede definir un bitrate objetivo. Esta prueba se lanza de forma puntual, ya que puede generar carga adicional sobre la red y no resulta conveniente ejecutarla de manera continua durante todo el recorrido.

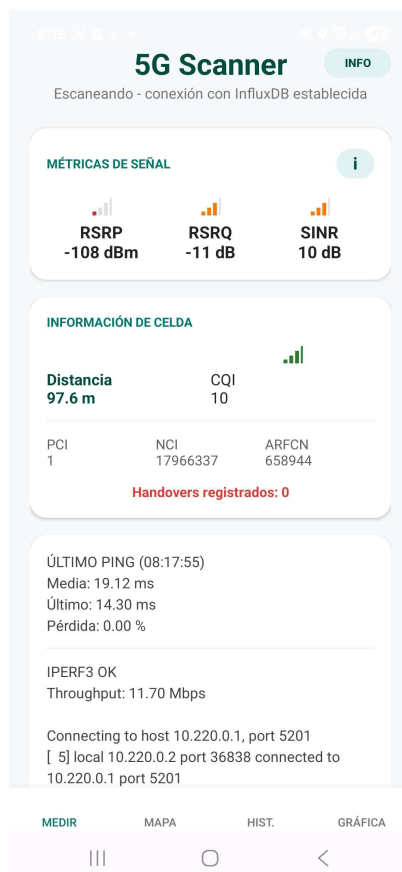


Figura 5.23: Panel de medición durante una prueba activa, mostrando métricas radio, información de celda, resultados de ping e iperf3.

```

ÚLTIMO PING (08:17:55)
Media: 19.12 ms
Último: 14.30 ms
Pérdida: 0.00 %

IPERF3 OK
Throughput: 11.70 Mbps

Connecting to host 10.220.0.1, port 5201
[ 5] local 10.220.0.2 port 36838 connected to
10.220.0.1 port 5201
[ ID] Interval      Transfer  Bitrate    Total
Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec  11.9 MBytes  100 Mbits/sec
8633
[ 5] 1.00-2.00 sec  11.9 MBytes  100 Mbits/sec
8633
[ 5] 2.00-3.00 sec  11.9 MBytes  100 Mbits/sec
8633
[ 5] 3.00-4.00 sec  11.9 MBytes  100 Mbits/sec
8635
[ 5] 4.00-5.00 sec  11.9 MBytes  99.9 Mbits/sec
8642
-----
[ ID] Interval      Transfer  Bitrate    Jitter
Lost/Total Datagrams
[ 5] 0.00-5.00 sec  59.6 MBytes  100 Mbits/sec
0.000 ms 0/43176 (0%) sender
[ 5] 0.00-6.18 sec  8.62 MBytes  11.7 Mbits/sec
0.776 ms 34546/40786 (85%) receiver

```

Figura 5.24: Resultado de una prueba de ping e iperf3 ejecutada desde el panel de medición.

El almacenamiento de datos se realiza localmente mediante ficheros CSV. Este mecanismo permite conservar los resultados de cada prueba experimental sin depender de una conexión permanente con servicios externos, facilitando además la revisión manual, la exportación y el procesamiento posterior con otras herramientas.

Al iniciar una nueva prueba, la aplicación genera un CSV principal identificado mediante la fecha y hora de comienzo. En este fichero se almacenan las muestras periódicas capturadas durante el escaneo. Entre los campos registrados se incluyen la fecha, el instante temporal, PCI, NCI, ARFCN, TAC, RSRP, RSRQ, SINR, CQI, posición GPS, contador de *handovers* y resultados de latencia asociados al *ping*.

Además del CSV principal, la aplicación genera un fichero específico para los resultados de *iperf3*. Esta separación evita mezclar las muestras periódicas de señal con pruebas de rendimiento ejecutadas de forma puntual.

Al finalizar una prueba, la aplicación genera también un resumen estadístico. Este resumen incluye información como el número de muestras guardadas, valores medios, mínimos y máximos de determinadas métricas, número de PCI detectados, PCI dominante, *handovers* registrados y distribución aproximada de tecnologías observadas.

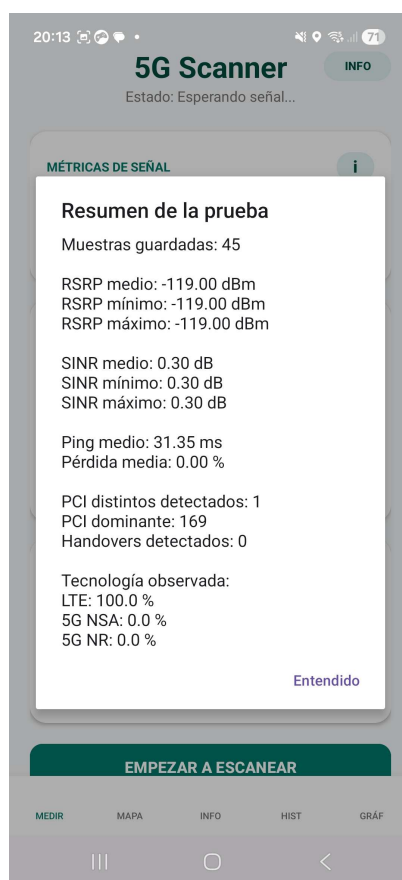


Figura 5.25: Resumen generado tras una prueba.

Flujo de secuencia del panel de medición

El flujo de funcionamiento del panel de medición comienza con la apertura de la aplicación y la inicialización de la actividad principal. En esta fase se enlazan las vistas, los paneles y los botones, se configuran las gráficas y se carga el panel de información. A continuación, la aplicación comprueba el permiso de ubicación. Si el permiso está concedido, se configura el GPS; si no lo está, se solicita al usuario.

Una vez preparado el panel, el usuario puede iniciar el escaneo pulsando el botón correspondiente. La aplicación solicita entonces el servidor de pruebas. Si no se introduce un servidor válido, se muestra un aviso y no comienza la prueba. En caso contrario, se crea una nueva prueba, se genera el CSV principal, se crea el CSV asociado a *iperf3*, se reinicia el contador de *handovers* y se activa el estado de medición.

Durante el escaneo, la aplicación ejecuta un ciclo periódico cada segundo.

En cada iteración obtiene la ubicación GPS, lee la celda LTE, 5G NSA o 5G NR disponible, actualiza las métricas RSRP, RSRQ, SINR, CQI, PCI, NCI, ARFCN y TAC, calcula la distancia a la antena cuando existe coincidencia por PCI y TAC, detecta posibles *handovers*, actualiza la interfaz y guarda una nueva muestra en el CSV principal. Cada 30 segundos se ejecuta también el ping automático, guardando la latencia media, la pérdida de paquetes y el último RTT.

Si InfluxDB está configurado, las muestras se envían también a la base de datos temporal. Si no lo está, la aplicación continúa funcionando con almacenamiento local. Durante el escaneo, el usuario puede ejecutar manualmente pruebas de ping e *iperf3*, abrir el mapa de la prueba actual y consultar las antenas configuradas. Al detener la prueba, se paran los bucles de escaneo y ping, se reinicia la interfaz, se genera el resumen TXT y se actualizan el historial y el panel de gráficas.

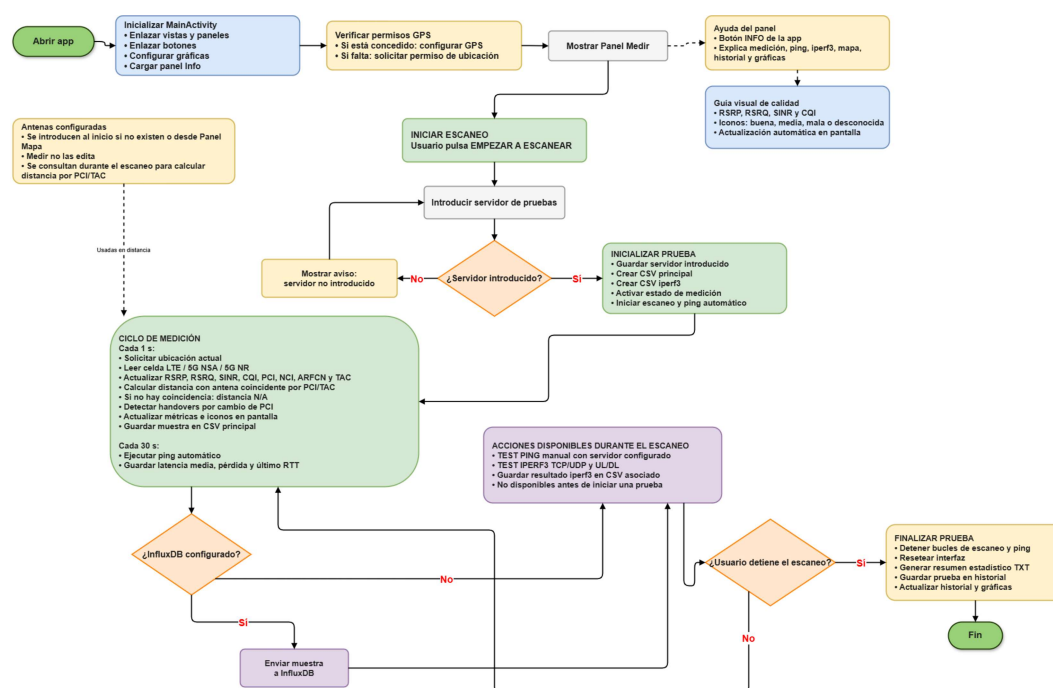


Figura 5.26: Flujo de secuencia del panel de medición.

5.4.3. Panel de mapa y visualización espacial

El panel de mapa permite interpretar los datos registrados desde una perspectiva espacial. Para ello, la aplicación utiliza la librería *osmdroid* [33], que permite incluir un mapa basado en *OpenStreetMap* dentro de la aplicación. Al abrir el mapa, se representa la trayectoria seguida durante la prueba

junto con los valores de los parámetros medidos a partir de los puntos almacenados en los CSV.

Cada punto conserva su posición GPS y se colorea en función del parámetro seleccionado. En la versión actual de la aplicación se pueden representar RSRP, RSRQ, SINR, CQI, PCI, latencia, *throughput* y eventos de *handover*. Esta selección permite analizar una misma prueba desde distintos enfoques: cobertura, calidad radio, identificación de celda, retardo, rendimiento o movilidad entre celdas.

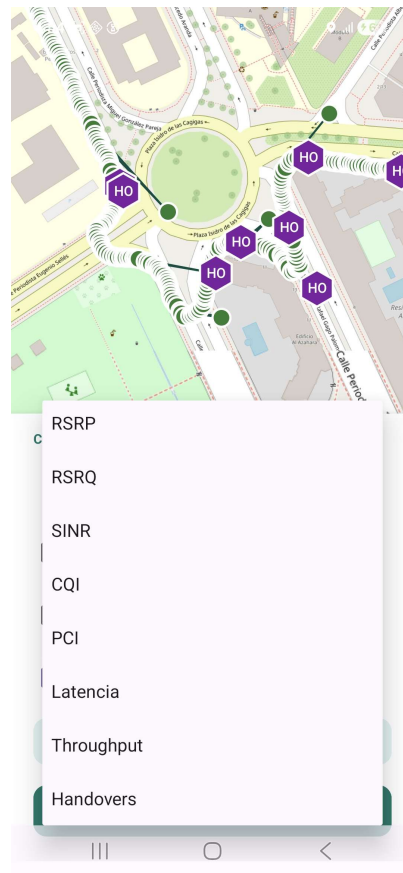


Figura 5.27: Menú desplegable para elegir el parámetro que se quiere representar sobre el mapa.

La representación de métricas radio facilita observar la variación de la cobertura y de la calidad de señal en función de la ubicación.



Figura 5.28: Representación de la trayectoria coloreada según el valor de RSRP medido durante la prueba.



Figura 5.29: Representación de la trayectoria coloreada según el valor de SINR.



Figura 5.30: Representación de la trayectoria coloreada según el valor de CQI.

La representación por PCI permite identificar la celda física asociada a cada muestra. Este modo resulta especialmente útil en recorridos de movilidad, ya que permite localizar visualmente los cambios de celda. Los eventos de *handover* se representan mediante marcadores específicos, diferenciados de los puntos ordinarios de medida, y permanecen visibles en el mapa independientemente del parámetro seleccionado.

En las Figuras 5.31, 5.32 y 5.33 se muestra un ejemplo de cambio de PCI durante el recorrido. Inicialmente, el terminal se encuentra asociado a la celda con PCI 1. Posteriormente, se observa la asociación con la celda de PCI 2 y, finalmente, la aplicación registra el evento de *handover* correspondiente al cambio de PCI detectado.



Figura 5.31: Representación de puntos de medida coloreados por PCI, mostrando una muestra asociada al PCI 1.



Figura 5.32: Representación de puntos de medida coloreados por PCI, mostrando una muestra asociada al PCI 2.



Figura 5.33: Marcador de *handover* generado tras detectarse un cambio de PCI de 2 a 1.

La aplicación incorpora además un filtro para mostrar únicamente las muestras asociadas a 5G NR. Esta opción resulta útil cuando durante el recorrido aparecen registros LTE, valores no disponibles o instantes en los que el dispositivo de medida no se encuentra conectado a una celda NR. De esta forma, puede compararse una vista completa de la prueba con una vista centrada exclusivamente en muestras 5G NR.



Figura 5.34: Representación por PCI incluyendo registros LTE o valores no asociados a 5G NR.

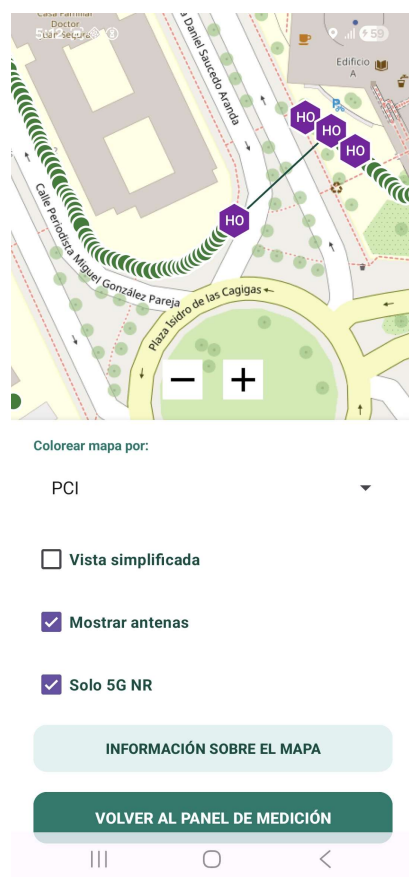


Figura 5.35: Representación por PCI aplicando el filtro de visualización únicamente a muestras 5G NR.

El mapa también permite mostrar antenas de referencia configuradas por el usuario. Esto facilita la interpretación visual de los datos registrados y permite relacionar las medidas con el escenario de despliegue.



Figura 5.36: Visualización del mapa con antenas de referencia configuradas y trayectoria de medidas.

Cada antena se define mediante nombre, coordenadas geográficas, PCI y TAC. Esta información se utiliza como apoyo visual y analítico. La asociación con una antena se realiza mediante la coincidencia entre los valores PCI y TAC configurados y los valores registrados por el terminal.

Además de las métricas radio, el mapa puede representar medidas de latencia. En este modo, los puntos geolocalizados se asocian a los resultados obtenidos mediante *ping*, lo que permite estudiar si las variaciones de retardo aparecen concentradas en zonas concretas del recorrido.

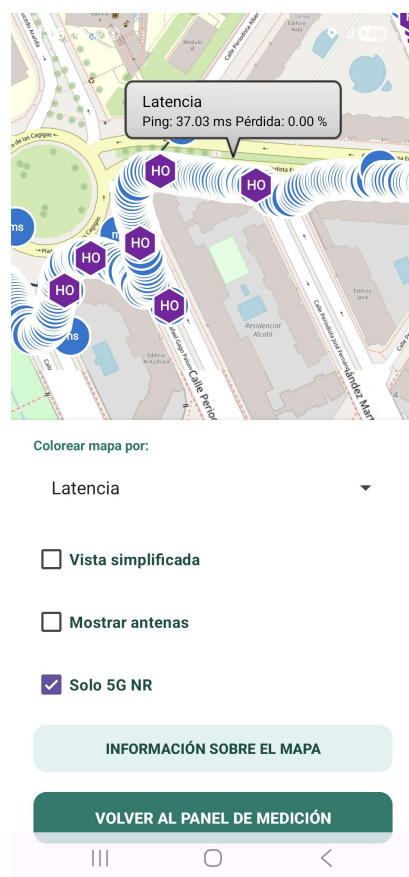


Figura 5.37: Representación geolocalizada de medidas de latencia obtenidas mediante ping.

La aplicación también representa los resultados de las pruebas de *iperf3*. A diferencia de las métricas radio, estas medidas no se capturan de forma continua, sino que corresponden a ejecuciones puntuales realizadas durante la prueba. Los puntos de *throughput* permiten localizar las posiciones en las que se obtuvo un determinado rendimiento extremo a extremo sobre la conectividad IP proporcionada por la red.

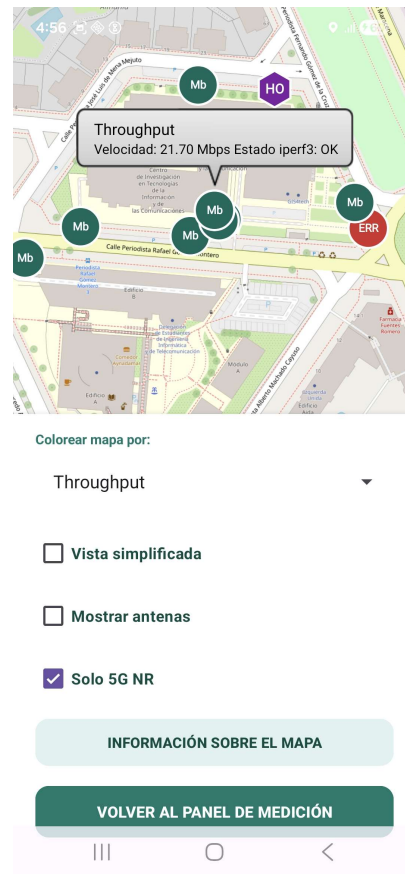


Figura 5.38: Representación sobre el mapa de medidas de *throughput* obtenidas mediante *iperf3*.

Cuando una ejecución de *iperf3* no finaliza correctamente, la aplicación conserva el evento si dispone de coordenadas GPS válidas y lo representa de forma diferenciada. Esto permite identificar no solo los puntos donde se obtuvo *throughput* válido, sino también las posiciones donde la prueba falló o no devolvió un resultado correcto.

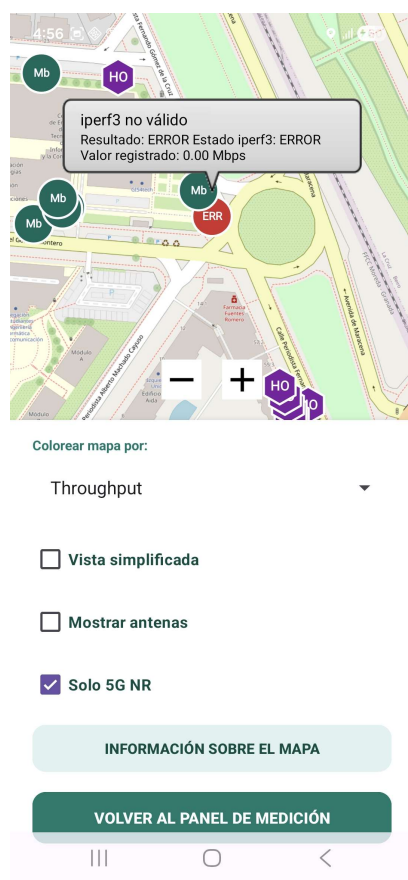


Figura 5.39: Representación de una ejecución de iperf3 no válida, diferenciada de las medidas de *throughput* correctas.

Para evitar una visualización excesivamente densa, la aplicación incorpora una opción denominada *Vista simplificada*. Esta opción mantiene la trayectoria completa de la prueba, pero reduce el número de marcadores representados mediante la agrupación de varias muestras consecutivas cercanas en un único punto medio. Así se conserva la forma general del recorrido y se facilita la interpretación visual cuando existen muchas muestras.

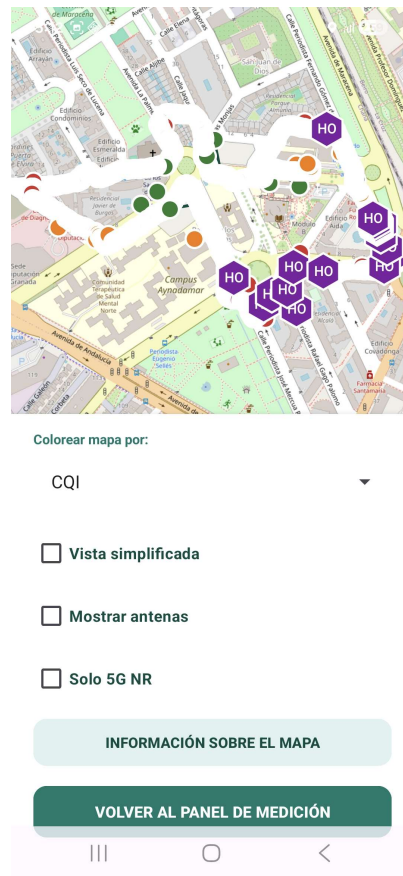


Figura 5.40: Representación del mapa sin aplicar la vista simplificada, mostrando una mayor densidad de puntos de medida.

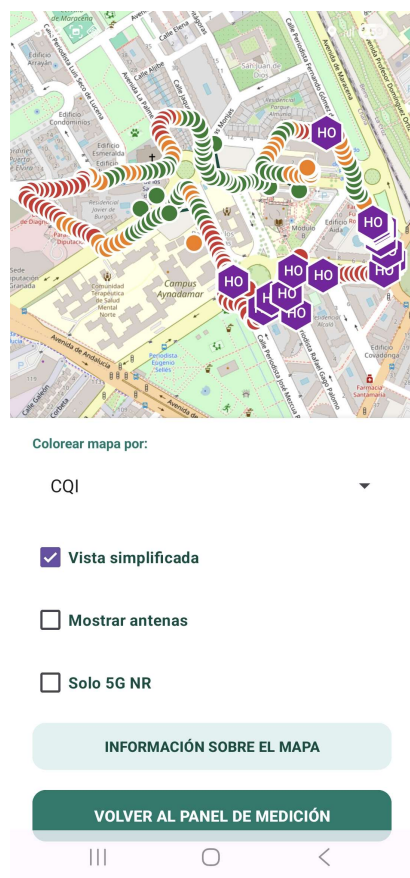


Figura 5.41: Representación del mapa con la vista simplificada activada, manteniendo la trayectoria y reduciendo el número de marcadores.

Finalmente, el panel de mapa incorpora una ayuda visual que resume el significado de los parámetros representables, la función de las antenas de referencia, la interpretación de latencia e *iperf3* y la leyenda de colores. Esta ayuda facilita la interpretación de la visualización cartográfica sin intervenir en la captura de datos.



Figura 5.42: Panel de ayuda del mapa, donde se explican los parámetros representables y la interpretación de la visualización cartográfica.

Flujo de secuencia del panel de mapa

El flujo del panel de mapa se inicia cuando el usuario pulsa el botón para abrir el mapa de cobertura. Si no existe una prueba iniciada, la aplicación muestra un aviso indicando que todavía no hay datos disponibles. Si existe una prueba activa o guardada, se abre la actividad del mapa y se carga el CSV correspondiente.

Al inicializar el mapa, la aplicación configura *OpenStreetMap* mediante *osmdroid*, recibe el nombre del CSV de la prueba, prepara los controles de zoom y activa los selectores necesarios para elegir el parámetro de representación. El usuario puede seleccionar entre RSRP, RSRQ, SINR, CQI, PCI, latencia, *throughput* y *handovers*. También puede activar opciones como la vista simplificada, la visualización de antenas y el filtro de muestras 5G.

A partir de la opción seleccionada, la aplicación prepara los datos que

deben representarse. Para las métricas radio, PCI, TAC y latencia se lee el CSV principal. Para el *throughput* se utiliza el CSV específico de *iperf3*, y para los *handovers* se detectan los cambios de PCI registrados durante la prueba. Durante este proceso se validan las columnas de latitud y longitud y se descartan coordenadas no válidas.

Después se aplican los filtros y opciones de visualización. Si está activo el filtro de solo 5G, se descartan las muestras que no correspondan a 5G NR. Si está activa la vista simplificada, se agrupan muestras cercanas, salvo en los modos de *throughput* y *handovers*. Si se solicita mostrar antenas, se cargan las antenas configuradas y se identifica la antena transmisora mediante coincidencia de PCI y TAC.

Finalmente, el mapa se renderiza limpiando los marcadores anteriores, dibujando la trayectoria GPS, coloreando los puntos según la métrica seleccionada, representando los *handovers* con un icono específico y mostrando las antenas configuradas. El mapa se centra en el último punto válido y se actualiza periódicamente mientras la pantalla permanece activa.

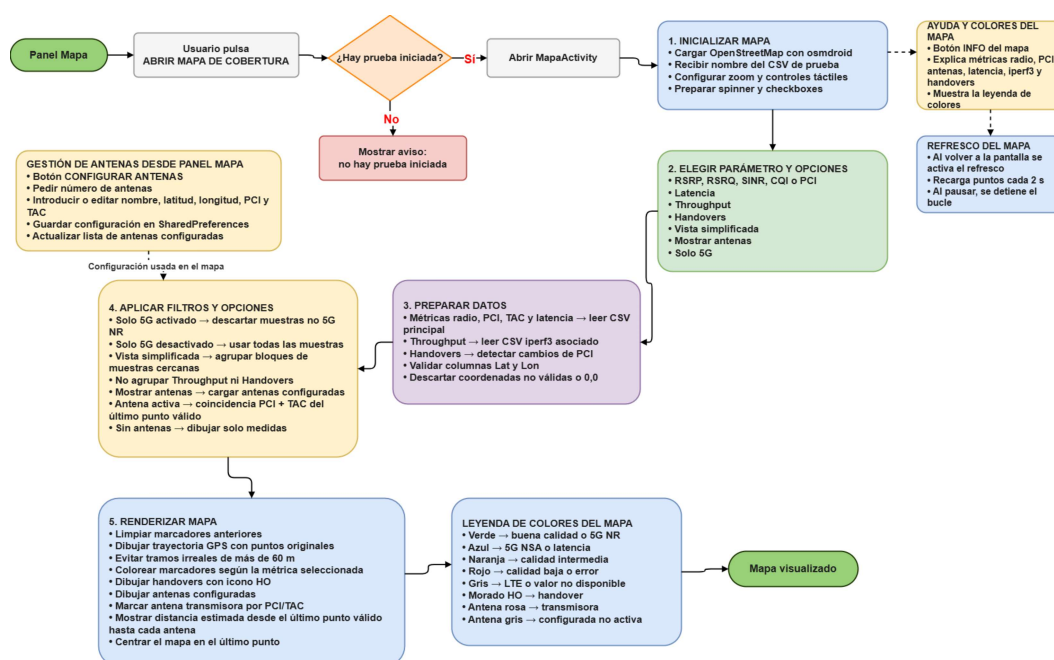


Figura 5.43: Flujo de secuencia del panel de mapa.

5.4.4. Historial, consulta y exportación de pruebas

El historial de pruebas permite acceder a los resultados almacenados localmente. Una vez finalizada una prueba experimental, la aplicación conserva los ficheros generados y los muestra en un listado desde el que se pueden

consultar pruebas anteriores.



Figura 5.44: Historial de pruebas almacenadas localmente en la aplicación.

Al seleccionar una prueba guardada, la aplicación ofrece diferentes acciones de consulta y exportación. Entre ellas se encuentran la apertura del mapa asociado, la visualización del CSV principal, la consulta del CSV de *iperf3*, la visualización del resumen, la exportación de resultados y el acceso a Grafana cuando la integración externa se ha configurado previamente.

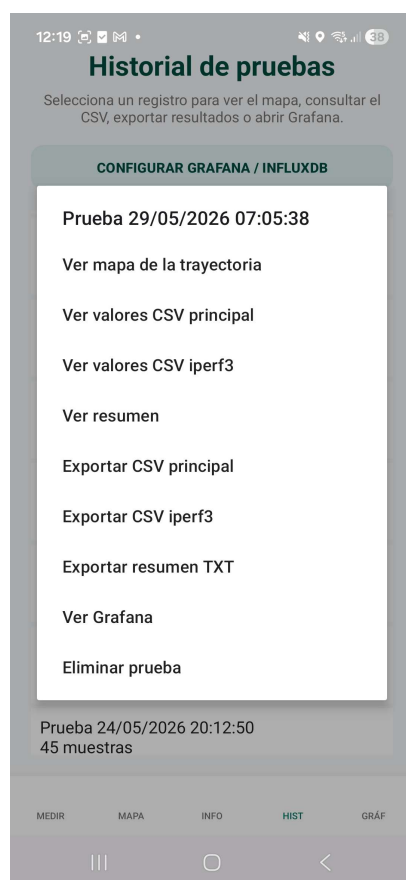


Figura 5.45: Opciones disponibles para una prueba almacenada en el historial.

El panel de historial también permite configurar la conexión con Grafana e InfluxDB. Esta configuración incluye los datos necesarios para el envío de muestras a InfluxDB y la URL de Grafana. Si estos campos se dejan vacíos, la aplicación continúa funcionando únicamente con almacenamiento local en CSV.

Dentro de las opciones de consulta, la actividad de visualización CSV permite abrir el contenido del CSV principal o del CSV de *iperf3*. Esta pantalla recibe el nombre del archivo, comprueba si existe en el almacenamiento interno, lee su contenido mediante un lector de texto y lo muestra con formato monoespaciado. Además, incorpora un botón de información donde se explica el significado de las columnas principales del CSV.

Flujo de secuencia del panel de historial

El flujo del panel de historial comienza con la carga de las pruebas almacenadas en el almacenamiento interno del dispositivo. La aplicación busca los archivos correspondientes a pruebas guardadas, excluye los CSV específicos de *iperf3*, ordena los resultados por fecha reciente y muestra, para cada prueba, información resumida como el número de muestras y la tecnología dominante.

Si no existen pruebas guardadas, se muestra un aviso indicando que todavía no hay registros disponibles. En caso contrario, se presenta una lista de pruebas desde la que el usuario puede seleccionar una medición concreta. Al hacerlo, la aplicación muestra las acciones disponibles: visualizar el mapa de la trayectoria, consultar el CSV principal, abrir el CSV de *iperf3*, ver el resumen, exportar los archivos generados, visualizar la prueba en Grafana o eliminar la prueba.

Cuando se solicita el resumen de una prueba y este todavía no ha sido generado, la aplicación intenta construirlo a partir del CSV principal. Las opciones de exportación permiten compartir el CSV principal, el CSV de *iperf3* y el resumen TXT mediante las opciones proporcionadas por el sistema Android.

Desde este panel también se permite visualizar una prueba concreta en Grafana, siempre que los parámetros de InfluxDB y Grafana estén configurados correctamente. En ese caso, la aplicación reenvía a InfluxDB los datos del CSV principal y, si existe, los del CSV de *iperf3*. Posteriormente, abre el panel de Grafana con el rango temporal de la prueba seleccionada y el identificador *test_id*, lo que permite analizar externamente las métricas radio, de conectividad y de *throughput* asociadas a esa medición.

Por último, el usuario puede eliminar una prueba guardada. Antes de realizar esta acción, la aplicación solicita confirmación. Si el usuario confirma la eliminación, se borran el CSV principal y el CSV de *iperf3* asociado, si existe, y se actualizan el historial y el panel de gráficas. Si se cancela la acción, se vuelve a la lista de pruebas sin modificar los datos almacenados.

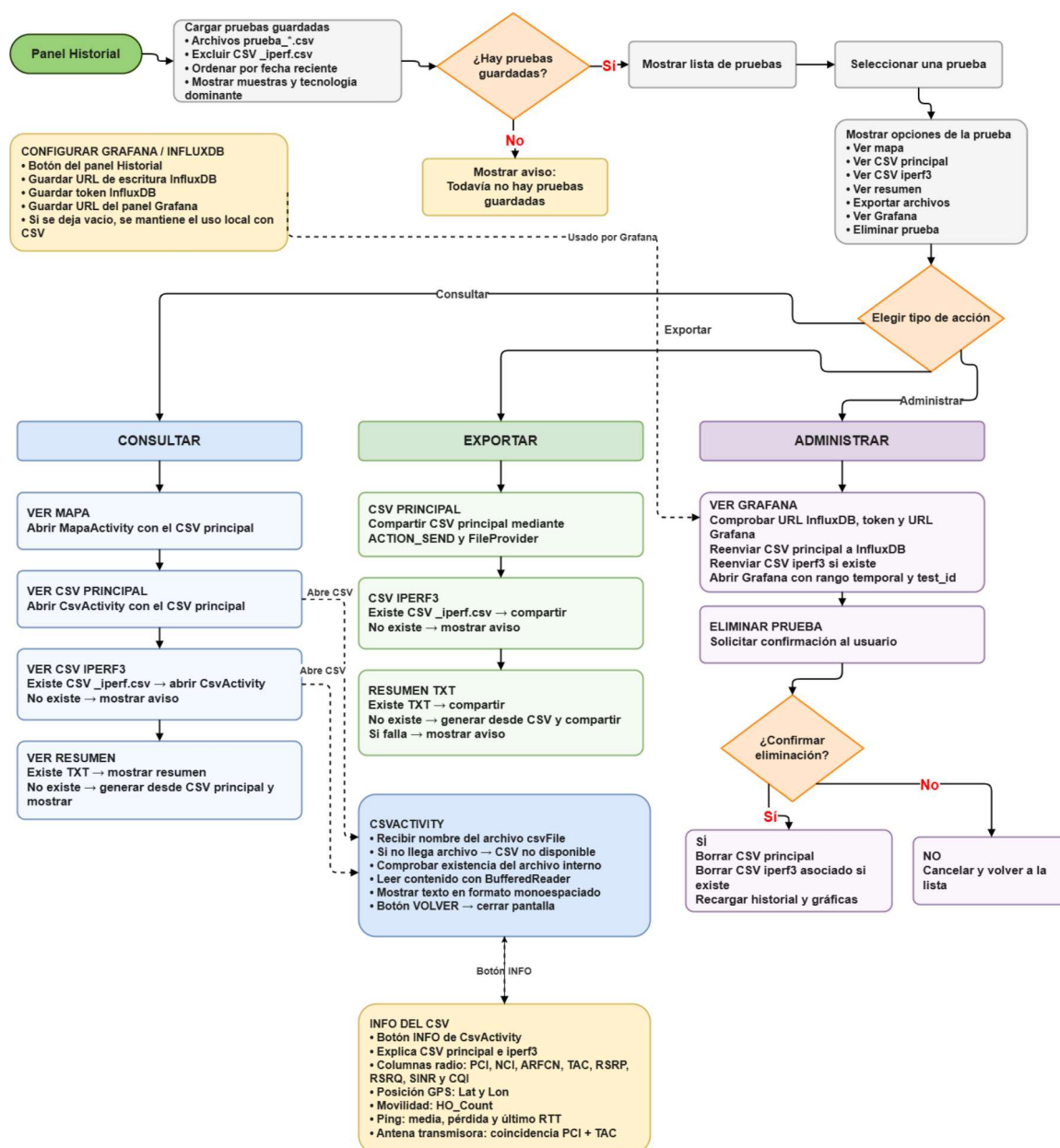


Figura 5.46: Flujo de secuencia del panel de historial.

5.4.5. Panel de gráficas y análisis visual

El panel de gráficas permite representar visualmente los datos almacenados en los ficheros CSV. A partir de una prueba guardada, la aplicación permite seleccionar el archivo correspondiente, elegir el tipo de gráfica y escoger el parámetro que se desea representar. Esta funcionalidad está orientada

a realizar una primera inspección visual de los resultados sin necesidad de exportar los datos a herramientas externas.

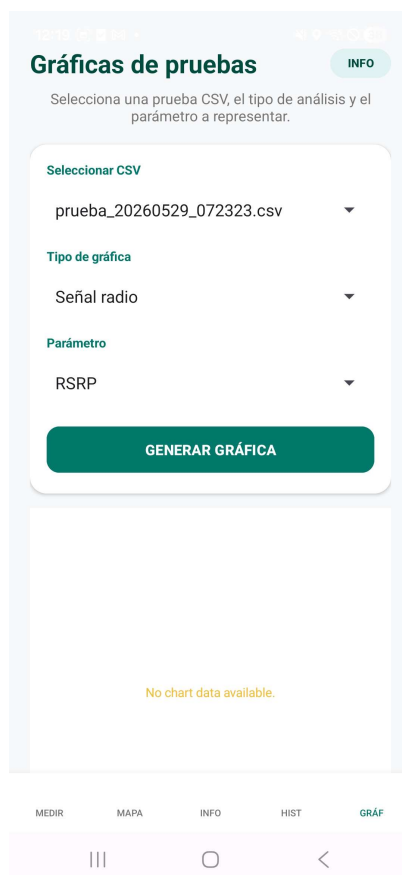


Figura 5.47: Panel de gráficas para seleccionar una prueba CSV, el tipo de análisis y el parámetro a representar.

La aplicación organiza las gráficas en varios grupos: señal radio, calidad de canal, ping, *iperf3* y comparativas. En todos los casos, el eje horizontal representa el número de muestra dentro del fichero CSV, mientras que el eje vertical muestra el valor de la métrica seleccionada con su unidad correspondiente.

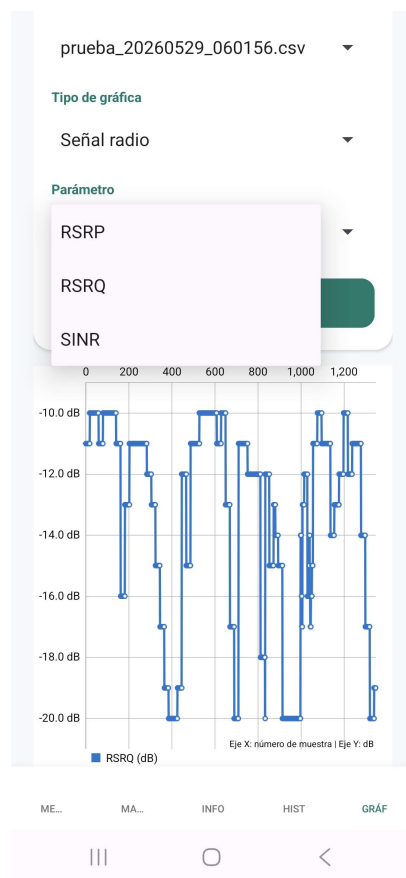


Figura 5.48: Opciones de parámetros disponibles para la representación gráfica.

Dentro del bloque de señal radio se pueden representar individualmente métricas como RSRP, RSRQ y SINR. El RSRP se muestra en dBm, mientras que RSRQ y SINR se representan en dB. Estas gráficas permiten observar la evolución de la señal a lo largo de la prueba y detectar zonas con variaciones significativas.

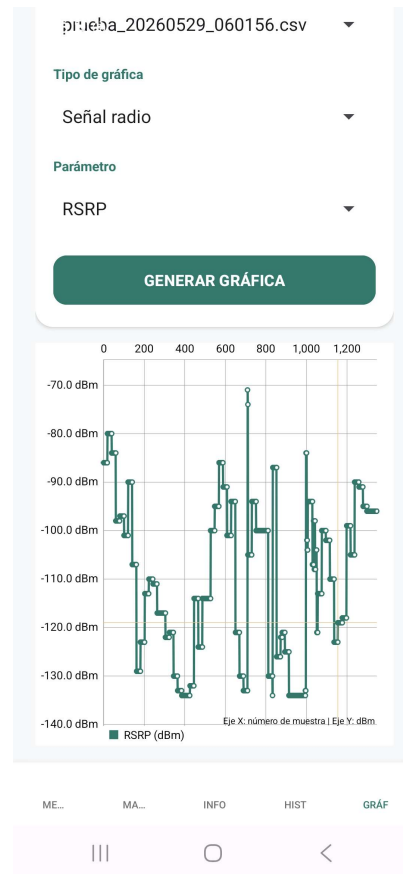


Figura 5.49: Gráfica individual de RSRP.

La calidad de canal se representa mediante CQI, que se muestra como un índice sin unidad física. Esta gráfica permite observar la evolución de la calidad estimada del enlace radio y compararla posteriormente con otras métricas de cobertura o rendimiento.

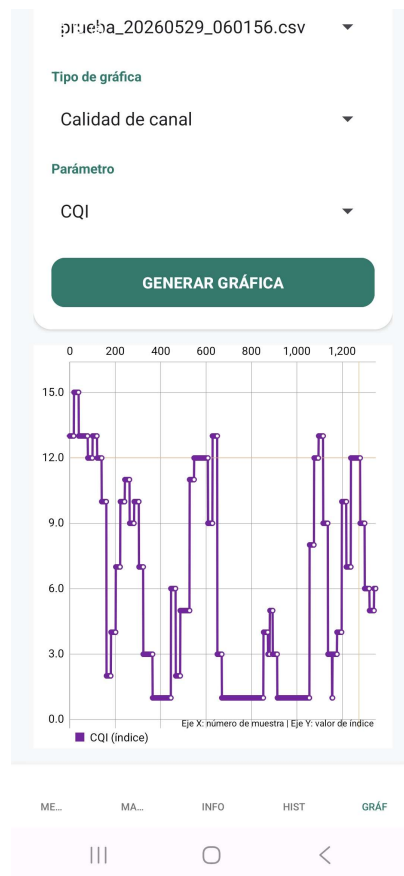


Figura 5.50: Gráfica de CQI representado como índice de calidad de canal.

Para las pruebas de latencia, el panel permite representar el ping medio, el último ping registrado y la pérdida de paquetes. Las métricas de latencia se expresan en milisegundos, mientras que la pérdida se representa en porcentaje.

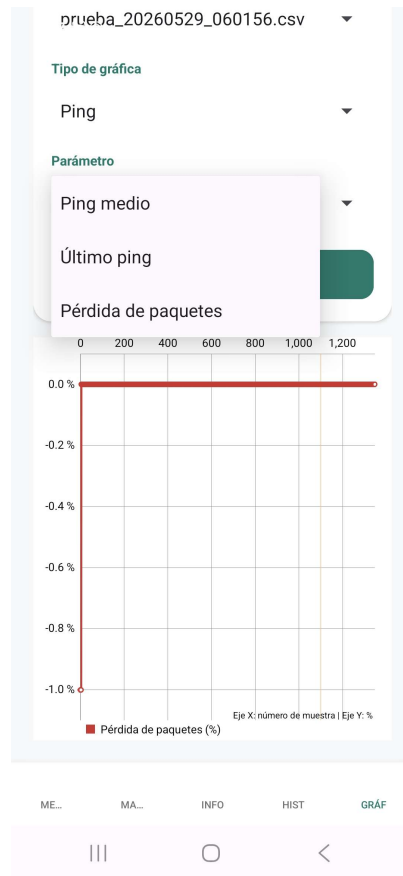


Figura 5.51: Selección de parámetros asociados a las pruebas de ping, incluyendo latencia y pérdida de paquetes.



Figura 5.52: Gráfica individual de ping medio representado en milisegundos.

El bloque de *iperf3* permite representar el *throughput* obtenido en las medidas. En este caso, la aplicación utiliza el CSV específico de *iperf3* y muestra el resultado en Mbps.

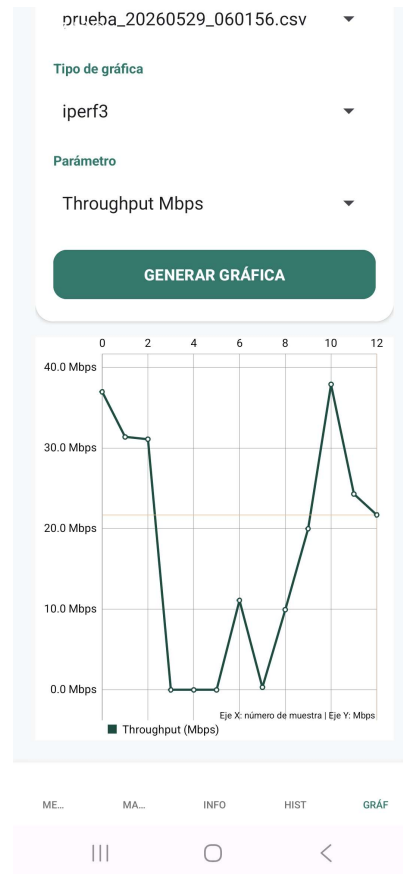


Figura 5.53: Gráfica de *throughput* obtenido mediante iperf3 y representado en Mbps.

Además de las gráficas individuales, la aplicación incorpora representaciones comparativas. En la comparativa de señal radio se muestran conjuntamente RSRP, RSRQ y SINR. Dado que estas métricas no comparten exactamente la misma unidad, la aplicación indica las unidades en la leyenda de cada serie.

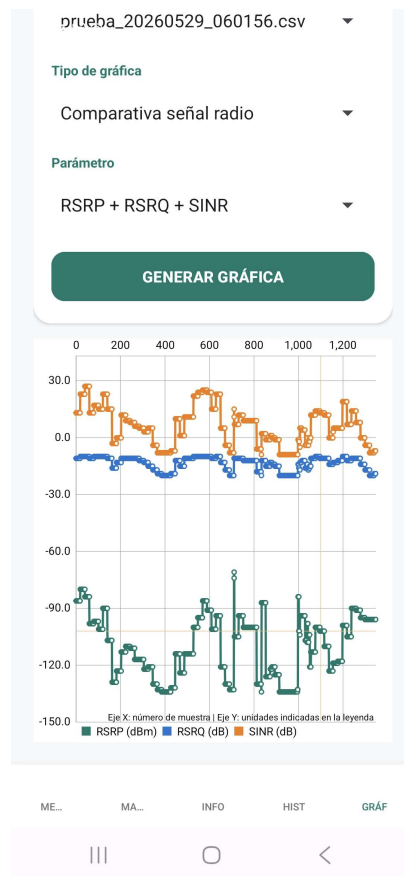


Figura 5.54: Gráfica comparativa de métricas radio, incluyendo RSRP, RSRQ y SINR con sus unidades indicadas en la leyenda.

También se incluye una comparativa de ping, en la que se representan simultáneamente el ping medio y el último ping registrado.

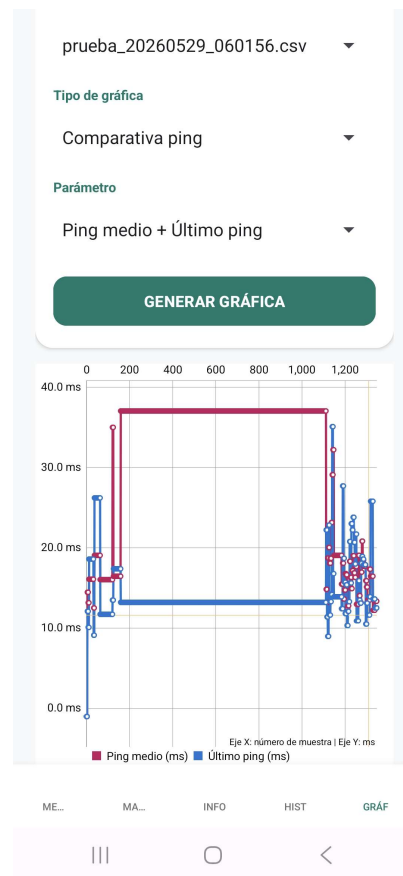


Figura 5.55: Gráfica comparativa de ping medio y último ping, ambos representados en milisegundos.

Como apoyo a la interpretación, el panel de gráficas dispone de una ayuda específica que resume el significado de cada tipo de representación y el papel de los ejes de la gráfica.



Figura 5.56: Panel de ayuda asociado a la interpretación de las gráficas generadas por la aplicación.

Flujo de secuencia del panel de gráficas

El flujo del panel de gráficas comienza cargando los CSV principales disponibles. La aplicación localiza los archivos de prueba, excluye los CSV específicos de *iperf3* y ordena los resultados por fecha reciente. Si no hay CSV disponibles, se muestra un aviso en el selector indicando que no existen datos para graficar.

Cuando hay pruebas disponibles, el usuario selecciona un CSV principal, elige el tipo de gráfica y la aplicación actualiza los parámetros disponibles según la categoría seleccionada. Entre las opciones se incluyen gráficas de señal radio, calidad de canal, ping, *iperf3* y comparativas. El panel incorpora además una ayuda específica donde se explican las métricas representadas, los ejes de la gráfica y los tipos de análisis disponibles.

Al pulsar el botón de generar, la aplicación comprueba si el CSV selec-

cionado es válido. Si no lo es, se muestra un aviso indicando que no hay datos disponibles para graficar. Si el archivo es válido, se determina el tipo de gráfica. Para una gráfica individual, se obtiene la columna asociada al parámetro seleccionado, se leen los valores necesarios, se convierten a formato numérico y se descartan los valores no disponibles o no convertibles. En el caso de *iperf3*, se utiliza el CSV específico asociado a la prueba.

Para una gráfica comparativa, la aplicación crea varias series dentro de la misma representación. En la comparativa de señal se representan RSRP, RSRQ y SINR, mientras que en la comparativa de ping se muestran el ping medio y el último ping registrado. Si existen datos válidos, se construye la gráfica, se asigna el color correspondiente a cada métrica, se activa la leyenda, se configuran los ejes y se muestra el resultado en pantalla. Si no hay datos válidos, se informa al usuario mediante un aviso.

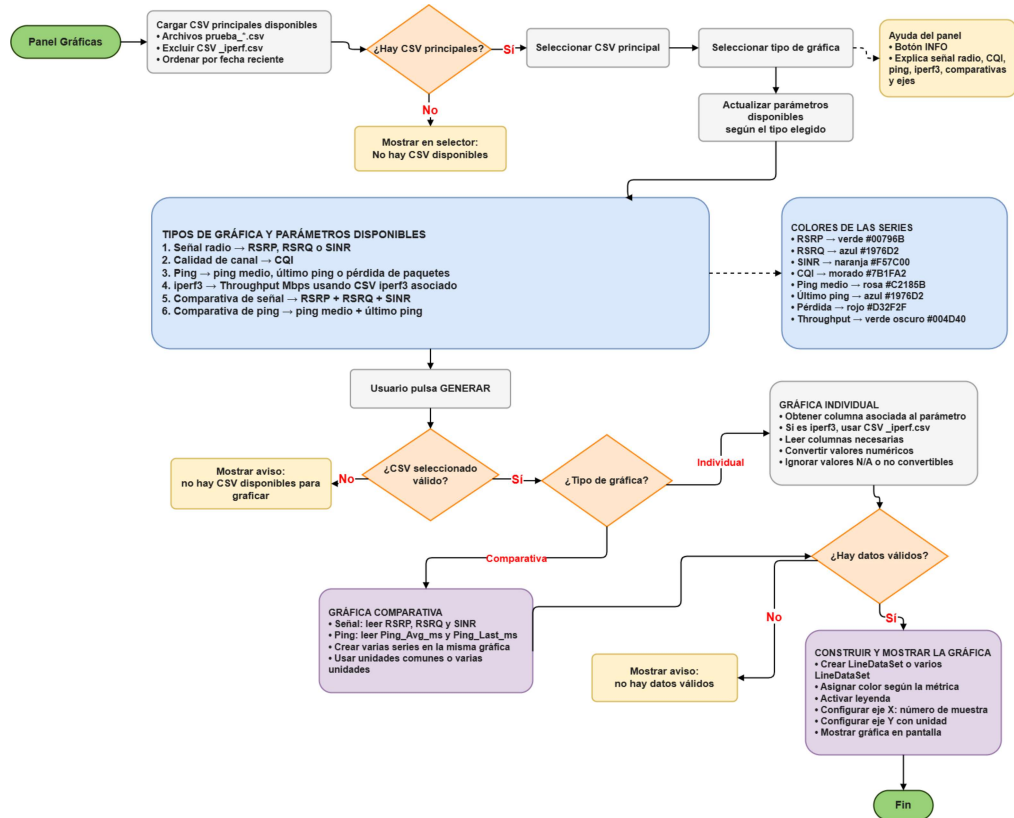


Figura 5.57: Flujo de secuencia del panel de gráficas.

5.4.6. Panel Phone Info

El panel *Phone Info* proporciona información complementaria sobre el dispositivo y la red móvil observada por el terminal. Esta funcionalidad no constituye el núcleo de la aplicación, pero resulta útil para contextualizar las pruebas, especialmente cuando se comparan resultados obtenidos con distintos teléfonos, versiones de Android u operadores.

Desde este panel se puede consultar información como fabricante, modelo, marca, producto, versión de Android, nivel de API, operador de red, operador SIM, red conectada, red de datos, red de voz, tipo de teléfono, estado de la SIM y estado de roaming. Estos datos permiten documentar mejor el entorno desde el que se han obtenido las muestras.



Figura 5.58: Panel de información del dispositivo, la SIM y la red móvil detectada por el terminal.

Además, como apoyo al diagnóstico del terminal, el panel permite acceder a la pantalla de información del sistema Android cuando está disponible.

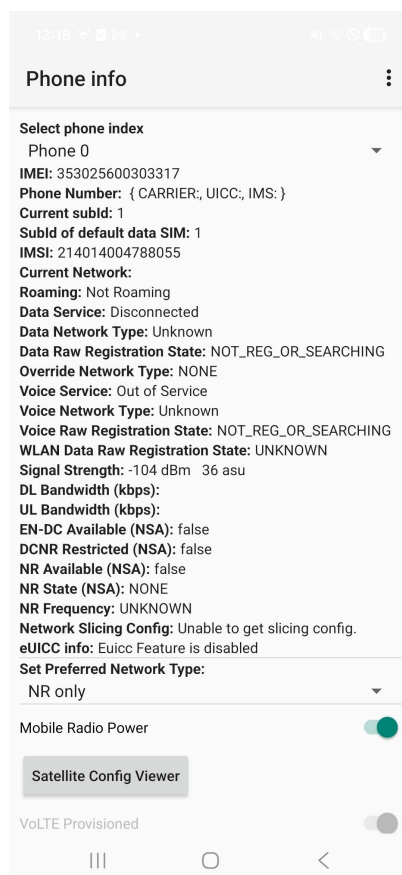


Figura 5.59: Pantalla de información del sistema Android accesible desde el panel Phone Info.

Flujo de secuencia del panel Phone Info

El flujo del panel *Phone Info* comienza cuando el usuario accede al apartado de información. La aplicación muestra el panel correspondiente y carga los datos básicos del dispositivo, como fabricante, modelo, marca, producto, versión de Android y nivel de API.

A continuación, se obtiene el servicio *TelephonyManager*. Si no está disponible en el dispositivo, la aplicación muestra un aviso indicando que no puede acceder a dicha información. Si está disponible, se leen los datos radio básicos, como operador de red, operador SIM, red conectada, tipo de teléfono, estado de la SIM y roaming.

Para acceder a ciertos datos protegidos, como la red de datos y la red de voz, la aplicación comprueba si el permiso `READ_PHONE_STATE` está concedido. Si no lo está, se solicita al usuario. En caso de concederse, se

muestran los datos protegidos junto con el resto de información disponible. Si el permiso se deniega, la aplicación continúa funcionando, pero muestra los campos afectados como no concedidos o no disponibles.

Finalmente, el panel actualiza la información mostrada en pantalla. Desde este apartado, el usuario también puede intentar abrir la pantalla interna de información del sistema Android. Si está disponible en el terminal, se abre dicha pantalla; si no lo está, se muestra un aviso indicando que no se encuentra disponible.

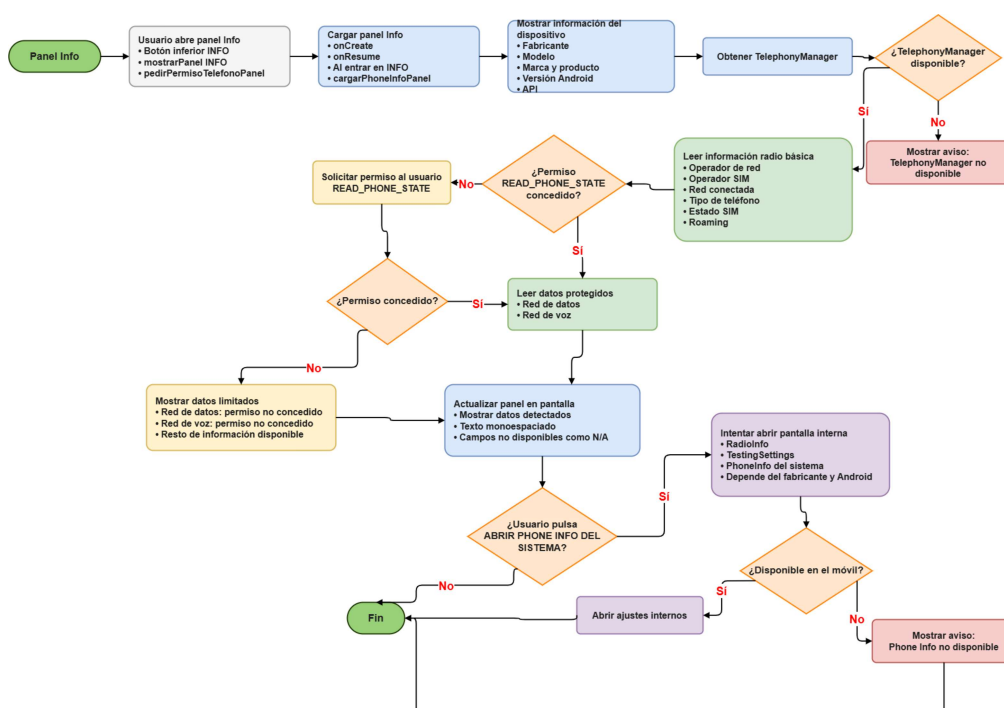


Figura 5.60: Flujo de secuencia del panel Phone Info.

5.4.7. Flujo general de una prueba experimental

El funcionamiento general de *5G Scanner* puede entenderse como un ciclo completo de configuración, captura, almacenamiento y análisis. En primer lugar, se realiza la configuración inicial de la aplicación, donde pueden guardarse u omitirse los datos de Grafana e InfluxDB y configurarse las antenas de referencia. Después, en el panel de medición, se comprueba el permiso de ubicación, se prepara el GPS y se muestran las métricas iniciales.

Cuando el usuario inicia una prueba, debe introducir el servidor de referencia. Si el servidor no es válido, se muestra un aviso y la aplicación permite reintentarlo. Si el servidor es válido, se crea la prueba, se generan el CSV

principal y el CSV de *iperf3*, se reinician los *handovers* y se activa el escaneo junto con el ping automático.

Durante el bucle de escaneo, la aplicación obtiene la ubicación GPS, lee la celda LTE, 5G NSA o 5G NR, registra las métricas radio, calcula la distancia por coincidencia PCI y TAC, detecta *handovers* y guarda las muestras en el CSV principal. Cada 30 segundos se ejecuta el ping automático y se almacenan la latencia media, la pérdida de paquetes y el último RTT. De forma opcional, si InfluxDB está configurado, las muestras también se envían a la base temporal.

Mientras la prueba está activa, el usuario puede ejecutar pruebas manuales de ping e *iperf3*, abrir el mapa de la prueba actual o consultar las antenas configuradas. Al detener el escaneo, se paran los bucles de medida y ping, se reinicia la interfaz, se genera el resumen TXT y se actualizan el historial y las gráficas.

Desde ese momento, los datos pueden analizarse desde distintos paneles. El mapa permite estudiar la distribución espacial de las métricas, los *handovers*, la latencia y los puntos de *throughput*. El historial permite consultar, exportar, borrar pruebas y abrir Grafana si procede. El panel de gráficas facilita una primera inspección temporal de los valores almacenados, mientras que la vista CSV permite revisar el contenido completo de los ficheros y su formato.

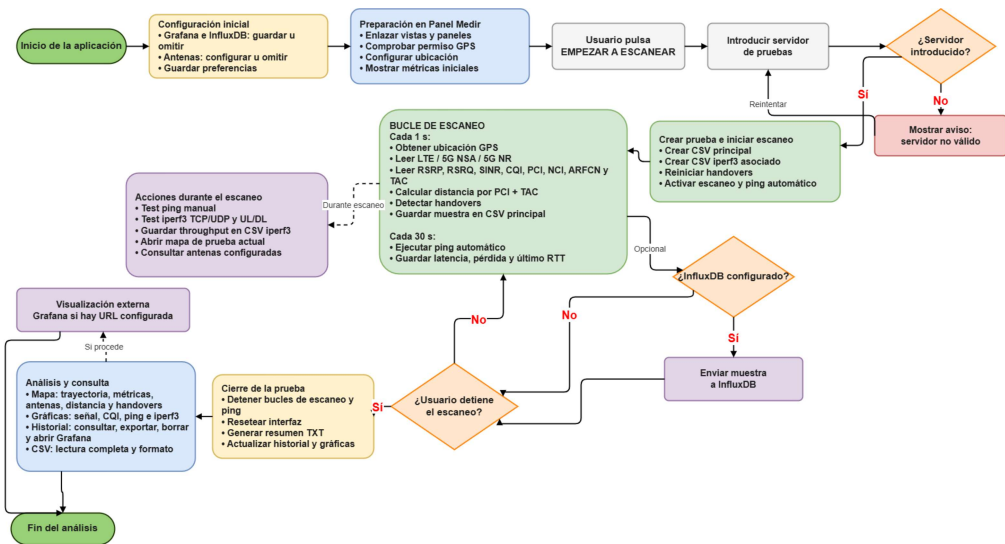


Figura 5.61: Flujo general de funcionamiento de una prueba experimental con 5G Scanner.

En conjunto, *5G Scanner* proporciona una solución práctica para evaluar experimentalmente el comportamiento de la red exterior 5G NR desde

cualquier dispositivo conectado a la red, permitiendo capturar datos reales, geolocalizarlos, almacenarlos y analizarlos de forma coherente con los objetivos del presente trabajo. El código fuente de la aplicación desarrollada se encuentra disponible en el repositorio de GitHub indicado en [55].

Capítulo 6

Pruebas realizadas y análisis de resultados

En este capítulo se presentan las mediciones experimentales realizadas sobre la red exterior 5G NR descrita en el Capítulo 5, así como el análisis de los resultados obtenidos mediante la aplicación *5G Scanner*. A diferencia del capítulo anterior, centrado en la arquitectura del escenario, la configuración de red y la implementación de la aplicación, en este capítulo se analiza el comportamiento observado durante dos mediciones reales.

El objetivo principal ha sido validar el funcionamiento de la aplicación en el entorno 5G NR exterior de WiMuNeT [49], comprobar la captura de métricas radio desde un terminal Android, asociar cada muestra a una posición GPS y analizar la evolución de la conectividad, la calidad radio y la movilidad durante los recorridos experimentales. Para ello, se han utilizado los datos almacenados localmente en CSV, las representaciones espaciales generadas por la aplicación, las gráficas temporales y la visualización externa mediante *Grafana*.

6.1. Metodología de medida

Las mediciones se han realizado sobre el escenario experimental formado por tres celdas NR configuradas en la red privada Amarisoft. Tal como se indica en el capítulo anterior, dichas celdas se identifican mediante el TAC 100 y los PCI 1, 2 y 3. Así, el análisis de resultados se ha centrado en las muestras asociadas a estos identificadores, con el fin de caracterizar únicamente el comportamiento de la red desplegada y evitar que registros externos alterasen los resultados.

La metodología seguida ha consistido en iniciar una prueba desde el

panel de medición de *5G Scanner*, recorrer el entorno exterior próximo al despliegue y registrar de forma periódica las métricas expuestas por el terminal. Además de las muestras radio y de localización, se han ejecutado pruebas activas de conectividad mediante *ping* e *iperf3*, lo que ha permitido complementar el análisis radio con indicadores de comportamiento extremo a extremo.

Los valores no disponibles o empleados por la aplicación como marcadores internos, como -1 en determinadas pruebas activas, se han tratado de forma diferenciada según la métrica analizada. En particular, para el cálculo de la latencia media se han considerado únicamente los valores de *ping* válidos. En el caso de la pérdida de paquetes, se han mantenido los registros con pérdida del 100 %, al representar situaciones en las que no se obtuvo respuesta.

La media aritmética de una métrica x se ha calculado como:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

donde N representa el número de muestras válidas consideradas. Además de la media, se ha utilizado la mediana, ya que permite interpretar mejor métricas afectadas por valores extremos, como la latencia o la pérdida de paquetes. Para un conjunto de valores ordenados $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(N)}$, la mediana se define como:

$$\text{mediana}(x) = \begin{cases} x_{(\frac{N+1}{2})}, & \text{si } N \text{ es impar} \\ \frac{x_{(\frac{N}{2})} + x_{(\frac{N}{2}+1)}}{2}, & \text{si } N \text{ es par} \end{cases}$$

El uso conjunto de media, mediana, valores extremos y representación temporal ha permitido diferenciar entre degradaciones sostenidas y eventos puntuales.

La visualización mediante Grafana se ha utilizado como apoyo complementario al análisis local de la aplicación. En particular, se ha empleado para comprobar la evolución temporal de algunas métricas, diferenciar series por PCI y TAC, y distinguir ejecuciones correctas y erróneas en las pruebas de *iperf3*. No obstante, los cálculos estadísticos del capítulo se han realizado a partir de los ficheros CSV filtrados. Para el tratamiento de los datos y el cálculo de los estadísticos se ha utilizado Microsoft Excel.

En ambas tomas, las ejecuciones de *iperf3* se realizaron empleando el mismo esquema de comunicación extremo a extremo. El terminal actuó como cliente dentro de la DNN *internet*, utilizando la dirección local

10.220.0.2, mientras que el servidor de pruebas se encontraba en la dirección 10.220.0.1, utilizando el puerto 5201. Esta configuración se mantuvo constante en las dos tomas, por lo que las diferencias observadas en *throughput* no se deben a un cambio de servidor o direccionamiento IP, sino a las condiciones radio, la movilidad del terminal y el estado instantáneo de la red durante cada ejecución.

6.2. Mediciones realizadas

Se han realizado dos recorridos de medida sobre el mismo escenario experimental. El primero se ha utilizado como estudio principal para caracterizar el comportamiento de la red, mientras que la segunda se ha empleado como repetición experimental y se realizó sobre un recorrido similar al primero, pero en sentido inverso. De esta forma, se comprueba si las zonas de degradación radio y los cambios de celda se repiten al atravesar el escenario desde la dirección opuesta.

Cuadro 6.1: Resumen de las campañas de medida realizadas.

Parámetro	Primera prueba	Segunda prueba
Identificador	prueba_20260612.065802	prueba_20260615.063130
Fecha	12/06/2026	15/06/2026
Inicio aproximado real	13:00	12:30
Duración aproximada	25.41 min	30.77 min
Registros totales	1507	1837
Muestras válidas 5G NR	1416	1746
Muestras descartadas	91	91
PCI válidos	1, 2 y 3	1, 2 y 3
PCI descartados	681, 802, 315, 192 y 766	60, 392 y 681
Pruebas activas	<i>ping</i> e <i>iperf3</i>	<i>ping</i> e <i>iperf3</i>

En ambos casos se ha aplicado el mismo criterio de filtrado: se han conservado únicamente las muestras pertenecientes al TAC 100 y a los PCI 1, 2 y 3. Las muestras asociadas a otros TAC o PCI se han considerado observaciones externas y no se han incluido en el cálculo principal de las métricas radio.

6.3. Análisis de la primera prueba

La primera prueba, identificada como prueba_20260612_065802, se ha utilizado como análisis principal del comportamiento de la red. En el fichero CSV generado por la aplicación se almacenaron 1507 registros en total, de los cuales 1416 correspondieron a la red experimental. Las 91 muestras restantes se asociaron a otros TAC o PCI detectados puntualmente durante el recorrido.

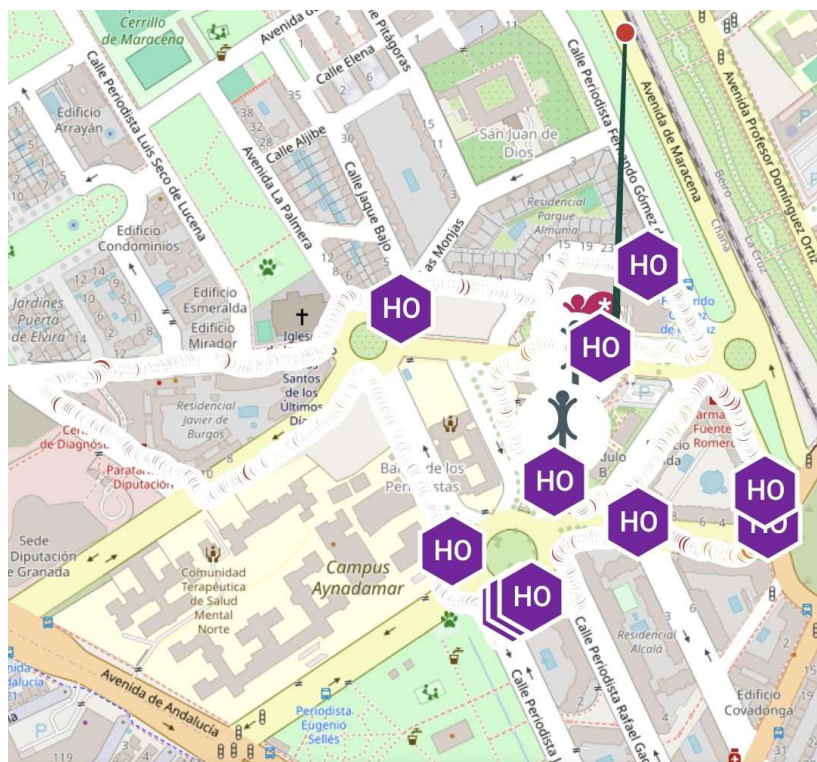


Figura 6.1: Recorrido realizado durante la primera prueba de medida.

El primer recorrido se desarrolló en el entorno exterior próximo a CITIC-UGR y ETSIT. El recorrido no consistió en un único tramo lineal, sino en una trayectoria con varios cambios de dirección. Esto permitió obtener muestras en posiciones con distinta distancia a las celdas, diferentes orientaciones respecto a las antenas y condiciones de propagación variables.

6.3.1. Resultados radio de la primera prueba

La Tabla 6.2 recoge el resumen estadístico de las métricas radio obtenidas en la primera prueba.

Cuadro 6.2: Resumen estadístico de las métricas radio en la primera prueba.

Métrica	Media	Mínimo	Máximo	Mediana
RSRP	-113.92 dBm	-134.00 dBm	-87.00 dBm	-116.00 dBm
RSRQ	-14.21 dB	-20.00 dB	-10.00 dB	-13.00 dB
SINR	3.13 dB	-10.00 dB	22.00 dB	1.00 dB
CQI	6.84	1	15	7
Distancia a celda servidora	171.62 m	13.7 m	420.3 m	151.45 m

Los resultados muestran una cobertura heterogénea. El RSRP medio fue de -113.92 dBm y la mediana de -116.00 dBm, lo que indica que una parte relevante del recorrido se realizó en condiciones de potencia recibida limitada. El SINR medio fue de 3.13 dB, aunque se registraron valores negativos en determinados tramos, lo que evidencia la existencia de zonas con peor calidad efectiva del enlace.



Figura 6.2: Distribución espacial del RSRP durante la primera prueba.



Figura 6.3: Distribución espacial del SINR durante la primera prueba.

En la Figura 6.2 se observa la variación espacial de la potencia recibida, mientras que la Figura 6.3 muestra la distribución de la calidad efectiva del enlace. La comparación entre ambas representaciones confirma que la calidad radio no depende únicamente de la potencia recibida, ya que pueden aparecer zonas con RSRP bajo pero con SINR positivo.

La Figura 6.4 muestra la visualización temporal del RSRP en Grafana. Esta vista separa las series por PCI y TAC y sirve como apoyo para justificar el filtrado aplicado en el análisis. En la figura se han señalado con círculos varios tramos representativos en los que el terminal estuvo asociado a cada PCI servidor. De este modo, se facilita la identificación visual de los intervalos correspondientes a los PCI 1, 2 y 3 y se relaciona la evolución del RSRP con los cambios de celda observados durante el recorrido.

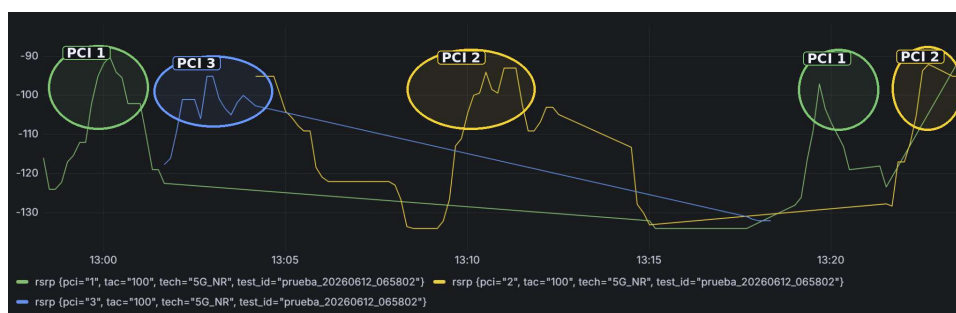


Figura 6.4: Visualización temporal del RSRP en Grafana durante la primera prueba, agrupada por PCI y TAC.

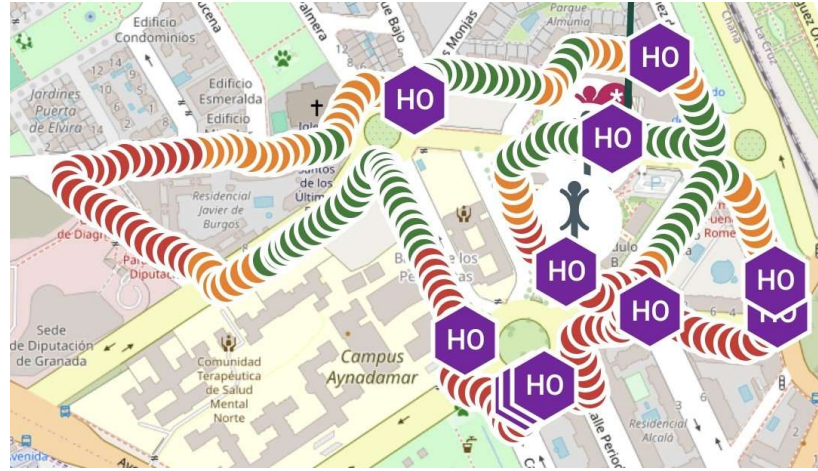


Figura 6.5: Distribución espacial del CQI durante la primera prueba.

La distribución espacial del CQI muestra las zonas donde la calidad de canal estimada por el terminal se reduce de forma clara. Estas zonas coinciden en gran medida con los tramos donde se observaron valores bajos de RSRP y SINR, por lo que el CQI refuerza la interpretación de que la degradación no se debe únicamente a una caída puntual de potencia, sino a una peor calidad efectiva del enlace radio.

Cuadro 6.3: Resumen de métricas radio medias según el PCI registrado en la primera prueba.

PCI	Muestras	RSRP medio	RSRQ medio	SINR medio	CQI medio
1	464	-114.12 dBm	-13.82 dB	3.41 dB	7.02
2	680	-112.87 dBm	-13.36 dB	5.68 dB	6.98
3	272	-116.18 dBm	-16.99 dB	-3.75 dB	6.19

El PCI 2 fue la celda dominante durante la primera prueba, con 680 muestras, lo que representa el 48.02 % del conjunto filtrado. Además, presentó los mejores valores medios de RSRP, RSRQ y SINR. Por el contrario, el PCI 3 mostró el peor comportamiento medio de calidad radio, con un RSRQ medio de -16.99 dB y un SINR medio negativo de -3.75 dB.

El análisis por PCI se ha realizado a partir de los identificadores registrados en el CSV. Durante la primera prueba se observaron transiciones entre los PCI 1, 2 y 3, correspondientes a las tres celdas de la red experimental. Estas transiciones permiten estudiar la movilidad desde la perspectiva del terminal y relacionarla con las variaciones de cobertura, calidad radio y conectividad.

6.3.2. Conectividad en la primera prueba

La Tabla 6.4 resume los principales indicadores de conectividad obtenidos en la primera prueba.

Cuadro 6.4: Resumen de conectividad de la primera prueba.

Métrica	Resultado
<i>Ping</i> medio	83.96 ms
Mediana de <i>ping</i>	20.93 ms
<i>Ping</i> máximo registrado	1460.73 ms
Pruebas <i>iperf3</i> registradas	34 ejecuciones UDP
Pruebas <i>iperf3</i> con estado OK	30 ejecuciones
Pruebas <i>iperf3</i> válidas con <i>throughput</i> positivo	29 ejecuciones
<i>throughput</i> medio válido	18.58 Mbps
Mediana de <i>throughput</i> válido	18.70 Mbps
<i>throughput</i> máximo registrado	37.00 Mbps

La latencia media fue de 83.96 ms, mientras que la mediana fue de 20.93 ms. Esta diferencia indica que la mayor parte de las muestras presentó una latencia moderada, pero existieron picos puntuales que elevaron la media. El máximo registrado fue de 1460.73 ms.

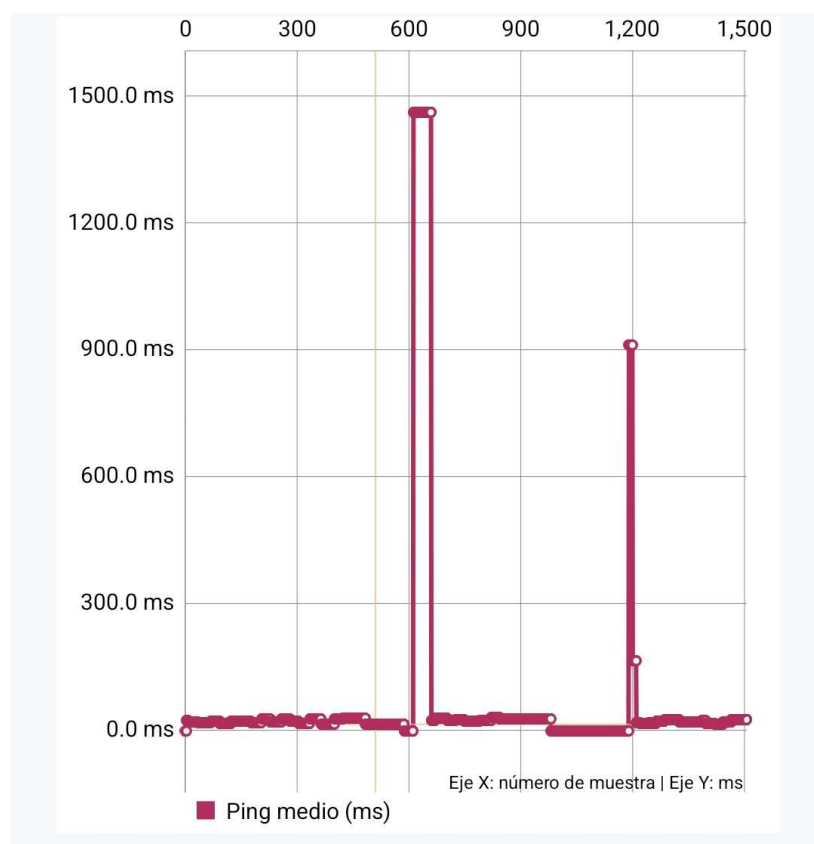


Figura 6.6: Evolución temporal de la latencia durante la primera prueba.

En las pruebas de *throughput* mediante *iperf3*, se registraron 34 ejecuciones UDP. De ellas, 30 finalizaron con estado OK, aunque una devolvió un valor de 0 Mbps. Por este motivo, el análisis del *throughput* efectivo se centró en las 29 ejecuciones con *throughput* positivo, obteniéndose un valor medio de 18.58 Mbps y un máximo de 37.00 Mbps.

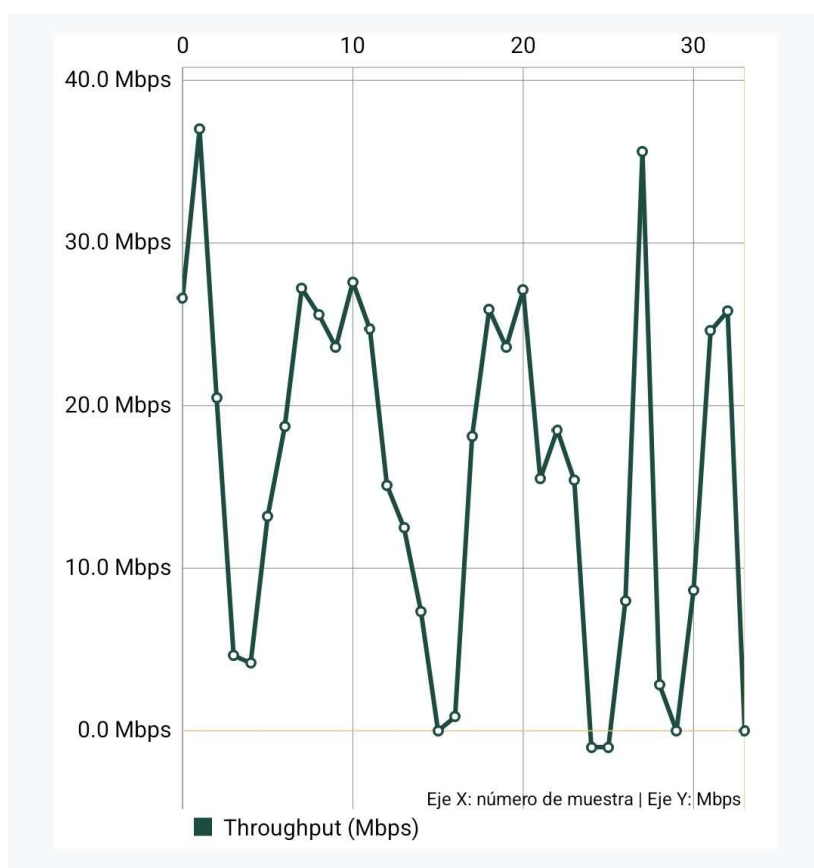


Figura 6.7: Evolución temporal del *throughput* mediante *iperf3* en la primera prueba.

La Figura 6.8 muestra la visualización temporal del *throughput* en Grafana, diferenciando las ejecuciones completadas correctamente de aquellas que finalizaron con error. Esta representación facilita la localización de caídas puntuales de rendimiento.

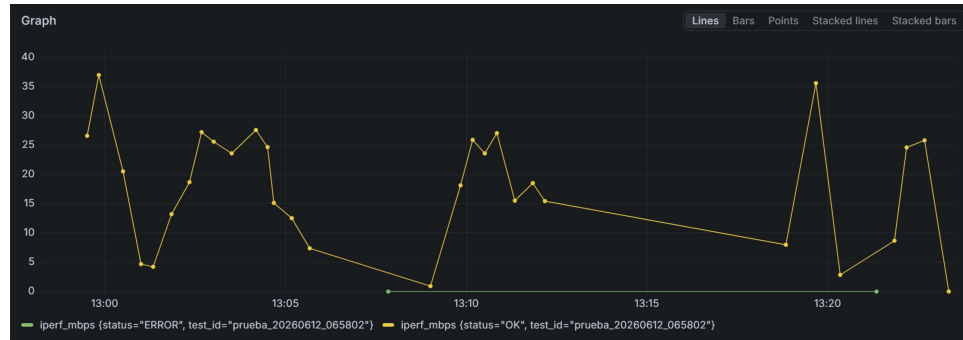


Figura 6.8: Visualización en Grafana del *throughput* obtenido mediante *iperf3* durante la primera prueba, diferenciando ejecuciones correctas y errores.

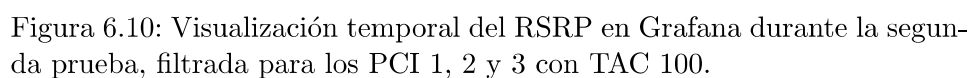
6.4. Análisis de la segunda prueba

La segunda medición, identificada como `prueba_20260615_063130`, se realizó sobre el mismo escenario que la primera, pero siguiendo el recorrido en sentido inverso. Con esta repetición se busca comprobar si los patrones de cobertura, calidad radio, conectividad y movilidad observados en la primera toma se mantienen al variar la dirección del desplazamiento.

El fichero principal de la segunda prueba contiene 1837 muestras. Tras aplicar el filtro de pertenencia a la red 5G NR del escenario, se conservan 1746 muestras, equivalentes al 95.0 % del total. Las 91 muestras descartadas corresponden a PCI no configurados en la red experimental, concretamente PCI 60, PCI 392 y PCI 681.

6.4.1. Resultados radio de la segunda prueba

La Tabla 6.5 muestra los principales estadísticos obtenidos para el conjunto de muestras 5G NR de la segunda prueba.



Las Figuras 6.9, 6.10 y 6.11 permiten comprobar que la segunda prueba reproduce zonas de cobertura heterogénea. Al igual que en la primera prueba, se observan tramos con señal más favorable y zonas con valores de potencia recibida claramente degradados. Además, la distribución espacial del SINR muestra que algunas zonas presentan peor calidad efectiva del enlace, especialmente en tramos donde aparecen valores bajos o negativos.

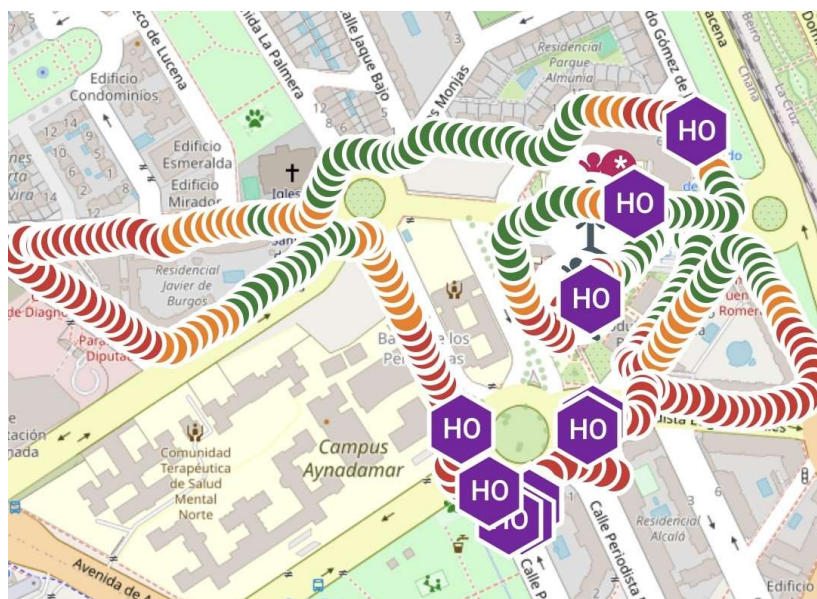


Figura 6.12: Distribución espacial del CQI durante la segunda prueba.

En la segunda prueba, el mapa de CQI vuelve a señalar zonas con una calidad de canal reducida. Su coincidencia con tramos de bajo RSRP y SINR degradado refuerza la interpretación de que la pérdida de rendimiento no responde solo a una caída de potencia, sino también a una peor calidad efectiva del enlace radio.

Cuadro 6.6: Resumen radio por PCI servidor en la segunda prueba.

PCI	Muestras	%	Dist. media	Dist. máx.	RSRP
1	697	39.9	110.7 m	236.0 m	-111.1 dBm
2	967	55.4	182.6 m	420.7 m	-113.6 dBm
3	82	4.7	119.6 m	143.4 m	-131.0 dBm

Cuadro 6.7: Resumen de calidad y conectividad por PCI servidor en la segunda prueba.

PCI	RSRQ	SINR	CQI	Ping medio	Ping máx.
1	-14.3 dB	3.9 dB	7.2	39.1 ms	883.5 ms
2	-13.8 dB	3.8 dB	6.9	82.6 ms	1586.7 ms
3	-18.4 dB	-6.9 dB	2.2	413.5 ms	413.5 ms

Las Tablas 6.6 y 6.7 resumen el comportamiento de cada PCI servidor en la segunda prueba. El PCI 2 fue también la celda dominante, con 967 mues-

tras, lo que representa el 55.4% del conjunto filtrado. Además, concentró el mayor pico de latencia, con 1586.7 ms.

El PCI 3 tuvo menor presencia que en la primera prueba, pero sus valores medios fueron claramente más degradados, con RSRP medio de -131.0 dBm, RSRQ medio de -18.4 dB, SINR medio de -6.9 dB y CQI medio de 2.2.

6.4.2. Conectividad en la segunda prueba

Cuadro 6.8: Resumen de conectividad de la segunda prueba.

Métrica	Resultado
Muestras con <i>ping</i> válido	1675 muestras
<i>Ping</i> medio	81.33 ms
Mediana de <i>ping</i>	21.67 ms
<i>Ping</i> máximo registrado	1586.66 ms
Pruebas <i>iperf3</i> registradas	41 ejecuciones UDP
Pruebas <i>iperf3</i> con estado OK	36 ejecuciones
Pruebas <i>iperf3</i> válidas con <i>throughput</i> positivo	36 ejecuciones
<i>throughput</i> medio válido	19.32 Mbps
Mediana de <i>throughput</i> válido	18.25 Mbps
<i>throughput</i> máximo registrado	38.90 Mbps

En la segunda prueba se obtuvieron 1675 muestras con *ping* válido. La latencia media fue de 81.33 ms, la mediana de 21.67 ms y el máximo registrado de 1586.66 ms. Al igual que en la primera medición, la diferencia entre media y mediana indica que la latencia elevada no fue constante durante todo el recorrido, sino que apareció concentrada en determinados intervalos.

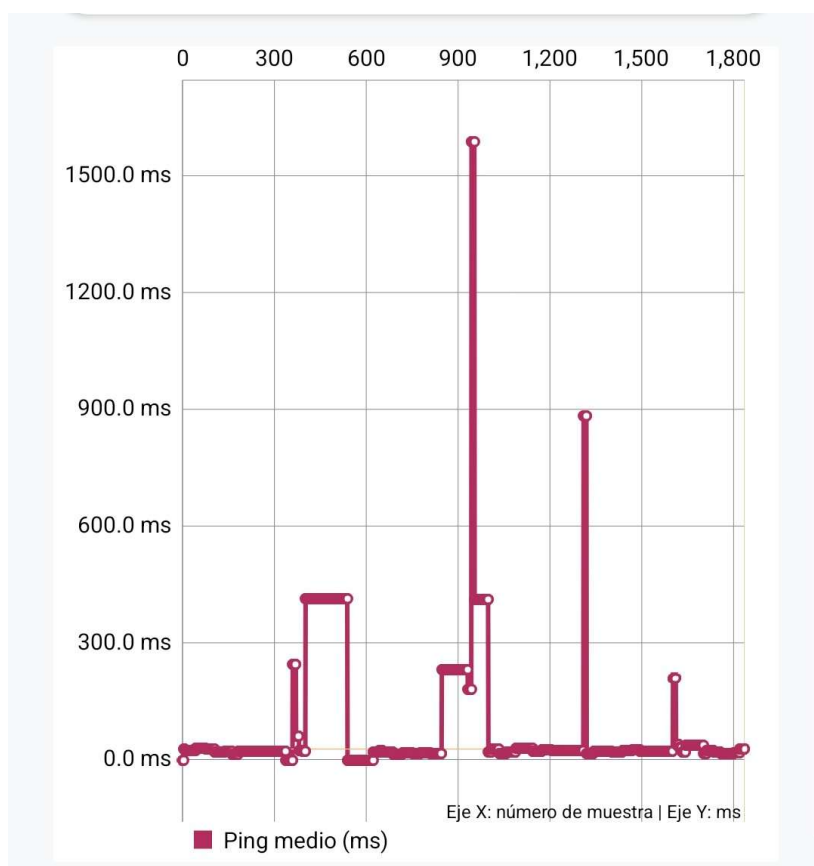


Figura 6.13: Evolución temporal de la latencia durante la segunda prueba.

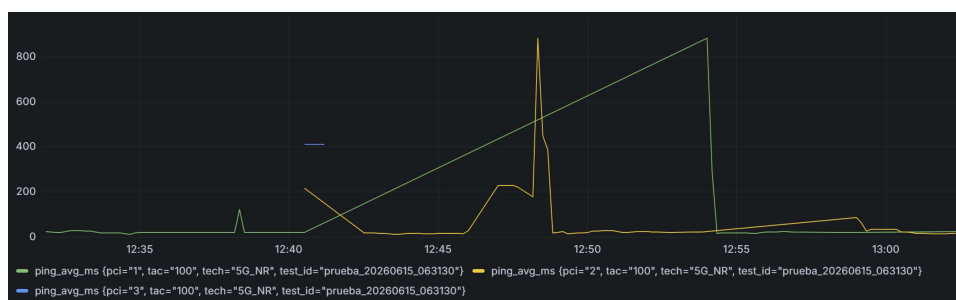


Figura 6.14: Visualización en Grafana de la latencia medida mediante *ping* durante la segunda prueba.

La Figura 6.13 muestra la evolución temporal de la latencia registrada por la aplicación, mientras que la Figura 6.14 presenta la misma métrica visualizada en Grafana. En ambas representaciones se observa que la mayor parte de los valores se mantiene en un rango moderado, aunque aparecen

picos puntuales que explican la diferencia entre la media y la mediana.

En las pruebas de *iperf3* se registraron 41 ejecuciones: 36 finalizaron correctamente con estado OK, 3 presentaron estado ERROR y 2 finalizaron con ERROR_TIMEOUT. El *throughput* medio válido fue de 19.32 Mbps, con un máximo de 38.9 Mbps.

La correlación entre el *throughput* obtenido mediante *iperf3* y el RSRP es aproximadamente 0.81, por lo que se aprecia una relación clara entre la calidad radio y el rendimiento extremo a extremo. No obstante, esta relación no debe interpretarse como una causalidad absoluta, ya que las pruebas de *iperf3* también pueden verse afectadas por el estado del servidor, la ejecución puntual de la prueba, la movilidad del terminal o el estado instantáneo de la red.

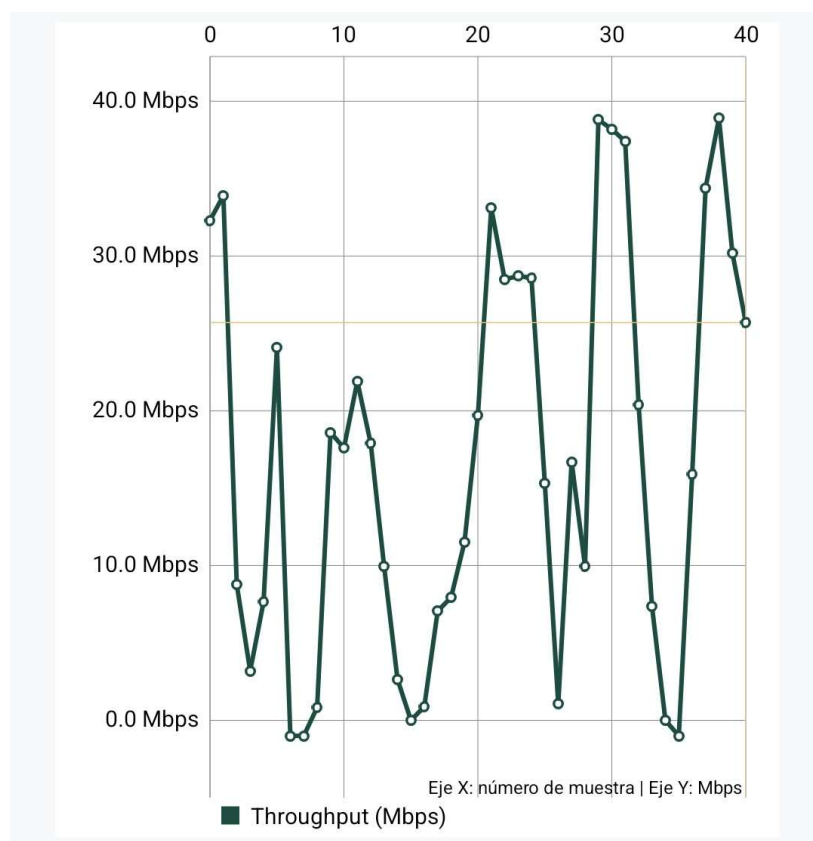


Figura 6.15: Evolución temporal del *throughput* mediante *iperf3* en la segunda prueba.



Figura 6.16: Visualización en Grafana del *throughput* obtenido mediante *iperf3* durante la segunda prueba, diferenciando ejecuciones correctas y errores.

Durante la segunda prueba se observaron seis transiciones principales entre los PCI 1, 2 y 3. Al haberse realizado el recorrido en sentido inverso, estas transiciones permiten comprobar si las zonas de cambio de celda aparecen de forma coherente respecto a la primera campaña. Varias de ellas se produjeron en condiciones radio degradadas, especialmente en zonas donde el RSRP era bajo, el RSRQ estaba degradado y el SINR era negativo. Esto sugiere que la movilidad se produjo principalmente en zonas de borde o solapamiento entre celdas.

6.5. Comparación entre ambas pruebas

La comparación entre ambas medidas permite estudiar la similitud del comportamiento observado y analizar las diferencias existentes entre ellas. Para ello, se han utilizado los mismos criterios de filtrado, los mismos identificadores de red y la misma configuración de pruebas activas.

6.5.1. Comparación global

La Tabla 6.9 resume los principales indicadores globales de ambas pruebas.

Cuadro 6.9: Comparación global entre las dos pruebas 5G NR.

Indicador	Primera prueba	Segunda prueba
Muestras totales	1507	1837
Muestras válidas 5G NR	1416	1746
RSRP medio	-113.92 dBm	-113.41 dBm
RSRQ medio	-14.21 dB	-14.24 dB
SINR medio	3.13 dB	3.34 dB
CQI medio	6.84	6.79
<i>Ping medio</i>	83.96 ms	81.33 ms
Mediana de <i>ping</i>	20.93 ms	21.67 ms
<i>Ping máximo</i>	1460.73 ms	1586.66 ms
<i>throughput</i> medio válido	18.58 Mbps	19.32 Mbps
<i>throughput</i> máximo	37.00 Mbps	38.90 Mbps
Celda dominante	PCI 2	PCI 2

Las métricas radio medias son muy similares en ambas pruebas. El RSRP medio se mantiene alrededor de -113 dBm, el RSRQ medio alrededor de -14 dB y el SINR medio en torno a 3 dB. Por tanto, se aprecia que las condiciones generales del recorrido se reproducen de forma parecida, incluso al realizar la segunda prueba en sentido inverso.

No obstante, en la segunda prueba se identifican más episodios de latencia elevada. Aunque el *ping* medio y la mediana son similares en ambas tomas, el máximo de latencia aumenta hasta 1586.66 ms y el porcentaje de muestras con *ping* superior a 100 ms es mayor, como se muestra en la 6.10.

6.5.2. Comparación de condiciones degradadas

La Tabla 6.10 muestra el porcentaje de muestras que cumplen determinadas condiciones de degradación radio o de conectividad. En las métricas radio, el porcentaje se ha calculado sobre las muestras válidas asociadas a la red experimental en cada prueba. En el caso de *ping* y pérdida de paquetes, se han considerado únicamente las muestras con valores válidos para dichas métricas.

Cuadro 6.10: Porcentaje de muestras que cumplen condiciones de degradación radio y conectividad.

Condición	Primera prueba % de muestras	Segunda prueba % de muestras
RSRP inferior a -110 dBm	55.1 %	60.4 %
RSRQ inferior a -15 dB	33.9 %	34.0 %
SINR inferior a 0 dB	33.9 %	38.6 %
CQI igual o inferior a 6	48.0 %	51.5 %
Tres o más indicadores radio degradados	44.6 %	47.4 %
Ping superior a 100 ms	5.4 %	16.0 %
Pérdida de paquetes superior a 0 %	4.6 %	5.4 %

Se aprecia una degradación radio ligeramente mayor en la segunda prueba. Aumenta el porcentaje de muestras con RSRP inferior a -110 dBm, SINR negativo, CQI bajo y tres o más indicadores radio degradados. La diferencia más relevante se observa en la latencia, ya que el porcentaje de muestras con *ping* superior a 100 ms aumenta del 5.4 % al 16.0 %.

6.5.3. Comparación por PCI servidor

Cuadro 6.11: Comparación radio por PCI servidor.

Prueba	PCI	Muestras	%	Dist. media	RSRP	SINR
1	1	464	32.8	135.2 m	-114.1 dBm	3.4 dB
1	2	680	48.0	214.1 m	-112.9 dBm	5.7 dB
1	3	272	19.2	127.6 m	-116.2 dBm	-3.8 dB
2	1	697	39.9	110.7 m	-111.1 dBm	3.9 dB
2	2	967	55.4	182.6 m	-113.6 dBm	3.8 dB
2	3	82	4.7	119.6 m	-131.0 dBm	-6.9 dB

Cuadro 6.12: Comparación de calidad y conectividad por PCI servidor.

Prueba	PCI	RSRQ	CQI	Ping medio	Ping máx.
1	1	-13.8 dB	7.0	43.9 ms	911.8 ms
1	2	-13.4 dB	7.0	127.0 ms	1460.7 ms
1	3	-17.0 dB	6.2	21.6 ms	27.4 ms
2	1	-14.3 dB	7.2	39.1 ms	883.5 ms
2	2	-13.8 dB	6.9	82.6 ms	1586.7 ms
2	3	-18.4 dB	2.2	413.5 ms	413.5 ms

Las Tablas 6.11 y 6.12 permiten comparar el comportamiento de cada PCI servidor desde dos perspectivas complementarias. La primera resume la presencia de cada celda y las métricas radio principales, mientras que la segunda recoge indicadores de calidad y conectividad asociados a cada PCI.

Se observa que el PCI 2 actúa como celda dominante en ambas campañas. En la primera prueba representa el 48.0% de las muestras y en la segunda aumenta hasta el 55.4%. Además, se identifica como la celda que concentra los mayores picos de latencia en las dos campañas. Por tanto, el PCI 2 resulta especialmente relevante para interpretar los problemas de conectividad observados durante el recorrido.

En el caso del PCI 3 se aprecia una diferencia clara entre pruebas. En la primera campaña aparece en el 19.2% de las muestras, mientras que en la segunda solo aparece en el 4.7%. Además, en la segunda prueba sus valores medios son claramente más degradados, con RSRP de -131.0 dBm, RSRQ de -18.4 dB, SINR de -6.9 dB y CQI medio de 2.2.

6.5.4. Comparación de zonas críticas

La Tabla 6.13 resume los principales tramos críticos detectados en ambas pruebas.

Cuadro 6.13: Comparación de las principales zonas críticas y de los subtramos representados en los mapas.

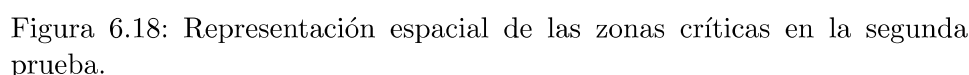
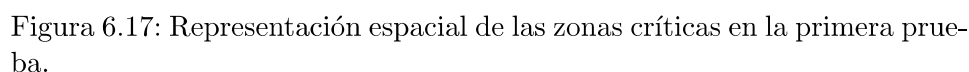
Prueba	PCI	Zona / subtramo	Distancia	RSRP	SINR	Ping máx.
1	2	Entorno de Diputación / Centro de Diagnóstico	257–419 m	-129.1 dBm	-4.1 dB	1460.7 ms
1	1	Entorno de Diputación	247 m	-124.0 dBm	0.0 dB	19.6 ms
1	1	Subtramo de distancia reducida	83–90 m	-119.6 dBm	1.9 dB	20.9 ms
1	1	Entorno Campus Aynadamar	197–249 m	-133.5 dBm	-9.5 dB	25.9 ms
1	1	Entorno calle Periodista Eugenio Sellés / Edificio Aida	116–195 m	-122.6 dBm	-1.5 dB	911.8 ms
2	2	Entorno de Diputación / Centro de Diagnóstico	300–420 m	-128.9 dBm	-3.8 dB	1586.7 ms
2	1	Entorno calle Periodista Eugenio Sellés / Edificio Aida / Módulo B	112–216 m	-127.1 dBm	-3.8 dB	245.4 ms
2	2	Subtramo próximo al Módulo B	54–84 m	-129.4 dBm	-4.6 dB	208.6 ms

Los valores de la Tabla 6.13 se han obtenido a partir de las muestras críticas del fichero de medidas, agrupando los registros por prueba, PCI y proximidad espacial. Por este motivo, algunas filas representan zonas amplias del recorrido, mientras que otras corresponden a subtramos más concretos visibles en los mapas. Aunque durante el recorrido también se registraron muestras asociadas al PCI 3, las zonas críticas principales identificadas en esta comparación se concentran en los PCI 1 y 2.

El resultado más relevante es la repetición del problema asociado al PCI 2 en la zona de mayor distancia a la antena. En la primera prueba se ha identificado un tramo crítico entre 257 m y 419 m, mientras que en la segunda prueba aparece un tramo similar entre 300 m y 420 m. En ambos casos, el RSRP se sitúa alrededor de -129 dBm, el SINR presenta valores negativos y la latencia alcanza valores superiores a 1.4 s. Esta repetición indica que no se trata de un evento aislado, sino de una zona débil del recorrido.

Asimismo, se han detectado tramos críticos asociados al PCI 1, con distancias entre 80 m y 249 m en la primera prueba y entre 91 m y 235 m en la segunda. Estos resultados muestran que la degradación no aparece únicamente en los puntos más alejados de la antena, sino también en zonas de distancia intermedia. Por tanto, además de la separación física respecto a la celda, deben considerarse otros factores como la orientación de las antenas, la presencia de edificios, la vegetación, las zonas de sombra y la posición relativa del terminal respecto a la dirección principal de radiación.

Para interpretar espacialmente estos resultados, se han representado los tramos críticos sobre el mapa del recorrido, diferenciando las muestras asociadas a cada PCI. En las Figuras 6.17 y 6.18 se muestran las zonas críticas detectadas en la primera y segunda prueba, respectivamente. En los mapas de tramos críticos, el PCI 1 se representa en rojo y el PCI 2 en azul.



A partir de esta representación, se observa que los tramos críticos asociados al PCI 2 vuelven a concentrarse en el entorno de Diputación, próximo al Centro de Diagnóstico y a la Parafarmacia Diputación. La presencia de esta zona en ambas pruebas refuerza la hipótesis de que la degradación está relacionada con las condiciones de propagación del entorno y no únicamente con una variación puntual de la medida.

En esta área, la distancia a la celda es elevada, alcanzando valores próximos a 400 m. Mediante la inspección visual del entorno también se aprecia la presencia de edificios, vegetación y cambios en la geometría urbana entre la celda y el terminal. Estos elementos pueden favorecer situaciones de apantallamiento, pérdida parcial de línea de vista o recepción en una dirección menos favorable de la antena.

Para complementar este análisis, se ha realizado una medida aproximada mediante Google Earth [54], empleando el modelo de elevación digital dis-

ponible en la herramienta para obtener una referencia espacial del terreno entre la celda asociada al PCI 2 y uno de los puntos críticos. La distancia en planta obtenida ha sido de aproximadamente 360.43 m, con un rumbo de 257.56° . El perfil de elevación muestra un descenso del terreno desde aproximadamente 666.9 m en el entorno de la celda hasta unos 655.2 m en el punto donde se encontraba el móvil.

Debe tenerse en cuenta que esta medida no representa de forma exacta el enlace radio tridimensional, ya que la antena se encuentra instalada sobre un edificio y el terminal se sitúa a nivel de calle. Además, el perfil mostrado corresponde al terreno o al modelo de elevación digital, por lo que no incluye necesariamente la altura real de la antena ni la de todos los edificios intermedios. Por tanto, la figura se utiliza únicamente como apoyo visual para interpretar la distancia aproximada y la geometría general del entorno.

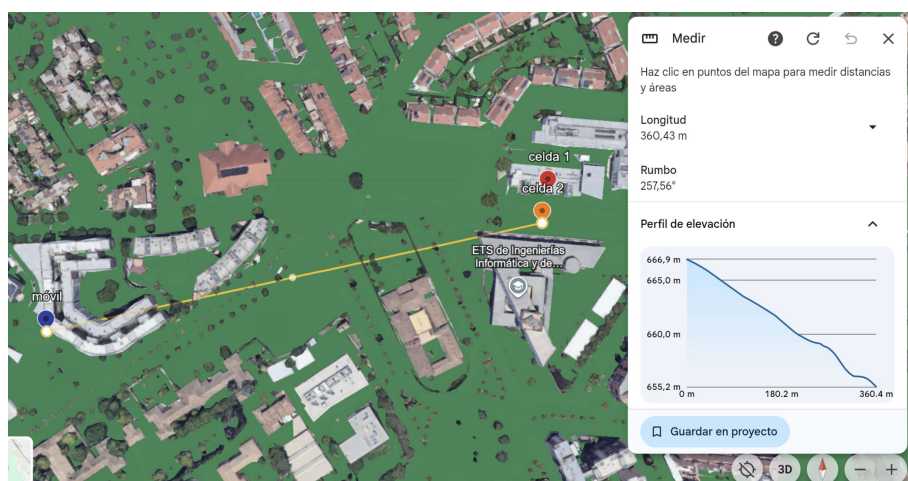


Figura 6.19: Medida aproximada de distancia y perfil de elevación entre la celda asociada al PCI 2 y una zona crítica.

También aparecen tramos problemáticos bajo PCI 1, con RSRP medio en torno a -127 dBm y SINR negativo. En este caso, la distancia no siempre es tan elevada como en el tramo crítico principal del PCI 2, por lo que la degradación no puede explicarse únicamente por la separación física respecto a la antena. En particular, los tramos asociados al PCI 1 aparecen en el entorno de la calle Periodista Eugenio Sellés, el Edificio Aida y el Módulo B, donde existen edificios próximos, vegetación y cambios de dirección en el recorrido.

Para analizar el caso del PCI 1, se ha realizado una segunda medida mediante Google Earth [54], empleando de nuevo el modelo de elevación digital para obtener una referencia espacial entre la celda asociada al PCI 1 y un punto crítico del recorrido. La distancia en planta obtenida ha sido

de aproximadamente 216.64 m, con un rumbo de 128.51° . El perfil de elevación muestra un incremento de cota desde aproximadamente 666.9 m en el entorno de la celda hasta unos 671.7 m en la zona del terminal.

Al igual que en el caso anterior, esta medida debe interpretarse como una aproximación espacial y no como una caracterización exacta del enlace radio. La altura real de la antena, la altura del terminal y la geometría de los edificios intermedios no quedan completamente representadas en el perfil de elevación. Aun así, la figura resulta útil para contextualizar que la degradación del PCI 1 aparece a una distancia intermedia y en un entorno urbano con posibles obstáculos.



Figura 6.20: Medida aproximada de distancia y perfil de elevación entre la celda asociada al PCI 1 y una zona crítica.

Además de las medidas de distancia y elevación, se ha utilizado la vista tridimensional de Google Earth [54] para inspeccionar visualmente la disposición de los edificios en las zonas críticas. Esta vista permite observar la geometría del entorno urbano y la posición relativa entre la celda y el terminal.

En la Figura 6.21 se muestra la vista 3D correspondiente a una tramo crítico asociada al PCI 1. Se aprecia que el dispositivo se encuentra próximo a varios edificios, con posibles obstáculos intermedios y cambios de orientación respecto a la celda. Esta disposición resulta coherente con la hipótesis de que la degradación observada bajo PCI 1 puede estar influida por la geometría del entorno.

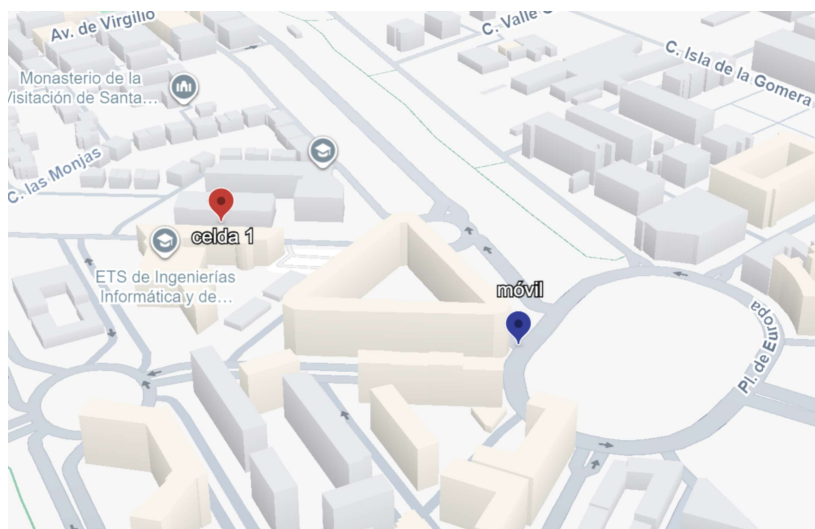


Figura 6.21: Vista 3D del entorno entre la celda asociada al PCI 1 y una zona crítica.

De forma similar, en la Figura 6.22 se muestra la vista 3D correspondiente a una área crítica asociada al PCI 2. En este caso, la separación entre la celda y el terminal es mayor y la trayectoria atraviesa un entorno urbano con edificios intermedios. Esta observación refuerza la interpretación de que la degradación del PCI 2 en la zona de Diputación puede estar relacionada no solo con la distancia, sino también con posibles efectos de apantallamiento, pérdida parcial de línea de vista y orientación del sector.

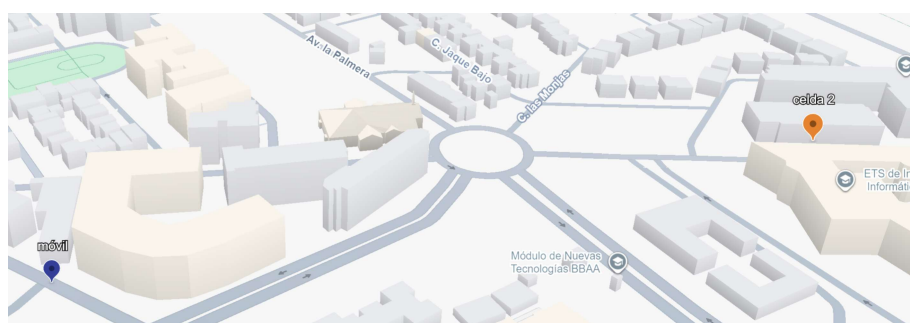


Figura 6.22: Vista 3D del entorno entre la celda asociada al PCI 2 y una zona crítica.

En la segunda prueba se ha añadido una observación relevante: se ha identificado un tramo crítico bajo PCI 2 a una distancia reducida, entre 54 m y 84 m de la antena. Aunque la distancia física es baja, los indicadores radio son desfavorables, con un RSRP medio de -129.4 dBm y un SINR medio de -4.6 dB. Este resultado indica que la proximidad a la antena no

garantiza por sí sola una buena calidad de cobertura. En un despliegue con antenas directivas, la calidad recibida depende también de la orientación del sector, de la posición del terminal respecto a la dirección principal de radiación y de los posibles obstáculos cercanos.

En conjunto, los resultados muestran que las áreas críticas no están determinadas únicamente por la distancia a la celda. Aunque la distancia permite explicar parte de la degradación observada en el tramo más alejado del PCI 2, el análisis espacial sugiere que la orientación de las antenas, la geometría del entorno urbano, la presencia de edificios, la vegetación y la pérdida parcial de línea de vista también pueden influir de forma significativa en las métricas registradas.

Esta interpretación debe considerarse una hipótesis basada en la inspección visual del entorno y en las medidas de distancia y elevación disponibles. Para confirmarla de forma precisa sería necesario disponer de la altura exacta y orientación de las antenas, así como realizar un análisis específico de línea de vista.

6.5.5. Comparación de *throughput*

Cuadro 6.14: Comparación de resultados de *iperf3*.

Indicador	Primera prueba	Segunda prueba
Ejecuciones <i>iperf3</i>	34	41
Ejecuciones con estado OK	30	36
Errores o <i>timeout</i>	4	5
<i>throughput</i> medio válido	18.58 Mbps	19.32 Mbps
Mediana de <i>throughput</i> válido	18.70 Mbps	18.25 Mbps
<i>throughput</i> máximo	37.00 Mbps	38.90 Mbps
Servidor	10.220.0.1	10.220.0.1
Cliente local	10.220.0.2	10.220.0.2
Puerto	5201	5201

Se observa que el *throughput* medio válido es ligeramente mayor en la segunda prueba. Sin embargo, este resultado no implica que la segunda medición presente un comportamiento globalmente mejor, ya que también se registran más episodios de latencia elevada. Además, las medianas de *throughput* son muy próximas en ambas campañas, con 18.70 Mbps en la primera prueba y 18.25 Mbps en la segunda, lo que indica que el rendimiento típico de las ejecuciones válidas fue similar. Así, el rendimiento medio de las pruebas que finalizan correctamente puede considerarse parecido en ambos casos, aunque existen zonas puntuales donde la conectividad se degrada de

forma severa.

Los peores resultados de *iperf3* tienden a aparecer en zonas con mala calidad radio. En la primera prueba se identifica una ejecución con 0.86 Mbps bajo PCI 2, con RSRP de -134 dBm, RSRQ de -20 dB, SINR de -9 dB y CQI igual a 1. En la segunda prueba se observan resultados similares, por ejemplo 0.88 Mbps bajo PCI 2, con RSRP de -130 dBm, RSRQ de -17 dB, SINR de -5 dB y CQI igual a 2.

Cuadro 6.15: Mejores y peores resultados de *throughput* en la red experimental.

Prueba	Caso	<i>throughput</i>	PCI	Distancia	Latitud	Longitud
1	Mejor	37.00 Mbps	1	53.8 m	37.1976183	-3.6236715
1	Peor	0.86 Mbps	2	324.4 m	37.1967113	-3.6278361
2	Mejor	38.90 Mbps	2	29.7 m	37.1976291	-3.6246035
2	Peor	0.88 Mbps	2	331.0 m	37.1974514	-3.6280461

Los mejores valores de *throughput* se obtienen a distancias reducidas de la celda servidora, mientras que los peores resultados válidos aparecen bajo PCI 2 a más de 320 m de su antena.

6.5.6. *Handover* y coordenadas

Las Tablas 6.16 y 6.17 recogen las coordenadas en las que se observaron cambios en el PCI de la celda servidora durante las dos pruebas. Estos cambios se interpretan como indicios de movilidad entre celdas y permiten localizar espacialmente las zonas donde el terminal modificó la celda servidora.

Cuadro 6.16: Coordenadas de las transiciones entre PCI observadas durante la primera prueba.

Trans.	Latitud	Longitud	Distancia	RSRP	SINR	CQI
1-3	37.1982152	-3.6236134	156.9 m	-118 dBm	-4 dB	2
3-2	37.1979073	-3.6258477	143.8 m	-95 dBm	15 dB	5
2-1	37.1961632	-3.6253867	197.3 m	-131 dBm	-7 dB	2
1-3	37.1958296	-3.6246662	128.0 m	-132 dBm	-9 dB	1
3-1	37.1965969	-3.6225596	195.1 m	-128 dBm	-5 dB	1
1-2	37.1966627	-3.6244617	93.9 m	-126 dBm	-5 dB	1
2-1	37.1976265	-3.6240430	21.7 m	-93 dBm	6 dB	15

Cuadro 6.17: Coordenadas de las transiciones entre PCI observadas durante la segunda prueba.

Trans.	Latitud	Longitud	Distancia	RSRP	SINR	CQI
1-2	37.1962191	-3.6242562	142.2 m	-125 dBm	-3 dB	1
2-3	37.1961577	-3.6242964	91.2 m	-127 dBm	-3 dB	3
3-2	37.1961592	-3.6253456	174.9 m	-128 dBm	-5 dB	2
2-1	37.1981259	-3.6233995	90.6 m	-117 dBm	4 dB	1
1-2	37.1970181	-3.6242747	53.6 m	-130 dBm	-5 dB	3
2-1	37.1976477	-3.6239097	32.5 m	-87 dBm	17 dB	6

Se observa que varias transiciones se producen con RSRP bajo, SINR negativo y CQI reducido, lo que indica que los cambios de celda aparecen con frecuencia en zonas de borde o solapamiento de cobertura. No obstante, también existen transiciones con mejores condiciones radio, por lo que estos cambios no dependen únicamente de una pérdida severa de señal, sino también de la configuración de movilidad, la orientación de los sectores y la posición relativa del terminal respecto a las celdas.

Además, se identifican zonas donde las transiciones se repiten en coordenadas muy próximas entre ambas pruebas. Por ejemplo, una transición registrada en la primera prueba en torno a las coordenadas 37.19616, -3.62539 aparece en una zona muy cercana durante la segunda prueba, con una separación aproximada de 3.7 m, aunque no corresponde necesariamente al mismo par de PCI. Asimismo, la transición 2-1 se repite en ambas pruebas en posiciones separadas por unos 12 m. Esto sugiere que determinadas zonas del recorrido presentan condiciones propicias para el cambio de celda de forma recurrente.

6.6. Discusión de resultados

La comparación entre ambas pruebas muestra que el comportamiento radio medio de la red es bastante consistente. En las dos campañas, el RSRP medio se sitúa alrededor de -113 dBm, el RSRQ medio alrededor de -14 dB y el SINR medio en torno a 3 dB. Esto indica que las condiciones generales del recorrido se reproducen de forma similar, incluso al realizar la segunda prueba en sentido inverso.

La principal diferencia entre campañas aparece en la estabilidad de la conectividad. Aunque la mediana de *ping* se mantiene cercana a 21 ms, el porcentaje de muestras con *ping* superior a 100 ms aumenta del 5.4 % al 16.0 % en la segunda prueba. Además, la distribución de muestras por PCI no fue idéntica: el PCI 3 pasó del 19.2 % al 4.7 % de las muestras válidas, lo que pudo influir en los valores medios globales al tratarse de la celda con peor calidad radio media.

El PCI 2 se identifica como la celda dominante en ambas pruebas y también como la celda bajo la que se registran los mayores picos de latencia, especialmente en zonas alejadas o degradadas del recorrido. Se repite una zona crítica a distancias elevadas respecto a su antena, donde coinciden RSRP bajo, SINR negativo, CQI reducido y degradación de las pruebas activas. El análisis de *throughput* mediante *iperf3* refuerza esta interpretación: los mejores valores se obtienen en puntos próximos a la celda servidora, mientras que los peores resultados válidos aparecen bajo PCI 2 a más de 320 m de su antena.

No obstante, la distancia a la antena no explica por sí sola todos los resultados. En la segunda prueba también aparece una zona cercana a la antena asociada al PCI 2 con valores radio degradados, lo que sugiere la influencia de otros factores como la orientación del sector, la directividad del patrón de radiación, los obstáculos del entorno o la posición relativa del terminal respecto al haz principal.

Respecto a la movilidad, en ambas pruebas se observan cambios entre las celdas de la red experimental, especialmente en zonas de baja calidad radio o de transición entre sectores. Al haberse realizado la segunda prueba en sentido inverso, se observa que varias de estas transiciones tienden a concentrarse en zonas similares del recorrido, lo que sugiere la existencia de áreas de solapamiento o borde de cobertura donde el terminal modifica la celda servidora de forma recurrente.

En conjunto, las dos pruebas permiten validar el funcionamiento de *5G Scanner* en un entorno exterior 5G NR real y muestran la utilidad de combinar métricas radio, posición GPS, pruebas de conectividad y eventos de movilidad para caracterizar una red privada. El análisis realizado permite identificar zonas concretas donde sería recomendable optimizar la cobertura, revisar la orientación de antenas o ajustar parámetros de movilidad.

6.7. Limitaciones observadas

Durante la fase de validación experimental se realizaron alrededor de 20 pruebas de medida preliminares. No todas ellas se han incluido en el análisis final, ya que muchas se utilizaron para comprobar el funcionamiento de la aplicación en campo, detectar errores durante el uso real y realizar ajustes posteriores en el código. En algunos casos, al iniciar el recorrido se observaron fallos de registro, problemas en la ejecución de pruebas activas o comportamientos no esperados de la interfaz, por lo que fue necesario corregir la aplicación y repetir las medidas.

Durante la fase inicial de desarrollo también fue necesario validar la aplicación fuera de la red experimental. Para ello se utilizó una tarjeta SIM

de prepago comercial, lo que permitió comprobar que la aplicación capturaba correctamente información de red, métricas radio y datos de conectividad en una red móvil pública. Esta validación previa resultó útil para diferenciar fallos propios de la aplicación de problemas asociados a la configuración del escenario 5G privado.

Además de las incidencias propias del desarrollo de la aplicación, también se detectaron problemas asociados a la configuración de la red exterior Amarisoft. En primer lugar, algunos terminales Samsung no reconocían inicialmente las USIM empleadas en el laboratorio. Tras revisar la configuración, se comprobó que el problema estaba relacionado con el identificador PLMN configurado en la red. Una vez ajustado el PLMN al valor esperado por las USIM, los terminales reconocieron correctamente la red privada y pudieron conectarse al escenario experimental.

En segundo lugar, durante algunas pruebas la celda identificada como PCI 3 no llegaba a conectarse correctamente al terminal o se producían desconexiones durante el recorrido. Tras revisar la configuración del escenario, se comprobó que el problema estaba relacionado con la falta de una dirección IP necesaria para la comunicación entre dicha celda y el resto de la red, lo que impedía que el procedimiento de movilidad funcionase correctamente. Una vez corregida esta configuración, se repitieron las pruebas y se pudieron obtener medidas válidas para el análisis final.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado ha sido analizar el comportamiento de una red privada 5G NR en un entorno experimental real y desarrollar una herramienta Android que permitiera medirla desde la perspectiva de un dispositivo móvil. Para ello, se ha implementado *5G Scanner*, una aplicación orientada a la captura, almacenamiento, representación y análisis de métricas radio, conectividad, posición GPS y movilidad.

El trabajo se ha desarrollado sobre la red exterior 5G NR desplegada en el entorno del CITIC y la ETSIT, basada en equipamiento Amarisoft. Este escenario ha permitido realizar medidas sobre varias celdas identificadas mediante un TAC común y distintos PCI, lo que ha facilitado el análisis de cobertura, calidad radio y cambios de celda durante recorridos en movilidad.

Desde el punto de vista funcional, la aplicación desarrollada permite iniciar y detener pruebas, registrar métricas como RSRP, RSRQ, SINR y CQI, almacenar los datos en ficheros CSV, representar las muestras sobre un mapa y analizar su evolución temporal mediante gráficas. Además, la incorporación de pruebas activas con *ping* e *iperf3* ha permitido complementar las medidas radio con indicadores de conectividad extremo a extremo.

La validación experimental se ha realizado mediante dos pruebas de medida sobre el mismo escenario. En la primera se registraron 1507 muestras, de las cuales 1416 se asociaron a la red experimental. En la segunda se almacenaron 1837 registros, de los cuales 1746 correspondieron a la red objeto de estudio. En ambos casos se aplicó un filtrado basado en el TAC 100 y en los PCI 1, 2 y 3, separando las observaciones externas detectadas durante el recorrido.

Los resultados obtenidos muestran que las métricas radio presentan una variabilidad apreciable, coherente con un entorno exterior en movilidad. La

comparación entre ambas pruebas ha mostrado un comportamiento medio similar, con valores de RSRP próximos a -113 dBm, RSRQ alrededor de -14 dB y SINR medio cercano a 3 dB. También se ha observado que el PCI 2 actúa como celda dominante en las dos pruebas y concentra algunos de los mayores picos de latencia.

El análisis conjunto de métricas radio, posición GPS y pruebas activas ha permitido identificar zonas críticas donde coinciden baja potencia recibida, SINR reducido, CQI bajo y degradación de conectividad.

En relación con la movilidad, la aplicación ha permitido detectar cambios de PCI y relacionarlos con la trayectoria seguida y las condiciones radio registradas. Estos cambios se han interpretado como indicadores de movilidad desde el punto de vista del usuario, sin asumir una confirmación individual de cada procedimiento de handover a nivel de red.

En conjunto, los objetivos del trabajo se han cumplido de forma adecuada. Se ha diseñado e implementado una aplicación funcional, se ha validado en una red exterior 5G NR real y se ha demostrado su utilidad para analizar cobertura, calidad radio, conectividad y movilidad en escenarios experimentales de redes móviles.

7.1. Trabajo futuro

Como continuación de este trabajo, se proponen las siguientes líneas de mejora:

- **Mejorar las pruebas de throughput.** Analizar con más detalle el funcionamiento de *iperf3* en modo TCP y comparar su comportamiento con las pruebas UDP realizadas.
- **Ampliar la visualización cartográfica.** Incorporar mapas de calor, interpolación espacial, leyendas configurables y agrupación de puntos para facilitar la identificación de zonas críticas.
- **Definir un índice global de calidad.** Combinar RSRP, RSRQ, SINR, CQI, latencia y pérdida de paquetes en un único indicador que permita clasificar cada zona del recorrido.
- **Automatizar el análisis de resultados.** Generar informes con estadísticas, número de muestras por PCI, eventos de movilidad, zonas degradadas y resultados de *iperf3*.
- **Comparar varias pruebas automáticamente.** Permitir el análisis conjunto de recorridos distintos, configuraciones de red diferentes o medidas realizadas con varios móviles.

- **Sincronizar las medidas con información de red.** Relacionar los datos obtenidos desde Android con logs del core, trazas de estaciones base o contadores de handover.

Bibliografía

- [1] P. Hung, H. Kan y G. Knopf, “Overview of 5G and 6G,” en *Edge Computing Acceleration: From 5G to 6G and Beyond*, IEEE, 2025, pp. 31–62.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/ebooks/bookPdfWithBanner.jsp?fileName=10783105.pdf&bkn=10783067&pdfType=chapter>, consultado en febrero de 2026.
- [2] “Emerging Technologies in Software, Hardware, and Management Aspects Toward the 5G Era: Trends and Challenges,” en *5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management*, IEEE, 2018, pp. 13–50.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/ebooks/bookPdfWithBanner.jsp?fileName=8496387.pdf&bkn=8496386&pdfType=chapter>, consultado en febrero de 2026.
- [3] “An Overview of 5G Advanced Evolution in 3GPP Release 18,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 77–83, septiembre de 2022.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=9927255>, consultado en febrero de 2026.
- [4] C. A. Gutierrez, O. Caicedo y D. U. Campos-Delgado, “5G and Beyond: Past, Present and Future of the Mobile Communications,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 10, pp. 1702–1736, octubre de 2021.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=9477273>, consultado en febrero de 2026.
- [5] Q. Tang, O. Ermis, C. D. Nguyen, A. D. Oliveira y A. Hirtzig, “A Systematic Analysis of 5G Networks With a Focus on 5G Core Security,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 18298–18319, 2022.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=9709835>, consultado en febrero de 2026.
- [6] W. Flakowski, M. Krasicki y R. Krenz, “Implementation of a 4G/5G Base Station Using the srsRAN Software and the USRP Software Radio

- Module,” 2023, pp. 31–32.
Disponible en: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=srsran+%&btnG=#:~:text=%5BPDF%5D%20Implementation%20of%20a%204g/5g%20base%20station%20using%20the%20srsran%20software%20and%20the%20usrp%20software%20radio%20module, consultado en febrero de 2026.
- [7] Software Radio Systems, “srsRAN Project 5G.”
Disponible en: <https://www.srslte.com/5g>, consultado en marzo de 2026.
- [8] OpenAirInterface Software Alliance, “OpenAirInterface.”
Disponible en: <https://openairinterface.org/>, consultado en marzo de 2026.
- [9] S. S. M. S, M. R. Kanagarathinam y K. M. Sivalingam, “Performance Evaluation of 5G Core Network Control-Plane Using Open5GS and Kubernetes,” 2025.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10885600>, consultado en marzo de 2026.
- [10] Open5GS, “Sitio web oficial de Open5GS.”
Disponible en: <https://open5gs.org/>, consultado en marzo de 2026.
- [11] free5GC, “Sitio web oficial de free5GC.”
Disponible en: <https://free5gc.org/>, consultado en marzo de 2026.
- [12] Amarisoft, “Página de tecnología de Amarisoft.”
Disponible en: <https://www.amarisoft.com/technology/>, consultado en marzo de 2026.
- [13] M. Park, H. Yoo y N. Ko, “Dual-Identifier Configuration for 5G LBO Roaming Using UERANSIM and open5GS,” en *2025 16th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Korea, 2025, pp. 1425–1426.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11388213>, consultado en marzo de 2026.
- [14] A. Güngör, “UERANSIM: 5G UE and RAN Simulator.”
Disponible en: <https://github.com/aligungr/UERANSIM>, consultado en marzo de 2026.
- [15] Amarisoft, “AMARI UE Simbox User Guide.”
Disponible en: https://tech-academy.amarisoft.com/userguide_ue_simbox.doc, consultado en marzo de 2026.

- [16] MathWorks, “5G Toolbox: Simule, analice y pruebe sistemas de comunicaciones 5G y 5G Advanced.”
Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/5g.html>, consultado en marzo de 2026.
- [17] MathWorks, “Wireless Waveform Generator: Create, Impair, Visualize, and Export Modulated Waveforms,” MATLAB Help Center.
Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/wireless-waveformgenerator-app.html>, consultado en marzo de 2026.
- [18] MathWorks, “5G Waveform Analyzer: Analyze and Visualize Imported or Captured 5G Waveforms,” MATLAB Help Center.
Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/5gwaveform-analyzer-app.html>, consultado en marzo de 2026.
- [19] Fraunhofer FOKUS, “Open Mobile Network Toolkit (OMNT).”
Disponible en: <https://www.fokus.fraunhofer.de/en/ngni/testbeds/omnt.html>, consultado en marzo de 2026.
- [20] OMNT, “OpenMobileNetworkToolkit,” repositorio de GitHub.
Disponible en: <https://github.com/omnt/OpenMobileNetworkToolkit>, consultado en marzo de 2026.
- [21] Network Survey, “Network Survey Android.”
Disponible en: <https://networksurvey.app/>, consultado en marzo de 2026.
- [22] C. Rowlands, “Network Survey Android App,” repositorio de GitHub.
Disponible en: <https://github.com/christianrowlands/android-network-survey>, consultado en marzo de 2026.
- [23] Google, “TelephonyManager — Android Developers.”
Disponible en: <https://developer.android.com/reference/android/telephony/TelephonyManager>, consultado en febrero de 2026.
- [24] Google, “CellSignalStrengthNr — Android Developers.”
Disponible en: <https://developer.android.com/reference/android/telephony/CellSignalStrengthNr>, consultado en febrero de 2026.
- [25] R.-G. Lazar, A.-V. Militaru, C.-F. Caruntu, C. Pascal y C. Patachia-Sultanoiu, “Real-Time Data Measurement Methodology to Evaluate the 5G Network Performance Indicators,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 43909–43924, 2023.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10110976>, consultado en abril de 2026.

- [26] D. Fang, Y. Qian y R. Q. Hu, “Secure and Efficient Mobility Management in 5G Wireless Networks,” en *5G Wireless Network Security and Privacy*, IEEE, 2024, pp. 71–87.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10320259>, consultado en abril de 2026.
- [27] 3GPP, “NR and NG-RAN Overall Description; Stage-2,” 3GPP TS 38.300 V17.0.0, Release 17, ETSI.
Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/17.00.00_60/ts_138300v170000p.pdf, consultado en abril de 2026.
- [28] 3GPP, “NG-RAN; Architecture Description,” 3GPP TS 38.401 V15.2.0, Release 15, ETSI.
Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138400_138499/138401/15.02.00_60/ts_138401v150200p.pdf, consultado en abril de 2026.
- [29] International Telecommunication Union, “IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond,” Recommendation ITU-R M.2083-0, ITU-R, septiembre de 2015.
Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I%21%21PDF-E.pdf, consultado en mayo de 2026.
- [30] Google, “Android Studio,” Android Developers.
Disponible en: <https://developer.android.com/studio?hl=es-419>, consultado en mayo de 2026.
- [31] D. Bar-On, “android-iperf3,” repositorio de GitHub.
Disponible en: <https://github.com/davidBar-On/android-iperf3/>, consultado en mayo de 2026.
- [32] GitHub, “GitHub.”
Disponible en: <https://github.com/>, consultado en mayo de 2026.
- [33] osmdroid, “osmdroid,” repositorio de GitHub.
Disponible en: <https://github.com/osmdroid/osmdroid>, consultado en mayo de 2026.
- [34] Oracle, “Java Documentation.”
Disponible en: <https://docs.oracle.com/en/java/>, consultado en mayo de 2026.
- [35] PhilJay, “MPAndroidChart,” repositorio de GitHub.
Disponible en: <https://github.com/PhilJay/MPAndroidChart>, consultado en mayo de 2026.
- [36] InfluxData, “InfluxDB.”
Disponible en: <https://www.influxdata.com/>, consultado en mayo de 2026.

- [37] Grafana Labs, “Grafana Cloud.”
Disponible en: <https://grafana.com/products/cloud/>, consultado en mayo de 2026.
- [38] Google, “LocationManager — Android Developers.”
Disponible en: <https://developer.android.com/reference/android/location/LocationManager?hl=en>, consultado en mayo de 2026.
- [39] Google, “FileProvider — Android Developers.”
Disponible en: <https://developer.android.com/reference/androidx/core/content/FileProvider>, consultado en mayo de 2026.
- [40] Google, “CellSignalStrengthLte — Android Developers.”
Disponible en: <https://developer.android.com/reference/android/telephony/CellSignalStrengthLte>, consultado en mayo de 2026.
- [41] Google, “CellInfo — Android Developers.”
Disponible en: <https://developer.android.com/reference/android/telephony/CellInfo>, consultado en mayo de 2026.
- [42] Google, “CellInfoNr — Android Developers.”
Disponible en: <https://developer.android.com/reference/android/telephony/CellInfoNr>, consultado en mayo de 2026.
- [43] Google, “CellInfoLte — Android Developers.”
Disponible en: <https://developer.android.com/reference/android/telephony/CellInfoLte>, consultado en mayo de 2026.
- [44] The Linux man-pages project, “ping(8) – Linux Manual Page.”
Disponible en: <https://man7.org/linux/man-pages/man8/ping.8.html>, consultado en mayo de 2026.
- [45] MediaMarkt España, “Portátil ASUS VivoBook OLED K3402ZA-KM079W.”
Disponible en: https://www.mediamarkt.es/es/product/_portatil-asus-vivobook-oled-k3402za-km079w-14-wqxga-intelr-coretm-i7-12700h-16gb-ram-512gb-ssd-irisr-xe-graphics-windows-11-home-1544293.html, consultado en mayo de 2026.
- [46] Samsung, “Galaxy A17 5G.”
Disponible en: <https://www.samsung.com/es/smartphones/galaxy-a/galaxy-a17-5g-blue-256gb-sm-a176bzbdeub/>, consultado en mayo de 2026.
- [47] Vodafone España, “Tarjetas SIM prepago.”
Disponible en: <https://www.vodafone.es/c/particulares/es/producto-s-y-servicios/movil/prepago-y-recargas/tarjetas-prepago/>, consultado en mayo de 2026.

- [48] MediaMarkt España, “Samsung Galaxy S24, 128 GB, 8 GB RAM.”
Disponible en: https://www.mediamarkt.es/es/product/_movil-s921bzvdeub-samsung-cobalt-violet-128-gb-8-gb-62-full-hd-samsung-exynos-2400-deca-core-4000-mahmah-136494777.html, consultado en mayo de 2026.
- [49] Universidad de Granada, “Laboratorio WiMuNet.”
Disponible en: <https://wimunet.ugr.es/>, consultado en junio de 2026.
- [50] Alpha Wireless, “AW3923-T0-F Datasheet.”
Disponible en: <https://alphawireless.com/ds/AW3923-T0-F.pdf>, consultado en junio de 2026.
- [51] AW2S, “RRH / RRU.”
Disponible en: <https://www.aw2s.com/solutions/rrh-rru/>, consultado en junio de 2026.
- [52] Quectel, “Quectel RM50xQ Series Hardware Design V1.3.”
Disponible en: https://www.quectel.com/download/quectel_rm50xq_series_hardware_design_v1-3/, consultado en junio de 2026.
- [53] Osmocom, “pySim - Tools for reading, decoding, browsing SIM/USIM/ISIM cards.”
Disponible en: <https://github.com/osmocom/pysim>, consultado en junio de 2026.
- [54] Google, “Google Earth.”
Disponible en: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>, consultado en junio de 2026.
- [55] A. Cabrera Estepa, “5Gexterior,” repositorio de GitHub.
Disponible en: <https://github.com/AlejandraCabreraEst/5Gexterior>, consultado en junio de 2026.

Apéndice A

Manual de usuario de la aplicación 5G Scanner

Este anexo describe el uso básico de la aplicación *5G Scanner*, desarrollada para capturar, visualizar y exportar métricas de red móvil durante las pruebas experimentales realizadas sobre la red 5G NR exterior.

La aplicación permite registrar medidas radio, consultar información del terminal, representar los datos sobre un mapa, generar gráficas y exportar los resultados obtenidos en formato CSV para su análisis posterior.

A.1. Inicio de la aplicación

Al abrir la aplicación, se muestra la pantalla principal de *5G Scanner*. Desde esta pantalla el usuario puede acceder a las funciones principales:

- Inicio y parada de una prueba de medición.
- Visualización de métricas radio en tiempo real.
- Ejecución de pruebas de conectividad mediante *ping*.
- Ejecución de pruebas de caudal mediante *iperf3*.
- Acceso al mapa de medidas.
- Consulta del historial de pruebas.
- Visualización de gráficas.
- Consulta de información del terminal.

Para que la aplicación funcione correctamente, es necesario conceder los permisos solicitados, especialmente el permiso de ubicación. Este permiso permite asociar cada muestra capturada a unas coordenadas GPS y acceder a parte de la información de red proporcionada por Android.

A.2. Configuración inicial

Antes de iniciar una prueba, la aplicación puede solicitar algunos datos de configuración. Entre ellos se encuentra el servidor que se utilizará para las pruebas de conectividad, así como la configuración opcional de servicios externos como InfluxDB o Grafana.

La configuración de InfluxDB y Grafana no es obligatoria. Si estos campos no se rellenan, la aplicación continúa funcionando mediante almacenamiento local en ficheros CSV.

También es posible configurar antenas de referencia indicando su nombre, coordenadas, PCI y TAC. Esta información se utiliza posteriormente para mostrar las antenas sobre el mapa y calcular la distancia aproximada entre el terminal y la antena asociada.

A.3. Realización de una prueba de medición

Para iniciar una prueba, el usuario debe pulsar el botón de inicio de medición desde el panel principal. A continuación, la aplicación solicita el servidor de referencia que se empleará para las pruebas de red.

Una vez iniciada la prueba, la aplicación registra periódicamente información asociada al estado radio del terminal. Entre los parámetros capturados se incluyen:

- PCI.
- RSRP.
- RSRQ.
- SINR.
- CQI.
- TAC.
- Identificador de celda.
- Posición GPS.

- Distancia estimada a la antena.
- Número de cambios de celda o *handovers*.

Durante la medición, la pantalla se actualiza de forma automática mostrando los valores instantáneos obtenidos por el dispositivo. Además, la aplicación clasifica visualmente algunas métricas mediante iconos de cobertura, lo que facilita identificar si la señal es buena, mejorable, mala o no disponible.

A.4. Pruebas de conectividad

Durante una prueba activa, el usuario puede ejecutar pruebas de conectividad mediante *ping*. Esta funcionalidad permite estimar la latencia de la conexión y la pérdida de paquetes.

La aplicación registra valores como:

- Latencia media.
- Último RTT medido.
- Porcentaje de pérdida de paquetes.

Además, la aplicación permite ejecutar pruebas de rendimiento mediante *iperf3*. Estas pruebas permiten medir el caudal extremo a extremo de la conexión, tanto en sentido de subida como de bajada, dependiendo de la configuración seleccionada.

Las pruebas de *iperf3* deben ejecutarse únicamente cuando exista conectividad con el servidor configurado.

A.5. Visualización de medidas en el mapa

La aplicación permite representar las medidas capturadas sobre un mapa. Cada punto mostrado en el mapa corresponde a una muestra registrada durante la prueba y se colorea en función del parámetro seleccionado.

Los parámetros que pueden visualizarse incluyen:

- RSRP.
- RSRQ.
- SINR.

- CQI.
- PCI.
- Latencia.
- *Throughput*.
- Eventos de *handover*.

Esta visualización permite interpretar espacialmente el comportamiento de la red, localizar zonas con menor cobertura, observar cambios de celda y relacionar la calidad radio con la posición del usuario durante el recorrido.

El mapa también puede mostrar las antenas de referencia configuradas previamente. Esto facilita comparar la posición del terminal con la ubicación aproximada de las antenas y analizar la distancia entre ambos elementos.

A.6. Historial de pruebas

Una vez finalizada una prueba, la aplicación guarda los resultados en el almacenamiento interno del dispositivo. Estos resultados pueden consultarse desde el historial de pruebas.

Desde el historial, el usuario puede realizar las siguientes acciones:

- Abrir una prueba guardada.
- Visualizar el CSV principal.
- Consultar el CSV de resultados de *iperf3*.
- Ver el resumen estadístico de la prueba.
- Representar la prueba sobre el mapa.
- Exportar los ficheros generados.
- Eliminar una prueba guardada.

El historial permite recuperar pruebas anteriores sin necesidad de repetir la medición, lo que facilita la comparación entre distintos recorridos o escenarios.

A.7. Exportación de datos

Las medidas registradas se almacenan en ficheros CSV. Estos ficheros pueden exportarse desde la aplicación para analizarlos posteriormente con herramientas externas.

El CSV principal contiene las muestras periódicas de la prueba, incluyendo métricas radio, información de celda, posición GPS y resultados de latencia. Además, cuando se ejecutan pruebas de *iperf3*, la aplicación genera un CSV específico para almacenar los resultados de rendimiento.

Estos ficheros han sido utilizados en el desarrollo del trabajo para calcular indicadores globales, comparar pruebas y representar zonas críticas del recorrido.

A.8. Visualización de gráficas

El panel de gráficas permite representar los datos almacenados en los CSV de forma visual. Para ello, el usuario debe seleccionar una prueba guardada, elegir el tipo de gráfica y escoger el parámetro que desea representar.

La aplicación permite generar gráficas de:

- Señal radio, como RSRP, RSRQ y SINR.
- Calidad de canal, mediante CQI.
- Latencia, mediante resultados de *ping*.
- Pérdida de paquetes.
- *Throughput* obtenido mediante *iperf3*.
- Comparativas entre varias métricas.

Estas gráficas permiten realizar una primera inspección de los resultados sin necesidad de exportar los datos a otra herramienta.

A.9. Información del terminal

La aplicación incluye un panel denominado *Phone Info*, desde el que se puede consultar información general del dispositivo y de la red móvil detectada.

Entre los datos mostrados se encuentran:

- Fabricante y modelo del dispositivo.
- Versión de Android.
- Operador de red.
- Operador de la SIM.
- Tipo de red conectada.
- Estado de la SIM.
- Estado de itinerancia o *roaming*.

Esta información resulta útil para documentar el entorno de prueba y comprobar el estado del terminal antes o durante la realización de las medidas.

A.10. Recomendaciones de uso

Para obtener medidas consistentes, se recomienda seguir estas indicaciones:

- Activar la ubicación GPS del terminal.
- Conceder los permisos solicitados por la aplicación.
- Mantener el dispositivo conectado a la red experimental durante todo el recorrido.
- Introducir correctamente el servidor de pruebas antes de iniciar la medición.
- Ejecutar *iperf3* únicamente cuando exista conectividad con el servidor configurado.
- No cerrar la aplicación durante una prueba activa.
- Exportar los CSV al finalizar las pruebas para evitar la pérdida de datos.

A.11. Finalización de una prueba

Para finalizar una prueba, el usuario debe pulsar el botón de parada de medición. Al detener la prueba, la aplicación deja de capturar muestras, genera los ficheros correspondientes y actualiza el historial.

Después de finalizar la prueba, los datos quedan disponibles para su consulta, representación en mapa, generación de gráficas o exportación.

En conjunto, *5G Scanner* permite realizar pruebas experimentales de red móvil de forma sencilla, registrar métricas reales desde un terminal comercial y analizar posteriormente los resultados obtenidos.

Apéndice B

Estructura de los ficheros CSV generados

Este anexo describe la estructura general de los ficheros CSV generados por la aplicación *5G Scanner*. Estos ficheros se utilizan para almacenar las medidas obtenidas durante las pruebas experimentales y permiten su posterior consulta, exportación y análisis con herramientas externas.

La aplicación genera dos tipos principales de ficheros CSV: un CSV principal con las muestras periódicas capturadas durante la prueba y un CSV específico para los resultados de las pruebas de *iperf3*.

B.1. CSV principal de medidas

El CSV principal almacena las muestras capturadas periódicamente durante una prueba. Cada fila representa una muestra registrada por la aplicación e incluye información temporal, parámetros radio, identificadores de celda, posición GPS y resultados asociados a las pruebas de latencia.

La estructura general del CSV principal es la siguiente:

Columna	Descripción
Timestamp_ms	Marca temporal de la muestra en milisegundos.
Fecha	Fecha y hora de captura de la muestra.
PCI	Identificador físico de celda detectado por el terminal.
NCI	Identificador de celda NR cuando está disponible.
ARFCN	Número absoluto de canal de radiofrecuencia.
TAC	Código de área de seguimiento.
RSRP	Potencia recibida de la señal de referencia, expresada en dBm.
RSRQ	Calidad recibida de la señal de referencia, expresada en dB.
SINR	Relación señal-interferencia-ruido, expresada en dB.
CQI	Indicador de calidad de canal.
Distancia	Distancia estimada entre el terminal y la antena asociada.
Lat	Latitud GPS del terminal.
Lon	Longitud GPS del terminal.
HO_Count	Contador acumulado de cambios de celda detectados durante la prueba.
Ping_Avg_ms	Latencia media obtenida mediante <i>ping</i> , en milisegundos.
Ping_Loss_pct	Porcentaje de pérdida de paquetes obtenido mediante <i>ping</i> .
Ping_Last_ms	Último valor de latencia registrado mediante <i>ping</i> , en milisegundos.

Cuadro B.1: Estructura general del CSV principal de medidas.

Un ejemplo simplificado de cabecera del CSV principal sería:

```
Timestamp_ms,Fecha,PCI,NCI,ARFCN,TAC,RSRP,RSRQ,SINR,CQI,
Distancia,Lat,Lon,HO_Count,Ping_Avg_ms,Ping_Loss_pct,
Ping_Last_ms
```

Los campos asociados a métricas radio pueden aparecer como no disponibles cuando el sistema Android no proporciona dicho valor, cuando el terminal no está conectado a una celda compatible o cuando existen restricciones de acceso a la información. De forma similar, los campos asociados a *ping* solo contienen valores válidos cuando se ha ejecutado una prueba de latencia y se ha obtenido una respuesta correcta.

B.2. CSV de resultados de iperf3

Además del CSV principal, la aplicación genera un fichero CSV específico para almacenar los resultados de las pruebas de *iperf3*. Esta separación se debe a que las pruebas de caudal no se ejecutan de forma continua, sino en instantes concretos durante la medición.

La estructura general del CSV de *iperf3* es la siguiente:

Columna	Descripción
Timestamp_ms	Marca temporal de la prueba en milisegundos.
Fecha	Fecha y hora de ejecución de la prueba.
Iperf_Mbps	Caudal medido mediante <i>iperf3</i> , expresado en Mbps.
Iperf_Status	Estado de la prueba, indicando si finalizó correctamente o si se produjo algún error.
Lat	Latitud GPS del terminal en el momento de la prueba.
Lon	Longitud GPS del terminal en el momento de la prueba.
Iperf_Raw	Salida completa generada por <i>iperf3</i> .

Cuadro B.2: Estructura general del CSV de resultados de *iperf3*.

Un ejemplo simplificado de cabecera del CSV de *iperf3* sería:

Timestamp_ms,Fecha,Iperf_Mbps,Iperf_Status,Lat,Lon,Iperf_Raw

El campo **Iperf_Status** permite diferenciar las pruebas completadas correctamente de aquellas que no han podido finalizar, por ejemplo por falta de conectividad, error de servidor o tiempo de espera agotado. En estos casos, la aplicación conserva el registro de la prueba para que pueda analizarse posteriormente junto con la posición GPS y el resto de medidas disponibles.

B.3. Uso de los CSV en el análisis experimental

Los ficheros CSV generados por *5G Scanner* constituyen la base del análisis experimental realizado. A partir del CSV principal se pueden estudiar la evolución de la señal radio, la calidad de canal, los cambios de celda, la latencia y la posición del terminal durante el recorrido.

Por su parte, el CSV de *iperf3* permite analizar el rendimiento extremo a extremo de la conexión en los puntos donde se han ejecutado pruebas de caudal. Al incluir la posición GPS, estos resultados pueden representarse sobre el mapa y compararse con las condiciones radio observadas en el mismo entorno.

Gracias a esta estructura, los datos registrados por la aplicación pueden utilizarse tanto dentro de *5G Scanner*, mediante el historial, el mapa y las gráficas, como fuera de la aplicación mediante herramientas externas de análisis.