



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

**“INFRAESTRUCTURA PARA EL MONITOREO DE RESCATISTAS EN ÁREAS
REMOTAS BASADO EN LoRaWAN Y GPS”**

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Desarrollo, aplicación de software y cyber security (seguridad cibernética).

Autor:

Huayra Anderson Santillán Túquerres

Director:

PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi

Ibarra - Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1050378437		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Santillán Túquerres Huayra Anderson		
DIRECCIÓN:	Natabuela, Jaime Roldós Aguilera y E35		
EMAIL:	andersonsanty17@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0995964545

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Infraestructura para el Monitoreo de Rescatistas en Áreas Remotas basado en LoRaWAN y GPS
AUTOR:	Santillán Túquerres Huayra Anderson
FECHA: DD/MM/AAAA	13/03/2026
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi MSc. Ana Cristina Umaquina Criollo

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 13 días del mes de marzo de 2026

EL AUTOR:

.....
Nombre: Santillán Túquerres Huayra Anderson



Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Certificación del director del trabajo de grado

En mi calidad de director del trabajo de grado “Infraestructura para el Monitoreo de Rescatistas en Áreas Remotas basado en LoRaWAN y GPS”, presentado por el egresado Huayra Anderson Santillán Túquerres, que opta por el título de ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 13 de marzo de 2026

PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi
Director de Tesis



Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Tribunal Examinador del trabajo de titulación, “Infraestructura para el Monitoreo de Rescatistas en Áreas Remotas basado en LoRaWAN y GPS”, Elaborado por Huayra Anderson Santillán Túquerres, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, 13 de marzo de 2026

PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi
Director de Tesis

MSc. Ana Cristina Umaquinga Criollo
Asesor de Tesis

Dedicatorias

Dedico este trabajo de grado principalmente a Dios por ser el pilar fundamental de mi vida y por darme aliento para seguir adelante.

A mis padres, Marco Santillán y Josefina Túquerres, por darme la oportunidad de estudiar, por brindarme todo lo necesario para que termine mi carrera y por inculcarme buenos valores. Todo lo que he logrado es por su dedicación y esfuerzo, son un verdadero ejemplo a seguir.

También dedico este trabajo a mis hermanos por ser siempre buenos conmigo y por hacerme pasar buenos momentos en el transcurso de mi vida.

En esta nueva etapa de mi vida, con la ayuda de Dios, les devolveré todo el apoyo que me han brindado.

Por último, con mucha humildad me lo dedico a mí mismo, sabiendo que con esfuerzo y dedicación puedo alcanzar grandes cosas.

Esto es solo el comienzo; un objetivo cumplido en un camino de muchos sueños por alcanzar. Porque los sueños... no tienen fin.

Agradecimientos

Primeramente, quiero darle gracias a Dios por darme la fortaleza para afrontar las adversidades y por siempre estar conmigo.

A mi familia por ser la principal fuente de inspiración para terminar mi carrera universitaria. Quiero agradecer profundamente a mis padres por el sustento y el sacrificio que han hecho, ya que siempre han estado para mí cuando he necesitado su ayuda en cada paso de mi formación. Gracias por haberme brindado su amor incondicional. Yo siempre los llevaré en mi corazón.

Agradezco a mis hermanos que me ayudaron con su tiempo y los recursos técnicos para realizar los experimentos de este trabajo y por hacerlo con mucha dedicación.

A mi tutor y asesora, quienes me brindaron su conocimiento y gracias a su guía pude culminar este trabajo.

También quiero agradecer a mis compañeros de la Universidad por todos los momentos que compartimos.

Resumen

Monitorear en tiempo real a los rescatistas es clave para decidir correctamente durante emergencias en zonas remotas. Sin embargo, en Ibarra, la falta de tecnología y la mala cobertura celular por la topografía complican el envío de coordenadas. Ante esto, este proyecto propone una solución telemática propia basada en LoRaWAN y GPS, diseñada para fortalecer la seguridad y eficiencia en las misiones de campo.

La arquitectura implementada utiliza nodos TrackerD, un gateway a 915 MHz y servicios en la nube como The Things Network y Firebase, además de una estación de control programada en Python. Al concentrar el uso de datos móviles solo en el gateway, el sistema puede trabajar en áreas donde los teléfonos convencionales fallan. Para validar el diseño, se realizaron pruebas en condiciones de LOS moderado, obstrucción topográfica y zonas rurales.

Los datos obtenidos revelan que, con línea de vista y configuración SF7, se logró comunicación estable a 1,90 km con un error de GPS menor a 17 m. En pruebas rurales más exigentes (SF10), la infraestructura decodificó señales con un SNR crítico de -17,8 dB, mientras que el uso de ADR permitió recibir con éxito el 90 % de los paquetes. Estos resultados confirman que la red es capaz de vencer la atenuación forestal. En conclusión, el sistema es una alternativa viable y efectiva para el rastreo en zonas incomunicadas, aunque la topografía extrema sigue siendo el desafío principal a resolver.

Palabras clave: LoRaWAN, Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), monitoreo remoto, sistemas de respuesta a emergencias.

Abstract

Real-time monitoring of rescue personnel is vital for effective decision-making during emergencies in remote areas. In Ibarra, the lack of infrastructure and poor cellular coverage due to terrain make it difficult to transmit location data. To address this, this project develops a custom telematics solution using LoRaWAN and GPS, designed to strengthen operational safety and efficiency in field missions.

The architecture utilizes TrackerD nodes, a 915 MHz gateway, and cloud services like The Things Network and Firebase, along with a Python-based monitoring station. By concentrating cellular connectivity solely at the gateway, the system functions in areas where conventional phones fail. To validate the design, field tests were conducted in forested environments with moderate vegetation.

The results show that under line-of-sight (LOS) conditions and an SF7 configuration, stable communication was established at 1.90 km, with GPS errors under 17 m. In more demanding rural tests using SF10, the infrastructure successfully decoded signals with a critical SNR as low as -17.8 dB, while the ADR algorithm achieved a 90 % packet delivery rate. These findings confirm that the network can overcome forest attenuation. In conclusion, the system is a viable and effective alternative for tracking in disconnected zones, although extreme topography remains the primary challenge to overcome.

Keywords: LoRaWAN, Global Positioning System (GPS), remote monitoring, emergency response systems.

Índice general

Autorización de uso y publicación a favor de la Universidad Técnica del Norte	II
Certificación del director del trabajo de grado	III
Aprobación del comité calificador	IV
Dedicatorias	V
Agradecimientos	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
Índice general	IX
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVI
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Específicos	2
1.3. Alcance	2

1.4. Justificación	3
II. MARCO REFERENCIAL	4
2.1. Estado del Arte	4
2.2. Marco Teórico	7
2.2.1. Internet de las Cosas (IoT)	7
2.2.2. Redes LPWAN	8
2.2.3. Tecnología LoRA	8
2.2.3.1. Canal	9
2.2.3.2. Ancho de banda	9
2.2.3.3. Factor de dispersión	9
2.2.3.4. Potencia transmitida	9
2.2.3.5. Indicador de intensidad de señal recibida	9
2.2.3.6. Relación señal-ruido	10
2.2.4. Antenas y propagación de radiofrecuencia	10
2.2.5. Red LoRaWAN	11
2.2.5.1. Dispositivos finales	12
2.2.5.2. Equipos gateway	12
2.2.5.3. Servidor de red (The Things Network)	13
2.2.5.4. Servidores de aplicación	13
2.2.5.5. Firebase (Realtime Database)	13
2.2.5.6. SQLite	14
2.2.5.7. Protocolos de comunicación LoRaWAN	14
2.2.5.8. Seguridad en LoRaWAN	15
2.2.6. Sistema de posicionamiento global	16
2.2.7. Combinaciones de GPS con redes de alta latencia	17
2.2.7.1. Redes LoRaWAN	17
2.2.7.2. Redes celulares	17
2.2.7.3. Redes satelitales	18
2.2.7.4. Redes malladas (mesh)	18

III. MARCO METODOLÓGICO	19
3.1. Modelo de Investigación	19
3.2. Diseño de la investigación	20
3.2.1. Fase 1: Análisis de información sobre sistemas de posicionamiento global	20
3.2.2. Fase 2. Diseño de la infraestructura	20
3.2.3. Fase 3. Construcción del sistema	21
3.2.4. Fase 4. Pruebas de funcionamiento	22
IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS	23
4.1. Diagrama de bloques de la infraestructura	23
4.2. Dispositivo final (Dragino TrackerD)	24
4.2.1. Criterio de selección del dispositivo final	24
4.2.1.1. Modo normal	26
4.2.1.2. Modo transporte	26
4.2.1.3. Modo alarma	26
4.2.2. Configuración del TrackerD mediante comandos AT	27
4.2.2.1. Comandos AT aplicados al TrackerD	27
4.3. Gateway Dragino LPS8v2	28
4.3.1. Criterio de selección del gateway	28
4.3.2. Configuración avanzada del gateway	30
4.4. Antena Dragino BLG-AN-040 exterior de fibra de vidrio (915 MHz)	35
4.5. The Things Network	36
4.5.1. Registro de gateway	36
4.5.2. Registros de los TrackerD	37
4.6. Funciones de Google Cloud	39
4.7. Firebase Realtime Database	39
4.7.1. Creación de proyecto en Firebase	39
4.7.2. Creación de una función en Google Cloud	41
4.7.3. Configuración en The Things Network	43
4.8. Estación de monitoreo	44

4.8.1.	Arquitectura lógica del software	44
4.8.2.	Lógica central (Python)	46
4.8.3.	Eliminación de datos de Firebase	47
4.8.4.	Gestión de dispositivos	48
4.8.5.	Despliegue de mapa	48
4.8.5.1.	SQLite	49
4.8.5.2.	Reporte CSV	49
4.8.6.	Control de modos	49
4.8.7.	Empaquetado del software	51
4.9.	Pruebas y validación	52
4.9.1.	Funcionamiento del software de la estación de monitoreo	52
4.9.2.	Pruebas de funcionamiento del gateway en un vehículo	54
4.9.3.	Validación de los TrackerD	57
4.9.3.1.	Evaluación del sistema sobre un automóvil	58
4.9.3.2.	Evaluación de la infraestructura bajo LOS moderado y comparación con Google Maps	60
4.9.3.3.	Evaluación de la infraestructura en condiciones de obstrucción topográfica	65
4.9.3.4.	Evaluación del sistema en zona rural	66
V.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO	71
5.1.	Conclusiones	71
5.2.	Recomendaciones	72
5.3.	Trabajo a futuro	73
Anexos		79
A.1.	Anexo A. Códigos fuente de la función de Google Cloud	79
A.2.	Anexo B. Código en Python del programa <i>Estación de Monitoreo</i>	81
A.3.	Anexo C. Tablas de datos del experimento en un automóvil	81
A.4.	Anexo D. Tablas de datos del experimento con LOS moderado	84

A.5. Anexo E. Tablas de datos del experimento en zona rural	86
---	----

Índice de figuras

2.1. Arquitecturas comunes de IoT [1]	7
2.2. Patrón de radiación de una antena omnidireccional [2].	11
2.3. Arquitectura LoRaWAN [3].	12
2.4. Clases de dispositivos LoRa [4].	15
2.5. Seguridad LoRaWAN [5].	16
2.6. Satélites GPS [6].	17
4.1. Diagrama de bloques de la infraestructura y red	24
4.2. TrackerD [7]	25
4.3. Configuración del monitor serial	27
4.4. Gateway Dragino LPS8v2 [8]	30
4.5. Configuración mediante WiFi [8]	30
4.6. Inicio de sesión para la configuración.	31
4.7. Configuración avanzada.	32
4.8. Configuración Red Celular	33
4.9. Configuración LoRa.	34
4.10. Configuración LoRaWAN Semtech UDP.	34
4.11. Antena Dragino BLG-AN-040 [9]	35
4.12. Creación de cuenta en TTN.	36
4.13. Registro de gateway.	36
4.14. Ingreso de la puerta de enlace EUI.	37
4.15. Agregar aplicación.	37

4.16. Registro de dispositivo final.	38
4.17. Ingreso de información del TrackerD.	38
4.18. Configuración del decodificador.	39
4.19. Creación de base de datos.	40
4.20. Opciones de base de datos.	40
4.21. Reglas de seguridad.	41
4.22. Configuración De función de Google Cloud.	42
4.23. Modificación de códigos fuente.	42
4.24. Agregar webhook.	43
4.25. Configuración webhook.	44
4.26. Diagrama de bloques del software.	45
4.27. Instalación de SDK firebase-admin.	46
4.28. Creación de nueva clave privada.	46
4.29. Referencia a la credencial.	47
4.30. Registro del endpoint.	47
4.31. Instalación de librería tkintermapview.	48
4.32. Instalación de librería paho-mqtt.	49
4.33. Añadir clave API.	50
4.34. Variables de configuración MQTT.	50
4.35. PyInstaller.	51
4.36. Convertir a ejecutable.	51
4.37. Seguimiento de los TrackerD.	52
4.38. Interfaz del Centro de Comandos.	53
4.39. Activación del Modo Alarma.	53
4.40. Activación del Modo Normal.	54
4.41. Conexión del gateway a puerto USB de un vehículo.	55
4.42. Adaptación de la Antena en un automóvil.	56
4.43. Verificación de conexión celular.	57
4.44. Mapa de prueba en un parque.	61

4.45. Comparación de ubicación con GoogleMaps.	63
4.46. Mapa de prueba con obstrucción topográfica.	66
4.47. Mapa de prueba en zona rural.	68

Índice de tablas

4.1. Características de dispositivos finales.	25
4.2. Comandos AT utilizados.	28
4.3. Características de los Gateways.	29
4.4. Datos de los TrackerD sobre un vehículo.	58
4.5. Métricas de la prueba sobre un automóvil del tracker-a.	59
4.6. Métricas de la prueba sobre un automóvil del tracker-b.	60
4.7. Métricas de la prueba en LOS moderado del trackerd-a.	62
4.8. Error con respecto a Google Maps del trackerd-a.	64
4.9. Métricas de la prueba en LOS moderado del trackerd-b.	64
4.10. Error con respecto a Google Maps del trackerd-b.	65
4.11. Métricas de la prueba en zona rural del tracker-a.	70
4.12. Métricas de la prueba en zona rural del tracker-b.	70
C.1. Registros detallados de posicionamiento del trackerd-a en prueba de automóvil.	82
C.2. Registros detallados de posicionamiento del trackerd-b en prueba de automóvil.	83
D.3. Registros detallados de posicionamiento del trackerd-a en la prueba de parque.	84
D.4. Registros detallados de posicionamiento del trackerd-b en la prueba de parque.	85
E.5. Registros detallados de posicionamiento del trackerd-a en prueba en zonal rural.	86
E.6. Registros detallados de posicionamiento del trackerd-b en prueba en zonal rural.	87

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El monitoreo en tiempo real de los equipos de rescate optimiza la toma de decisiones durante las emergencias. La adquisición de parámetros espaciales, como la ubicación geográfica exacta, minimiza los tiempos de respuesta operativa y reduce el riesgo de pérdidas humanas [10].

La implementación de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) en operaciones de salvamento registra un incremento significativo a nivel global [11]. En la actualidad, diversos cuerpos de emergencia emplean dispositivos tecnológicos integrados para el control de su personal. Sin embargo, los equipos de rescate en la ciudad de Ibarra carecen de esta tecnología.

Durante las misiones de auxilio, el personal emplea herramientas básicas de comunicación o sensores aislados. El entorno local no dispone de una infraestructura integral de hardware y red. Esta carencia técnica impide la transmisión, el almacenamiento y el análisis de las coordenadas de posicionamiento en un centro de control.

Las zonas geográficas remotas o de difícil acceso presentan un alto riesgo de incidentes. Las características topográficas de estas áreas generalmente bloquean las señales de telefonía celular convencional. Esta limitación de conectividad expone la integridad del personal de rescate. Por este motivo, la ciudad requiere un sistema de telecomunicaciones autónomo para garantizar el monitoreo continuo en áreas sin cobertura tradicional.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Desarrollar una infraestructura para el monitoreo de rescatistas en áreas remotas basado en LoRaWAN y GPS.

1.2.2. Específicos

- Analizar sistemas de posicionamiento global en áreas remotas.
- Diseñar la infraestructura de hardware y red para monitoreo basado en LoRaWAN y GPS.
- Construir el sistema.
- Validar el sistema bajo condiciones reales.

1.3. Alcance

Este proyecto de investigación desarrolla un sistema telemático para el monitoreo de personal de rescate en áreas remotas. La infraestructura integra un dispositivo rastreador basado en tecnología LoRa. Este equipo adquiere las coordenadas espaciales mediante el Sistema de Posicionamiento Global. El nodo transmite la información de ubicación a través del protocolo LoRaWAN. Un equipo gateway centraliza la recepción de los paquetes de datos mediante radiofrecuencia. Finalmente, la arquitectura procesa las tramas de red y envía los registros a un servidor web mediante conexión a internet, para ser almacenados.

1.4. Justificación

El monitoreo de rescatistas en áreas remotas representa un desafío técnico significativo. La solución a este problema abarca varias disciplinas de la ingeniería. La integración de tecnologías LoRaWAN y GPS ofrece una respuesta innovadora. Esta arquitectura combina comunicación de largo alcance, bajo consumo energético y localización precisa. El sistema supera las limitaciones de las redes convencionales en terrenos hostiles [12]. Este proyecto aborda problemas de conectividad en entornos extremos. La investigación proporciona una plataforma escalable y eficiente. El modelo es aplicable a operaciones de rescate, minería o exploraciones científicas. La implementación de esta infraestructura impulsa el desarrollo de soluciones tecnológicas robustas. Esta propuesta fortalece la capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia.

La seguridad operativa es un aspecto crucial en misiones de auxilio. Las áreas remotas presentan condiciones climáticas adversas y conectividad nula. Este sistema garantiza la integridad y protección del personal de rescate. La red de radiofrecuencia establece un monitoreo constante y en tiempo real de la ubicación geográfica. Esta tecnología mejora la capacidad de reacción táctica. Además, el seguimiento continuo reduce el riesgo de pérdida de vidas humanas. El proyecto tiene un impacto directo en la efectividad de las operaciones de campo. El sistema consolida las redes de apoyo logístico en comunidades vulnerables ante desastres naturales o incidentes críticos.

El presente proyecto posee una alta relevancia para la ingeniería mecatrónica. El desarrollo del prototipo integra conocimientos teóricos de electrónica, telecomunicaciones y sistemas embebidos. El diseño de hardware basado en módulos LoRaWAN y GPS plantea exigencias técnicas reales. Estos retos impulsan la innovación en la optimización de enlaces de comunicación inalámbrica. La ejecución del sistema fomenta la resolución de problemas técnicos complejos en contextos críticos. Esta investigación enriquece el perfil profesional del ingeniero. El resultado final demuestra la capacidad de crear soluciones tecnológicas con un impacto social tangible.

Capítulo II

MARCO REFERENCIAL

2.1. Estado del Arte

La investigación en [13] identifica el retraso en el tiempo de respuesta de las ambulancias debido a la congestión vehicular y a la ubicación de los hospitales. Para solucionar esto, los autores proponen un sistema integrado de posicionamiento global, Internet de las Cosas (IoT) y Big Data. Este sistema permite controlar semáforos, detectar vehículos de emergencia y seleccionar automáticamente el centro médico más cercano.

Para prevenir la pérdida de ganado vacuno, en [14] se desarrolla un sistema de localización GPS. El diseño integra aplicaciones IoT, tecnología LoRa y un servidor en la nube basado en Sigfox. La implementación de esta arquitectura mejora significativamente la eficiencia y la precisión en el rastreo continuo de los animales.

El estudio realizado en [15] expone las limitaciones de alcance y batería presentes en los rastreadores bluetooth comerciales. Para superar estas desventajas, el autor diseña un sistema dividido en tres componentes principales. Primero, construye un nodo móvil para la localización. Segundo, implementa una puerta de enlace para la comunicación inalámbrica. Finalmente, programa una interfaz de usuario para la visualización de la información.

En [16] se aborda la necesidad de monitorear las rutas de embarcaciones turísticas. El proyecto emplea un microcontrolador Arduino acoplado a un módulo de posicionamiento global. Este nodo transmite parámetros de velocidad y ubicación mediante tecnología LoRa hacia un

gateway. Posteriormente, el sistema sube la información a la nube para su almacenamiento y monitoreo remoto.

Para incrementar la seguridad de las bicicletas, en [17] se desarrolla un rastreador de fácil instalación. El estudio aplica conceptos de IoT, diseño electrónico y servidores web. Los resultados de las pruebas demuestran una precisión y un alcance de comunicación equiparables a los que ofrecen los nodos comerciales LoRa-GPS de alta gama.

En [18] se investiga la variación y optimización del Factor de Esparcimiento (SF) y el ancho de banda (BW) en redes de largo alcance. El estudio busca garantizar la transmisión óptima de un gran volumen de paquetes de datos de forma simultánea. Sus hallazgos confirman una mejora medible en la eficiencia de comunicación para despliegues masivos de dispositivos IoT.

El estudio [19] se enfoca en el Internet de los Vehículos (IoV). Su objetivo es analizar los límites de cobertura en áreas urbanas, suburbanas y rurales. Para ello, los autores diseñan unidades de seguimiento utilizando las tecnologías LoRa y NB-IoT. La investigación evalúa y compara el rendimiento de ambas redes para mejorar la viabilidad del rastreo vehicular en distintos entornos.

La investigación [6] identifica requerimientos estrictos de seguridad y planificación logística en flotas de vehículos. Como solución, propone el desarrollo de un sistema IoT de bajo costo. El hardware utiliza un microcontrolador ESP32 conectado a una red de largo alcance y enlazado a la plataforma de monitoreo ProIoT.

El artículo [12] diseña un sistema para la transmisión de información de emergencia durante incendios forestales. El despliegue emplea tecnología LoRa para evitar la dependencia de redes celulares. Las pruebas de campo demuestran que los nodos sensores y el gateway mantienen una comunicación efectiva en un radio de 500 metros, soportando niveles críticos de señal de hasta -134 dBm.

El estudio [20] analiza el desempeño de la tecnología LoRa destacando su bajo consumo energético y su idoneidad para largas distancias. Esta modulación presenta la limitante física de operar con tasas de transmisión bajas. Sus mediciones indican que la conexión alcanza los 250 metros en áreas forestales densas, mientras que en entornos vehiculares despejados logra enlaces de hasta 2 kilómetros.

El documento [21] demuestra que la presencia de cobertura forestal influye negativamente en el posicionamiento GNSS. El autor señala que métricas geométricas, como la Dilución de Precisión (DOP), solo afectan la consistencia de los datos leídos. Sin embargo, recalca que estos parámetros algorítmicos no mejoran la exactitud real hacia la coordenada física frente a la severa interferencia de la vegetación.

La investigación [22] analiza la precisión satelital en entornos boscosos de difícil acceso. El estudio evalúa parámetros físicos como el tipo de bosque y el tamaño de las copas de los árboles. Los hallazgos confirman que una cobertura foliar espesa disminuye directamente la precisión del receptor. Esto genera márgenes de error de posicionamiento de hasta 12,13 m en bosques de coníferas y 15,11 m en especies de hoja ancha.

El artículo [23] prueba el rendimiento de un receptor GPS a lo largo de una ruta forestal durante diferentes estaciones del año. Los resultados evidencian diferencias operativas significativas debido a la temporalidad climática. El sistema exhibe su mejor desempeño en la estación de primavera con una exactitud media de 24,45 m. En contraste, el entorno otoñal reduce drásticamente el rendimiento y eleva el margen de error medio a 56,10 m.

El artículo [24] evalúa el comportamiento de la modulación física LoRa en áreas de alta densidad forestal. Los autores exponen la cobertura de la señal a condiciones límite para analizar el impacto SF, la Tasa de Codificación (CR) y el BW. Los resultados confirman que la estabilidad del enlace depende estrictamente de la obstrucción del entorno. Asimismo, el estudio evidencia que un mayor tamaño en la trama de datos (payload) incrementa drásticamente la probabilidad de colisiones.

En [25] se verifica la confiabilidad de la red LoRaWAN en un entorno rural desafiante. El estudio utiliza un nodo final basado en Arduino con una antena de 2 dBi. Se captura parámetros como el Indicador de Fuerza de Señal Recibida (RSSI) y la Relación Señal a Ruido (SNR) en una ruta de 1 km. Las conclusiones indican que la distancia y la elevación del terreno afectan directamente al rendimiento, presentando ineficiencias severas de transmisión cuando el nodo se ubica en altitudes inferiores respecto al gateway.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Internet de las Cosas (IoT)

El IoT es un paradigma tecnológico que dota de capacidad computacional a dispositivos electrónicos comunes. Esta arquitectura permite la comunicación directa entre equipos a través de una red sin necesidad de intervención humana [1]. De este modo, los dispositivos operan como nodos inteligentes. Estos nodos cooperan entre sí para alcanzar objetivos comunes, logrando optimizar tiempo y recursos. El funcionamiento del sistema se basa en la ejecución de decisiones automáticas mediante algoritmos preconfigurados. Además, el IoT utiliza internet como enlace principal para enviar, recibir y monitorear la información de los sensores [26].

En la actualidad, no existe una arquitectura estándar o universal para los sistemas IoT. Por esta razón, los desarrolladores diseñan estructuras personalizadas según las necesidades específicas de cada proyecto. Sin embargo, diversas organizaciones internacionales proponen modelos técnicos de referencia (véase la Figura 2.1). El esquema fundamental y más sencillo es la arquitectura de tres capas: percepción, red y aplicación [27]. En contraste, los despliegues industriales o de mayor robustez requieren expandir este modelo básico. Estas arquitecturas complejas integran capas adicionales y componentes físicos como sensores, actuadores, gateway y plataformas de procesamiento en la nube.

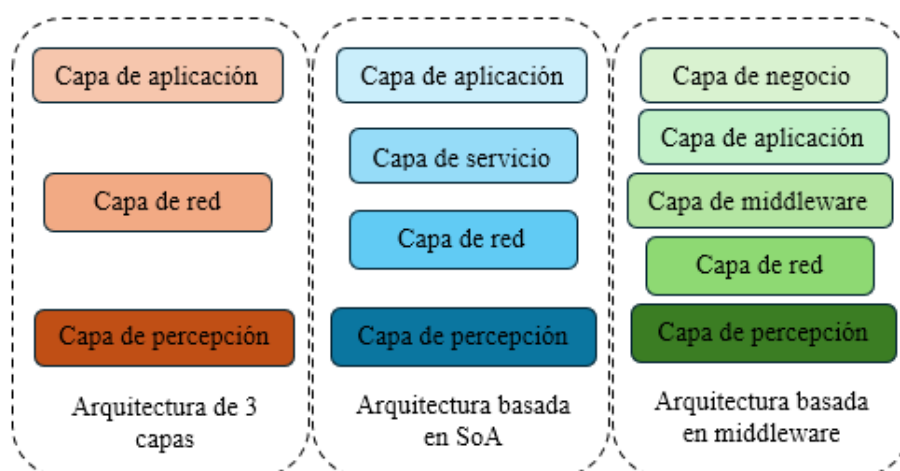


Figura 2.1: Arquitecturas comunes de IoT [1]

2.2.2. Redes LPWAN

Las redes de área amplia y bajo consumo (LPWAN) son fundamentales para los sistemas de sensores y la comunicación de máquina a máquina. Su diseño permite brindar cobertura en entornos carentes de conexión a internet o de suministro eléctrico continuo. Además, su alta eficiencia energética orienta su aplicación directamente hacia el ecosistema IoT.

Estas arquitecturas operan con un ancho de banda intencionalmente reducido. Por ello, transmiten cargas útiles de datos pequeñas, las cuales oscilan entre 11 y 1280 bytes. Asimismo, las redes LPWAN ofrecen velocidades de transmisión que varían desde 0,1 kbps hasta 1 Mbps. La latencia de comunicación depende del protocolo específico implementado. Por ejemplo, tecnologías comerciales como LoRaWAN y Sigfox presentan retrasos de varios segundos en la entrega de paquetes en comparación con otras redes de telecomunicaciones convencionales [28].

2.2.3. Tecnología LoRA

Semtech Corporation desarrolla la tecnología LoRa. Esta modulación transmite pequeñas cantidades de datos a largas distancias con un bajo consumo energético [29]. Su diseño resulta ideal para entornos sin suministro eléctrico continuo. Esto permite operar nodos sensores con baterías durante periodos prolongados. Por consiguiente, sus aplicaciones principales se orientan directamente al IoT.

LoRa utiliza la modulación de espectro ensanchado por chirp (CSS). Este método barre la frecuencia de una señal sinusoidal dentro de un ancho de banda predefinido. Esta técnica de radiofrecuencia brinda ventajas operativas importantes, como la alta escalabilidad del ancho de banda y la resistencia a interferencias [30].

Además, esta tecnología incorpora cuatro parámetros físicos clave para su configuración: el canal de radiofrecuencia, el ancho de banda, el factor de esparcimiento y la potencia de transmisión [31]. El rendimiento y la calidad de dicha configuración se validan mediante la medición de la intensidad de la señal recibida y la relación señal-ruido, indicadores fundamentales para determinar la robustez del enlace en entornos críticos.

2.2.3.1. Canal

El canal corresponde a la frecuencia portadora central sobre la cual se transmite la señal de radio. En la red LoRaWAN, el equipo gateway opera en múltiples canales de forma simultánea. Esta característica permite a los nodos sensores utilizar diversas frecuencias. Como resultado, el sistema reduce significativamente las interferencias y las colisiones en el aire.

2.2.3.2. Ancho de banda

El ancho de banda define el rango de frecuencias disponible para enviar información dentro de un canal. En la tecnología LoRa, este valor generalmente oscila entre 7,8 kHz y 500 kHz. Un incremento en el ancho de banda permite al sistema transmitir una mayor cantidad de datos en menor tiempo.

2.2.3.3. Factor de dispersión

El factor de esparcimiento define el número de bits enviados por cada símbolo en la modulación LoRa. Este parámetro determina directamente la velocidad de transmisión y el alcance del enlace radioeléctrico. Si este valor incrementa, el módulo de radio aumenta el tiempo en el aire (airtime) de la señal emitida. Esta acción mejora drásticamente la sensibilidad del equipo receptor. En contraste, una reducción del SF acelera el envío de los paquetes, pero disminuye la distancia máxima de cobertura.

2.2.3.4. Potencia transmitida

Es la potencia radiada isotrópica efectiva (EIRP). La máxima para nodos LoRa que operan en la banda de 915 MHz es de 30 dBm [24].

2.2.3.5. Indicador de intensidad de señal recibida

El RSSI mide el nivel de potencia absoluta de la señal de radiofrecuencia en la entrada del receptor. Este indicador se expresa en decibelios milivatio (dBm). El valor refleja la robustez de la señal al momento de su llegada al equipo gateway o al dispositivo final. En las redes LoRa,

los niveles típicos varían desde los -40 dBm para señales muy fuertes, hasta los -140 dBm para señales sumamente débiles pero decodificables [32]. A partir de este nivel de potencia, la red implementa el mecanismo de Velocidad de Datos Adaptativa (ADR). Este algoritmo permite al servidor de red controlar dinámicamente la potencia de transmisión de cada nodo para maximizar la vida útil de sus baterías.

2.2.3.6. Relación señal-ruido

La SNR representa la relación entre la potencia de la señal recibida y el ruido de fondo del entorno, expresada en decibelios (dB). Un valor de SNR elevado indica una señal clara frente al ruido en la posición del receptor. Gracias a la modulación por espectro ensanchado, la tecnología LoRa posee la capacidad de decodificar mensajes con una SNR negativa de hasta -20 dB mediante el uso de factores de dispersión altos. El algoritmo ADR evalúa esta métrica de calidad para ajustar automáticamente el factor de dispersión. De este modo, el sistema optimiza el airtime de los paquetes y reduce las colisiones en la red [32].

2.2.4. Antenas y propagación de radiofrecuencia

Las antenas poseen tres características físicas fundamentales: ganancia, dirección y polarización. La ganancia mide el aumento de potencia de la señal. Este parámetro representa la energía que el elemento radiante añade a una señal de radiofrecuencia (RF) existente.

La dirección define la forma y el ángulo del campo de emisión de las señales [2]. Por su parte, la polarización determina la orientación geométrica del campo eléctrico de la onda respecto a la superficie terrestre. Esta orientación es generalmente vertical u horizontal. Las redes LoRaWAN emplean convencionalmente antenas omnidireccionales. Este modelo de antena irradia las señales de forma horizontal en un patrón de 360 grados, como se observa en la Figura 2.2.

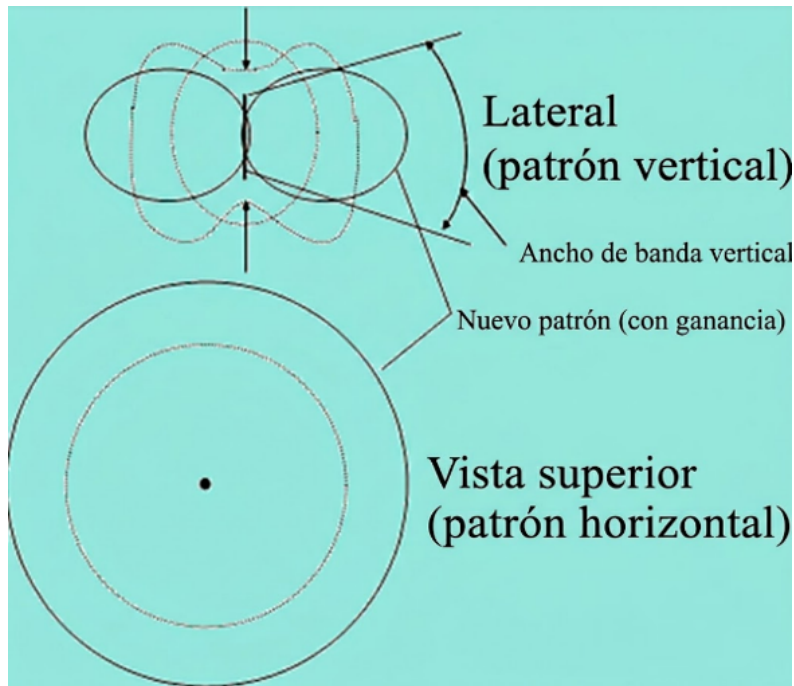


Figura 2.2: Patrón de radiación de una antena omnidireccional [2].

La propagación de la señal depende directamente de las condiciones del entorno topográfico. Un enlace con línea de vista (LOS) ocurre cuando no existen obstáculos físicos entre el nodo emisor y el equipo gateway. En contraste, un escenario sin línea de vista (NLOS) presenta obstrucciones por vegetación o elevaciones del terreno.

Para garantizar una comunicación estable, el enlace requiere una zona de Fresnel despejada. Este concepto define un elipsoide entre las dos antenas por donde viaja la energía electromagnética. La teoría establece que al menos el 60 % del radio de la primera zona debe permanecer libre de obstáculos para evitar la pérdida total o el desvanecimiento de la señal [33].

2.2.5. Red LoRaWAN

La red LoRaWAN pertenece a la categoría de telecomunicaciones LPWAN. Su protocolo administra la transmisión de datos entre los dispositivos finales y el servidor central. El sistema opera sobre bandas de radiofrecuencia libres de licencia (bandas ISM). Esta característica física le permite alcanzar un radio de cobertura de hasta 15 km en entornos rurales despejados. La topología de la arquitectura LoRaWAN se estructura lógicamente en los siguientes niveles

(véase en la Figura 2.3). Este ecosistema de comunicación integra cuatro componentes principales [34]. Estos elementos físicos y lógicos son los nodos o dispositivos finales, las puertas de enlace, los servidores de red en la nube y los servidores de aplicación.

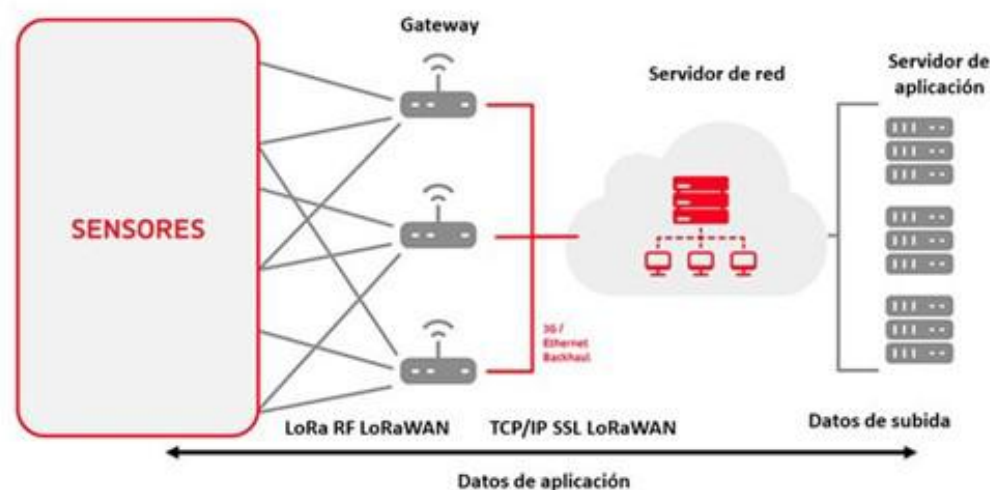


Figura 2.3: Arquitectura LoRaWAN [3].

2.2.5.1. Dispositivos finales

Los dispositivos finales, también conocidos como nodos, miden variables físicas del entorno. Estas magnitudes incluyen temperatura, humedad y posición geográfica, entre otras. Posteriormente, los nodos transmiten esta información hacia los equipos gateway mediante la modulación LoRa. De esta forma, acceden al medio de comunicación LoRaWAN [35]. Un ejemplo específico de estos nodos son los rastreadores de geolocalización. Estos sensores integran un sistema de posicionamiento global. Su diseño permite un monitoreo eficiente de rutas. Además, garantizan la seguridad de activos de alto valor [36]. Estos rastreadores operan bajo las mismas características fundamentales del resto de dispositivos finales de la red.

2.2.5.2. Equipos gateway

Los equipos gateway, o puertas de enlace, constituyen los puntos de acceso básicos de la red LoRaWAN. Estos dispositivos operan de manera continua. Su hardware escucha múltiples

canales de radiofrecuencia de forma simultánea. Esta capacidad técnica les permite recibir información de diversos nodos al mismo tiempo [37]. Las puertas de enlace actúan estrictamente como intermediarios transparentes. Primero, reciben los paquetes de datos mediante la interfaz de radio LoRa. Luego, retransmiten estos mensajes hacia un servidor central en la nube utilizando conexiones IP convencionales [38].

2.2.5.3. Servidor de red (The Things Network)

El servidor de red representa el núcleo lógico de la arquitectura LoRaWAN. Su función principal consiste en administrar la red completa. Este componente autentica los dispositivos, elimina los paquetes de datos duplicados recibidos por múltiples puertas de enlace y enruta la información de manera segura. The Things Network (TTN) es un servidor de red de código abierto, descentralizado y de acceso público. Esta plataforma se enfoca en el ecosistema del internet de las cosas. Su objetivo principal es brindar soporte de conectividad a los equipos gateway globales. Las puertas de enlace envían la información de los nodos directamente hacia esta infraestructura. Adicionalmente, TTN proporciona la capacidad de integrar estos datos con múltiples servidores de aplicación [39].

2.2.5.4. Servidores de aplicación

El servidor de aplicación representa la capa final en la topología de la red LoRaWAN. Su función principal consiste en recibir los datos provenientes del servidor de red. Este sistema se encarga de descifrar la carga útil (payload) de los mensajes generados por los nodos. Posteriormente, el servidor procesa, analiza y estructura la información. Además, este componente gestiona la integración directa con bases de datos externas para almacenar el historial de las variables físicas y mostrarlas al usuario final [3].

2.2.5.5. Firebase (Realtime Database)

Firebase es una plataforma de desarrollo en la nube que proporciona un servicio de base de datos en tiempo real. Este sistema almacena la información mediante una estructura no relacional o NoSQL, ideal para manejar formatos ligeros como JSON. La plataforma sincroniza los

datos instantáneamente con todos los clientes conectados. Esta característica técnica permite al usuario final visualizar la actualización de la información sin latencia perceptible [40]. Por consiguiente, este entorno resulta idóneo para registrar y actualizar el historial continuo de dispositivos finales.

2.2.5.6. SQLite

SQLite es un motor de base de datos SQL integrado, autocontenido y de configuración cero. A diferencia de los sistemas relacionales convencionales, este motor carece de un proceso de servidor independiente. El sistema lee y escribe información directamente en archivos de disco. Una base de datos completa, con sus tablas, índices y vistas, reside en un único archivo multi-plataforma. La biblioteca de SQLite es compacta y ocupa menos de 900 KiB de memoria. El diseño del motor garantiza transacciones de tipo ACID (Atomicidad, Consistencia, Aislamiento y Durabilidad). Esta característica asegura la integridad de los registros ante posibles fallos del sistema o cortes de energía eléctrica. El formato de archivo es compatible entre diversas arquitecturas de hardware y sistemas operativos [41].

2.2.5.7. Protocolos de comunicación LoRaWAN

El estándar LoRaWAN define tres clases de funcionamiento para configurar la comunicación bidireccional de los dispositivos finales. La Figura 2.4 ilustra el comportamiento de las ventanas de transmisión y recepción para cada categoría [42].

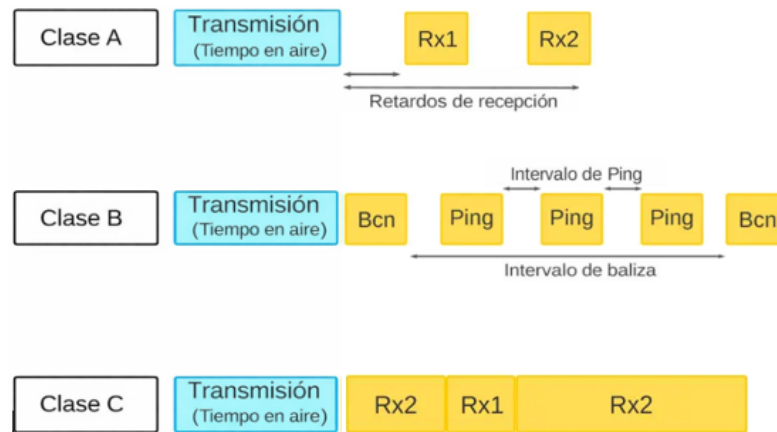


Figura 2.4: Clases de dispositivos LoRa [4].

Clase A: Los nodos deciden el momento exacto para transmitir datos mediante mensajes de enlace ascendente (uplink). Este comportamiento optimiza drásticamente el uso de la batería. Después de cada transmisión, el dispositivo abre dos ventanas cortas de recepción. Esta acción permite escuchar los mensajes de enlace descendente (downlink) provenientes de los equipos gateway.

Clase B: Estos dispositivos heredan todas las capacidades de la Clase A. Adicionalmente, los equipos gateway transmiten tramas de baliza (beacon frames) en intervalos de tiempo regulares. Esta señalización permite la sincronización temporal de los nodos para abrir ventanas de recepción programadas.

Clase C: Los nodos operan con ventanas de recepción abiertas de forma continua. El dispositivo solo interrumpe esta escucha durante sus propias transmisiones. En consecuencia, estos equipos consumen una cantidad significativamente mayor de energía en comparación con las clases anteriores.

2.2.5.8. Seguridad en LoRaWAN

El protocolo LoRaWAN implementa códigos de autenticación de mensajes (MAC) para garantizar la integridad y autenticidad de la información transmitida. Además, el sistema utiliza el estándar avanzado AES-128 en modo contador (CTR) para cifrar las cargas útiles de extremo a extremo. La Figura 2.5 muestra la arquitectura de doble capa criptográfica utilizada en este

estándar [43].

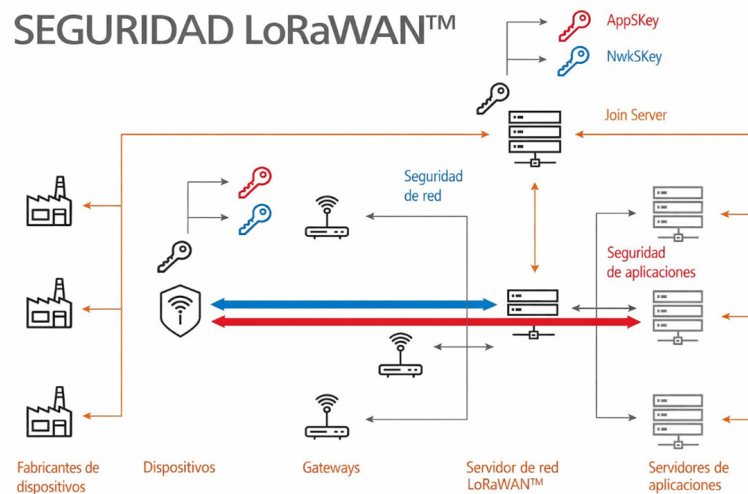


Figura 2.5: Seguridad LoRaWAN [5].

Para establecer una conexión altamente segura, los dispositivos finales operan en el modo de Activación por Aire (OTAA). Este método de unión requiere configurar parámetros lógicos únicos en el nodo. Estos identificadores son el Device EUI, el Join EUI, la NwkKey y la App-Key. El servidor de red procesa estos parámetros durante la solicitud de unión. A partir de esta validación, el sistema genera claves de sesión dinámicas. Esta arquitectura criptográfica protege la transmisión de los datos y blindo la gestión administrativa de la red [43].

2.2.6. Sistema de posicionamiento global

Un receptor GPS requiere información de al menos tres satélites para determinar su ubicación exacta (véase en la Figura 2.6). Este proceso matemático espacial se denomina trilateración. Los satélites en órbita transmiten continuamente sus coordenadas y la marca de tiempo exacta de cada emisión. La señal de un solo satélite forma una esfera imaginaria de cobertura. El receptor puede ubicarse en cualquier punto de su superficie. De manera similar, la intersección de las señales de dos satélites genera un anillo bidimensional de posiciones posibles. La convergencia de tres esferas satelitales reduce las opciones a solo dos puntos físicos. El sistema descarta automáticamente el punto ubicado en el espacio exterior. De este modo, el dispositivo

calcula su latitud y longitud exactas. Finalmente, la sincronización con un cuarto satélite añade la variable de altitud. Esta cuarta conexión mejora drásticamente la precisión del posicionamiento tridimensional [44].

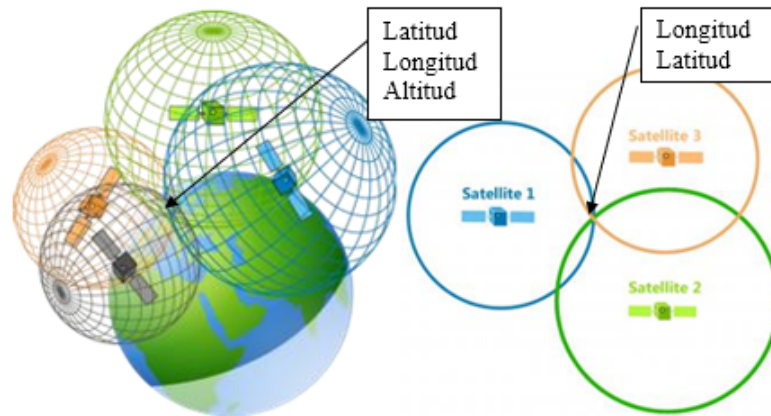


Figura 2.6: Satélites GPS [6].

2.2.7. Combinaciones de GPS con redes de alta latencia

Diversas redes de telecomunicaciones soportan la transmisión de coordenadas de dispositivos GPS. Entre ellas, destacan las opciones de alta latencia:

2.2.7.1. Redes LoRaWAN

Esta arquitectura ofrece un bajo consumo de energía y un alcance extendido. La modulación transmite los paquetes de datos a velocidades reducidas. Esta característica física introduce latencia en el sistema. Por lo tanto, la red resulta ideal para aplicaciones de monitoreo sin requerimientos de tiempo real [34].

2.2.7.2. Redes celulares

Las infraestructuras celulares convencionales permiten la transmisión de datos de geolocalización. Sin embargo, el alto tráfico de información genera congestión en las radiobases. Esta saturación ralentiza significativamente las comunicaciones. Las generaciones modernas (4G y

5G) mitigan este problema. En contraste, las redes heredadas mantienen una alta propensión a la latencia [45].

2.2.7.3. Redes satelitales

Los enlaces satelitales presentan una alta complejidad operativa en términos de latencia y conectividad. Estos sistemas son sumamente sensibles a las condiciones climáticas y al ángulo de transmisión de las antenas. No obstante, representan una opción esencial en zonas geográficas carentes de cobertura terrestre [46].

2.2.7.4. Redes malladas (mesh)

Estas redes generan alta latencia debido a los múltiples saltos de comunicación. Esta arquitectura conecta varios dispositivos para formar una topología de malla. El sistema obliga a los datos del GPS a viajar a través de múltiples nodos intermediarios antes de llegar al destino. Este proceso incrementa los tiempos de transmisión. El retraso es más evidente en rutas largas o en redes con una alta densidad de equipos [47].

Capítulo III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Modelo de Investigación

La investigación documental fundamenta la fase inicial de este trabajo [48]. El estudio recopila información de fuentes confiables sobre sistemas de posicionamiento global integrados con tecnología LoRaWAN. Esta etapa teórica establece las bases científicas para la selección de hardware, software y firmware.

El análisis evalúa los parámetros técnicos requeridos por los equipos físicos y la arquitectura de red. Adicionalmente, el proyecto aplica la investigación descriptiva para seleccionar adecuadamente los componentes de la infraestructura y asegurar su compatibilidad.

La fase de implementación emplea la investigación de campo y experimental [49]. La integración de la red exige una parametrización específica de cada dispositivo para lograr un desempeño óptimo. El desarrollo incluye pruebas individuales en cada módulo del sistema.

El diseño contempla la evaluación de distintos escenarios topográficos. Las pruebas experimentales se ejecutan en entornos físicos reales. Esta metodología garantiza la confiabilidad del enlace de comunicaciones frente a obstáculos físicos y variaciones del terreno.

3.2. Diseño de la investigación

3.2.1. Fase 1: Análisis de información sobre sistemas de posicionamiento global

Actividad 1.1: Análisis de sistemas de posicionamiento global para el monitoreo de rescatistas en áreas remotas.

El estudio analiza el funcionamiento de dispositivos GPS destinados al rastreo de personal en áreas con conectividad limitada. El proceso identifica los parámetros de precisión y los componentes electrónicos de estos equipos. La revisión bibliográfica abarca literatura técnica, repositorios académicos y manuales de fabricantes.

Actividad 1.2: Análisis de hardware y red basados en LoRaWAN y GPS

La investigación detalla las especificaciones de hardware y red bajo el estándar LoRaWAN. El análisis técnico evalúa variables críticas como el alcance de transmisión, el consumo energético de los nodos y la viabilidad económica de los equipos de radiofrecuencia.

3.2.2. Fase 2. Diseño de la infraestructura

Actividad 2.1: Determinación de requerimientos de la infraestructura y planteamiento de alternativas de solución

El diseño define los componentes integrales de la arquitectura de red. Esta selección abarca nodos sensores, equipos gateway y plataformas de bases de datos. A partir de esta información, el proyecto plantea alternativas tecnológicas que cumplen con las exigencias de almacenamiento y cobertura.

Actividad 2.2: Caracterización de los equipos de red

El proceso emplea diagramas de flujo para estructurar la lógica de comunicación del sistema. La infraestructura física depende de dos elementos principales: el nodo rastreador y el gateway.

El documento detalla las características operativas y limitaciones de ambos dispositivos.

Actividad 2.3: Diseño de los algoritmos de extracción y almacenamiento

El desarrollo contempla la programación de algoritmos para el procesamiento de las tramas de datos. Estos códigos aseguran la correcta extracción de las coordenadas desde el servidor de red y definen las rutinas de almacenamiento.

3.2.3. Fase 3. Construcción del sistema

Actividad 3.1: Integración del hardware

El proyecto interconecta físicamente los componentes comerciales seleccionados. El proceso incluye la parametrización de los módulos de radiofrecuencia. Las pruebas preliminares validan el encendido, la adquisición de satélites y la conexión inicial del hardware.

Actividad 3.2: Configuración del firmware

El sistema adapta el firmware predeterminado de los dispositivos al entorno local. La configuración ajusta las bandas de frecuencia de transmisión, los identificadores de red y los parámetros de modulación requeridos por el estándar LoRaWAN.

Actividad 3.3: Implementación del software

La arquitectura de software procesa los paquetes provenientes del gateway. Los algoritmos decodifican las cargas útiles para extraer las coordenadas GPS. El sistema almacena esta información de forma local mediante un motor de base de datos relacional y sincroniza los registros con una plataforma en la nube para su visualización cartográfica.

3.2.4. Fase 4. Pruebas de funcionamiento

Actividad 4.1: Ajustes y puesta a punto

Con la infraestructura implementada, el proceso ejecuta las calibraciones finales de transmisión. El sistema evalúa métricas de calidad de señal y ajusta parámetros como el factor de dispersión para optimizar el enlace inalámbrico.

Actividad 4.2: Ejecución de pruebas de campo

El proyecto desarrolla mediciones experimentales en áreas con diferentes condiciones de línea de vista. La evaluación compara las coordenadas geográficas transmitidas a través de la red LoRaWAN con puntos de referencia físicos. Este análisis verifica la precisión espacial y la confiabilidad del monitoreo.

Capítulo IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo presenta los resultados técnicos obtenidos tras la integración de la infraestructura telemática. El análisis evalúa el desempeño de la red LoRaWAN en escenarios reales de operación. La evaluación examina el comportamiento del nodo rastreador y el equipo gateway frente a diferentes condiciones de línea de vista. Adicionalmente, el estudio verifica la correcta transmisión y recepción de las tramas de datos. La sección expone las métricas de calidad de señal y la precisión de las coordenadas geográficas extraídas. Finalmente, el documento detalla el flujo de la información desde su captura física hasta su almacenamiento en las bases de datos.

4.1. Diagrama de bloques de la infraestructura

La Figura 4.1 ilustra la arquitectura telemática implementada para el sistema de monitoreo. El diseño se divide en tres capas operativas principales.

En la zona de rescate, el dispositivo final Dragino TrackerD adquiere las coordenadas espaciales. Este nodo transmite la información mediante mensajes de enlace ascendente hacia el equipo gateway (LPS8-V2) a través de la red de radiofrecuencia LoRaWAN.

La capa de infraestructura centraliza la recepción de las tramas. El gateway utiliza conectividad celular 4G/LTE para reenviar los paquetes al servidor TTN. Luego, direcciona los datos hacia Google Cloud mediante integraciones webhook sobre el protocolo seguro HTTPS. El sistema aloja esta información en Firebase Realtime Database. Posteriormente, el programa de

la estación de monitoreo extrae estos registros vía API en formato JSON. Este software local almacena la información en una base de datos SQLite para su respaldo histórico y proyecta las coordenadas en la interfaz gráfica.

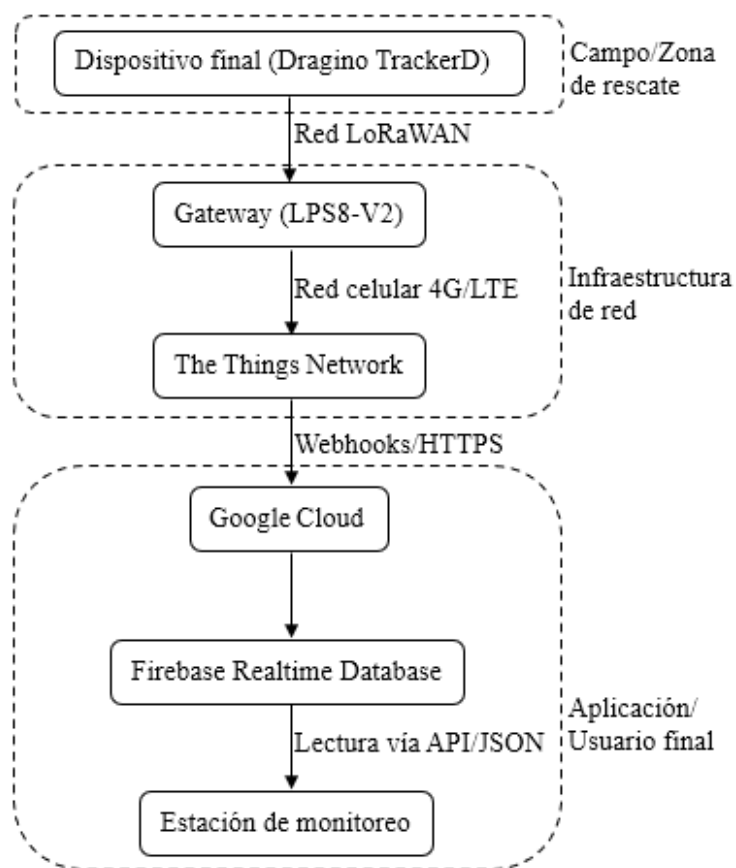


Figura 4.1: Diagrama de bloques de la infraestructura y red

4.2. Dispositivo final (Dragino TrackerD)

4.2.1. Criterio de selección del dispositivo final

El análisis técnico evalúa dos modelos comerciales de la marca Dragino (Tabla 4.1). Estos equipos cumplen con los requerimientos de diseño de la infraestructura. Ambos dispositivos integran un módulo GPS y operan bajo el estándar de comunicación LoRaWAN.

Tabla 4.1: Características de dispositivos finales.		
Parámetro	TrackerD	TrackerD-LS
MCU	ESP32 PICO D4	ESP32 PICO D4
LoRaWAN	1.0.3 Clase A	1.0.3 Clase A
GPS	Sí	Sí
Batería	1000 mAh recargable	3000 mAh recargable
Botón de Alarma	Sí	No
Aplicación	Seguimiento de personas y activos	Seguimiento de activos
Precio	\$59.62	\$75.98

El modelo TrackerD-LS posee una mayor capacidad energética, pero su costo comercial es superior. Su diseño se enfoca en aplicaciones de logística de activos y no en el seguimiento de personal. Por lo tanto, la infraestructura integra el dispositivo TrackerD. Este equipo cumple con todas las especificaciones técnicas requeridas. Adicionalmente, el hardware incorpora un botón físico de alarma, como muestra la Figura 4.2. Este componente resulta indispensable para la emisión de alertas inmediatas durante las misiones de rescate.



Figura 4.2: TrackerD [7]

El dispositivo destaca por su portabilidad y diseño compacto. El hardware incorpora únicamente dos botones físicos: un pulsador de alarma y un interruptor de reinicio. El nodo TrackerD dispone de tres modos de operación predeterminados de fábrica: modo normal, modo transporte y modo alarma.

4.2.1.1. Modo normal

Este estado permanece activo mientras el equipo registra un movimiento nulo o mínimo. En esta configuración, el dispositivo optimiza el consumo energético. El nodo transmite las coordenadas espaciales mediante enlaces ascendentes en intervalos de 20 minutos.

4.2.1.2. Modo transporte

El sistema conmuta a este estado al detectar una aceleración superior al umbral de movimiento preconfigurado. Durante esta fase, el equipo transmite los paquetes de datos cada 5 minutos.

4.2.1.3. Modo alarma

Este estado se activa mediante la pulsación continua del botón de alarma por 5 segundos. La configuración incrementa la frecuencia de transmisión de la red. El dispositivo envía un total de 60 paquetes, a razón de una transmisión cada 60 segundos.

Estos intervalos de tiempo presentan variaciones en la operación real. La latencia total depende del tiempo requerido por el módulo GPS para adquirir la señal de los satélites y fijar la ubicación exacta.

El firmware original del nodo atiende aplicaciones de rastreo genérico. El monitoreo de personal de rescate en áreas remotas exige una parametrización específica. Este ajuste adapta variables críticas como los intervalos de temporización, el perfil de consumo energético y la estructura de las tramas de datos.

La modificación de estos parámetros admite dos métodos de programación. El primer método utiliza comandos AT para ajustes básicos. El segundo método implica la reescritura del código fuente (firmware) para una personalización profunda del hardware. El desarrollo de esta infraestructura emplea la configuración del dispositivo mediante comandos AT.

4.2.2. Configuración del TrackerD mediante comandos AT

El método de programación requiere una conexión serial bidireccional con el dispositivo. El proceso emplea el *Monitor Serial* del entorno de desarrollo Arduino IDE como interfaz de comunicación UART. La configuración establece la velocidad de transmisión en *115200 baudios*. Este valor corresponde a la tasa predeterminada por el firmware del equipo. Adicionalmente, el operador habilita la opción *Both NL & CR* (Nueva Línea y Retorno de Carro). Este parámetro permite el procesamiento correcto de las instrucciones.

La verificación del enlace físico consiste en la emisión del comando de prueba *AT*. El nodo TrackerD confirma la recepción de la instrucción mediante la respuesta *OK* (véase en la Figura 4.3). Esta validación garantiza la ejecución correcta de los mensajes posteriores. El manual de usuario del fabricante detalla el conjunto completo de instrucciones disponibles [7].

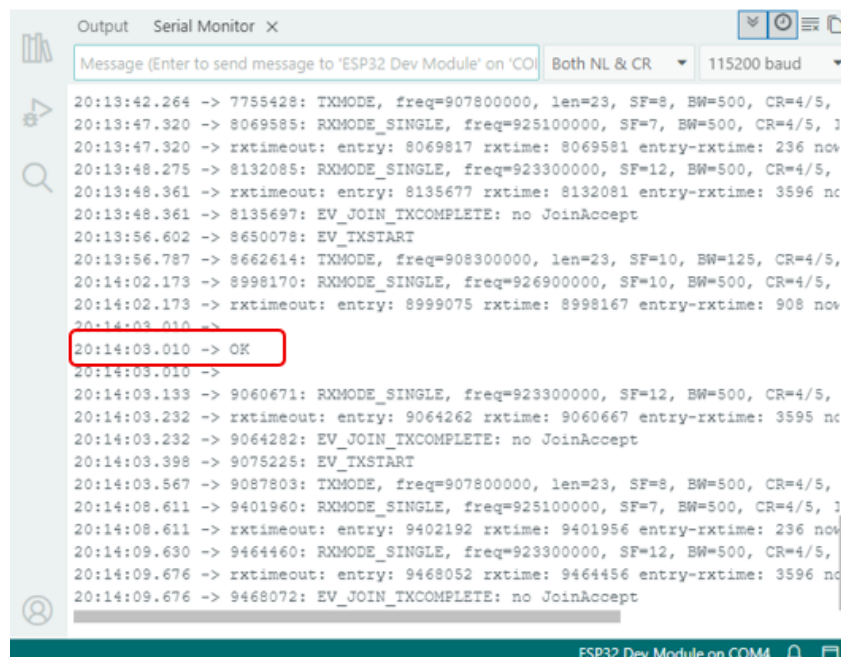


Figura 4.3: Configuración del monitor serial

4.2.2.1. Comandos AT aplicados al TrackerD

La Tabla 4.2 expone el conjunto de instrucciones AT programadas en el nodo sensor. Estas modificaciones optimizan el rendimiento operativo del hardware durante las misiones de

rescate. Adicionalmente, los parámetros reducen el consumo energético del equipo durante los periodos de inactividad.

Tabla 4.2: Comandos AT utilizados.

Comando AT	Funcionalidad
AT+TDC=1200000	Intervalo de transmisión del modo normal a 20 minutos.
AT+ATDC=16000	Intervalo de transmisión del modo alarma a 16 segundos.
AT+SMOD=1,1,0	Envía datos únicamente del posicionamiento.
AT+FTIME=45	Tiempo máximo de posicionamiento de 45 segundos.

4.3. Gateway Dragino LPS8v2

4.3.1. Criterio de selección del gateway

El análisis técnico evalúa tres modelos comerciales de equipos gateway. Estos dispositivos poseen características afines a los requerimientos de la infraestructura. La Tabla 4.3 detalla las especificaciones principales de cada nodo concentrador.

Tabla 4.3: Características de los Gateways.

Parámetro	MS48-LR	LPS8v2	DLOS8N
Entorno de uso	Interior	Interior	Exterior
CPU/Flash/RAM	CPU: Quad-core Cortex-A7 1.2GHz RAM: 512MB eMMC: 4GB	CPU: Quad-core Cortex-A7 1.2GHz RAM: 512MB eMMC: 4GB	CPU: 400MHz Flash: 16MB RAM: 64MB
Opción 4G LTE	Opcional (Módulo EC25)	Opcional (Módulo EC25)	Opcional (Módulo EC25)
Sistema Operativo	Armbian	Armbian	OpenWrt
GPS integrado	No	No	Si
Entrada de alimentación	5 V, 2A	12 - 24 V, 2A	12 - 24 V, 2A
Tipo de antena	Stick	Stick	Fibra de vidrio
Precio	\$313.39	\$268.36	\$430.86

Los modelos LPS8v2 y MS48-LR integran procesadores de alta capacidad y sistemas operativos basados en Linux (Armbian). Esta arquitectura de hardware gestiona eficientemente los paquetes de red. Ambos equipos garantizan un desempeño óptimo en escenarios con múltiples dispositivos finales activos de forma simultánea. Por el contrario, el procesador y la memoria RAM del modelo DLOS8N presentan capacidades inferiores. Este hardware exhibe limitaciones técnicas ante cargas elevadas de tráfico de datos.

El modelo MS48-LR posee un precio comercial superior frente al equipo LPS8v2. Por este motivo, el análisis de costo-beneficio descarta esta opción. Por otro lado, el modelo DLOS8N incorpora una antena de fibra de vidrio para operación nativa en exteriores. Esta característica resulta ideal para despliegues en áreas remotas. Sin embargo, se selecciona el equipo LPS8v2 por su mayor capacidad de procesamiento. La infraestructura integra una antena externa de fibra de vidrio adquirida de forma independiente para suplir el requerimiento de cobertura exterior.



Figura 4.4: Gateway Dragino LPS8v2 [8]

El equipo gateway Dragino LPS8v2 (Figura 4.4) cumple con los requerimientos técnicos para operar en escenarios geográficos aislados. Su arquitectura de hardware integra un módulo de comunicación celular mediante una ranura para tarjeta SIM. Este componente establece conectividad directa con redes móviles 4G/LTE [8]. Esta capacidad de transmisión es crítica para la viabilidad del proyecto. Las áreas remotas de rescate carecen de infraestructura de telecomunicaciones convencional, como cobertura Wi-Fi o enlaces físicos Ethernet.

4.3.2. Configuración avanzada del gateway

El acceso al panel de gestión del equipo gateway admite múltiples métodos. La presente implementación ejecuta la configuración inicial mediante una conexión inalámbrica Wi-Fi (Figura 4.5).



Figura 4.5: Configuración mediante WiFi [8]

El proceso de energización del dispositivo activa automáticamente un punto de acceso inalámbrico (Access Point) denominado *dragino-xxxxx*. El operador establece la conexión inicial

desde la estación de trabajo mediante la clave de seguridad predeterminada **dragino+dragino**.

La vinculación exitosa a la red local permite el acceso a la interfaz de gestión. Esta acción requiere el ingreso de la dirección IPv4 **10.130.1.1** en un navegador web. El sistema solicita credenciales de autenticación para el ingreso. La Figura 4.6 muestra la interfaz de administrador. En este panel, el usuario predeterminado es **root** y la contraseña asignada es **dragino**. Posteriormente, el menú despliega la opción de **configuración avanzada** (Figura. 4.7).



The image shows a web browser window displaying the login page for a Dragino LPS8v2 device. The browser's address bar shows the URL `/10.130.1.1/login.html?redirect=/cgi-bin/config...`. The page features the Dragino logo at the top, followed by the title "LPS8v2 Puerta de entrada interior". Below this, a section titled "Iniciar sesión como administrador" contains a login form. The form has two input fields: "Nombre de usuario" with the value "root" and "Contraseña" with the value "dragino". A link "Actualizar contraseña" is located next to the password field. A red rectangle highlights the login form area. At the bottom of the form is a blue button labeled "Iniciar sesión". The footer of the page reads "© Tecnología Dragino 2025. Todos los derechos reservados."

Figura 4.6: Inicio de sesión para la configuración.



Figura 4.7: Configuración avanzada.

La configuración de la conexión a internet mediante la red móvil ocurre en el apartado **Red**, dentro de la pestaña **Celular**. La Figura 4.8 ilustra este panel de configuración. La infraestructura telemática integra una tarjeta SIM de la operadora nacional Tuenti. El proceso exige el ingreso del código PIN de seguridad provisto por el fabricante del chip.

The screenshot shows the 'Redes celulares' (Cellular Networks) configuration page in the DRAGINO web interface. The page has a blue header with the DRAGINO logo and navigation links for 'LoRa', 'LoRaWAN', and 'Modbus'. A 'Cerrar sesión' (Log out) link is also present. The main content area is divided into three sections: 'Estado de la conexión' (Connection Status), 'Configuración de conexión' (Connection Configuration), and 'Configuración avanzada' (Advanced Configuration). In the 'Estado de la conexión' section, the 'Estado' (Status) is set to 'Habilitar redes celulares' (Enable cellular networks), which is highlighted with a red box. The 'Configuración de conexión' section contains fields for 'SIM', 'ICCID', 'IMEI', and 'APN'. The 'APN' field is set to 'tuenti' and is also highlighted with a red box. The 'Configuración avanzada' section contains a 'Código PIN' (PIN Code) field, which is highlighted with a red box.

Figura 4.8: Configuración Red Celular

El siguiente paso establece el enlace lógico entre el equipo gateway y la plataforma The Things Network. El apartado **LoRa** define los parámetros de radiofrecuencia, tal como detalla la Figura 4.9. El sistema emplea la banda **US915**. Esta selección cumple estrictamente con el plan nacional de frecuencias del Ecuador. Adicionalmente, la configuración asigna la frecuencia de **Sub-Banda 2**. Este parámetro asegura la compatibilidad de comunicación con los servidores de la plataforma.

Figura 4.9: Configuración LoRa.

La parametrización finaliza en la sección LoRaWAN, específicamente en el submenú **LoRaWAN Semtech UDP**. La Figura 4.10 expone los valores de esta interfaz. El diseño de red requiere únicamente la asignación de la dirección del servidor **nam1** por proximidad geográfica. Esta pantalla también extrae el identificador **Puerta de enlace EUI**. Este código constituye la identidad física y única del equipo gateway. Este valor resulta indispensable para el registro y la vinculación lógica del dispositivo dentro de TTN.

Figura 4.10: Configuración LoRaWAN Semtech UDP.

4.4. Antena Dragino BLG-AN-040 exterior de fibra de vidrio (915 MHz)



Figura 4.11: Antena Dragino BLG-AN-040 [9]

La incorporación de la antena de exteriores, Dragino BLG-AN-040 (Figura 4.11), es un componente crítico para optimizar la red de la infraestructura. Al ser una antena con un patrón de radiación omnidireccional y una ganancia de 3 dBi, permite maximizar el radio de cobertura horizontal de la red LoRaWAN en la banda ISM de 915 MHz. Su estructura de fibra de vidrio le otorga resistencia a la intemperie, haciéndola ideal para despliegues en exteriores. El uso de esta antena garantiza una mayor sensibilidad en la recepción de las tramas de datos provenientes de los nodos móviles (TrackerD), asegurando la trazabilidad continua de las brigadas durante la ejecución de operativos en áreas remotas.

4.5. The Things Network

Esta plataforma recibe los datos de ubicación del nodo TrackerD. El equipo gateway reenvía esta información desde la zona de rescate hacia la nube. La integración del sistema requiere la ejecución de los siguientes procesos:

4.5.1. Registro de gateway

El proceso de alta del dispositivo inicia con la autenticación del administrador en la plataforma TTN. La sesión activa permite el acceso al entorno de gestión principal. La Figura 4.12 ilustra la opción *Consola* para el ingreso a este panel.



Figura 4.12: Creación de cuenta en TTN.

Posteriormente, la interfaz despliega el módulo de gestión de red. Este apartado contiene la función específica para registrar una nueva puerta de enlace, como indica la Figura 4.13.

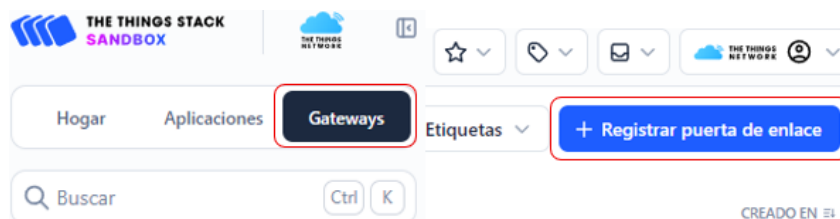
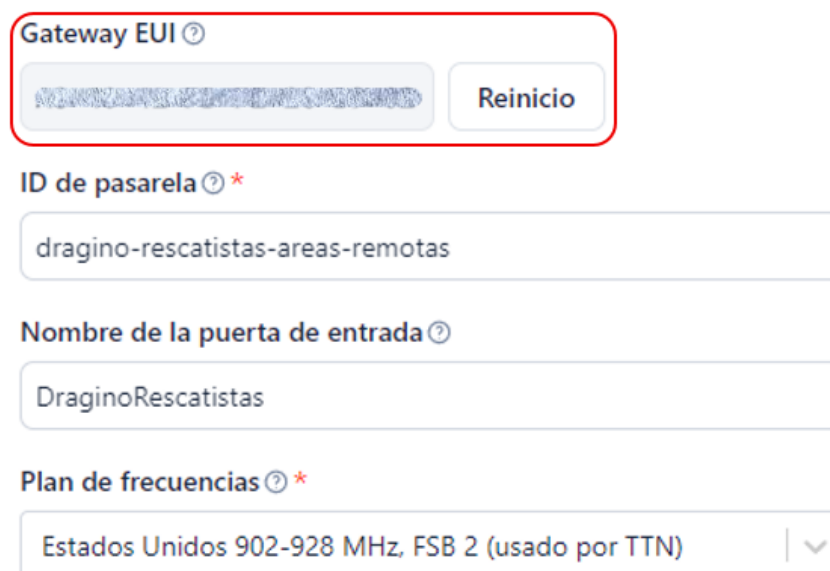


Figura 4.13: Registro de gateway.

El registro final exige el ingreso del identificador *Puerta de enlace EUI* del modelo Dragino LPS8v2. El panel de configuración avanzada del hardware local (véase en la Figura 4.10)

provee este código alfanumérico. La Figura 4.14 expone el formulario para la validación de esta credencial.

el formulario para la validación de esta credencial.



Formulario de validación de Gateway EUI. El formulario contiene los siguientes campos:

- Gateway EUI**: Campo de texto con un botón "Reinicio" a su derecha.
- ID de pasarela**: Campo de texto con el valor "dragino-rescatistas-areas-remotas".
- Nombre de la puerta de entrada**: Campo de texto con el valor "DraginoRescatistas".
- Plan de frecuencias**: Campo de selección con el valor "Estados Unidos 902-928 MHz, FSB 2 (usado por TTN)".

Figura 4.14: Ingreso de la puerta de enlace EUI.

4.5.2. Registros de los TrackerD

La arquitectura lógica requiere la creación de una aplicación central dentro de la plataforma. La Figura 4.15 detalla este proceso inicial. El diseño del proyecto asigna el nombre **TrackerD-SA01** y el identificador **lorawan-gps-tracker-01** a este entorno de trabajo.

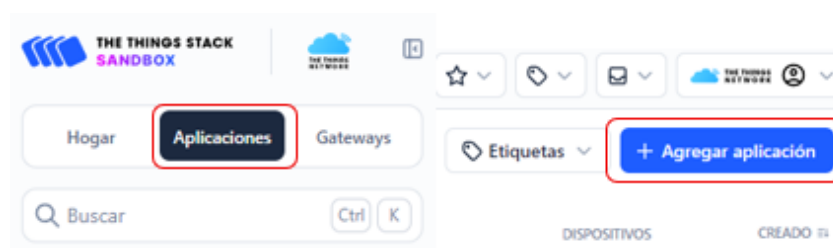


Figura 4.15: Agregar aplicación.

El panel de gestión de la aplicación contiene la pestaña **Dispositivos finales**. Este menú habilita la opción para registrar un nuevo hardware (Figura 4.16). Este procedimiento integra

de forma lógica cada sensor físico a la red telemática.

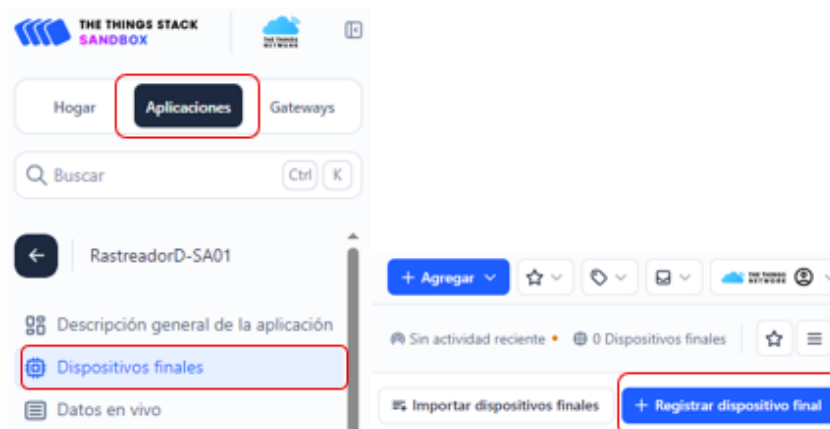


Figura 4.16: Registro de dispositivo final.

El sistema solicita los parámetros técnicos y de seguridad del hardware. La Figura 4.17 muestra este formulario de registro. La configuración requiere el ingreso de la versión exacta del estándar LoRaWAN. El manual de especificaciones del modelo TrackerD indica la compatibilidad con la versión 1.0.3. Adicionalmente, el empaque original del equipo provee las claves criptográficas necesarias para la sección de *Suministro de información*.

The image shows a registration form for a device. It is titled 'Fin del tipo de dispositivo'. The form is split into two main sections. The left section, 'Método de entrada', has two radio buttons: 'Seleccione el dispositivo final en el repositorio de dispositivos LoRaWAN' and 'Ingrese manualmente los detalles del dispositivo final'. Below this are dropdown menus for 'Plan de frecuencia' (set to 'Estados Unidos 902-928 MHz, FSB 2 (utilizado por TTN)'), 'Versión de LoRaWAN' (set to 'Especificación LoRaWAN 1.0.3'), and 'Versión de parámetros regionales' (set to 'RP001 Parámetros regionales 1.0.3 revisión A'). The right section, 'Suministro de información', contains several fields: 'Únase a la UEI' with a 'Confirmar' button, a note 'Este dispositivo final se puede registrar en la red', 'DevEUI' with a 'Generar' button and '0/50 usado', 'Clave de aplicación' with a 'Generar' button, and 'ID del dispositivo final' with the value 'trackerd-a'.

Figura 4.17: Ingreso de información del TrackerD.

El nodo TrackerD transmite la información hacia TTN mediante tramas de datos codificadas. Este mecanismo optimiza la eficiencia energética y el ancho de banda del protocolo LoRaWAN. La plataforma requiere un algoritmo decodificador para interpretar los mensajes entrantes. Esta traducción de datos habilita la lectura estructurada de las coordenadas para el usuario final. La Figura 4.18 ilustra la parametrización de la sección de formateadores de carga

útil (payload formatters). El bloque de código empleado proviene del repositorio oficial del fabricante Dragino [50].

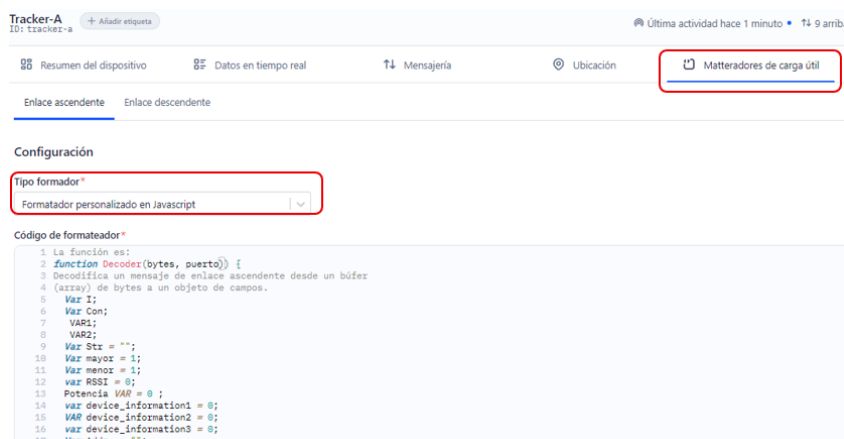


Figura 4.18: Configuración del decodificador.

4.6. Funciones de Google Cloud

La arquitectura telemática emplea una Función de Google Cloud (Cloud Functions) como capa intermedia de software. El sistema ejecuta este componente antes del alojamiento definitivo de la información en Firebase. La lógica programada procesa y estructura los paquetes de datos entrantes. El algoritmo clasifica las lecturas de cada nodo TrackerD dentro de distintos árboles o contenedores JSON. Esta distribución jerárquica de la base de datos optimiza la administración concurrente de múltiples equipos de rescate.

4.7. Firebase Realtime Database

4.7.1. Creación de proyecto en Firebase

El desarrollo requiere la creación de una cuenta de administrador en la plataforma Firebase. El sistema aloja el entorno de trabajo bajo el identificador rescatistas-areas-remotas. Posteriormente, la interfaz despliega las opciones *Realtime Database* y *Crear base de datos*. La Figura 4.19 ilustra este proceso.

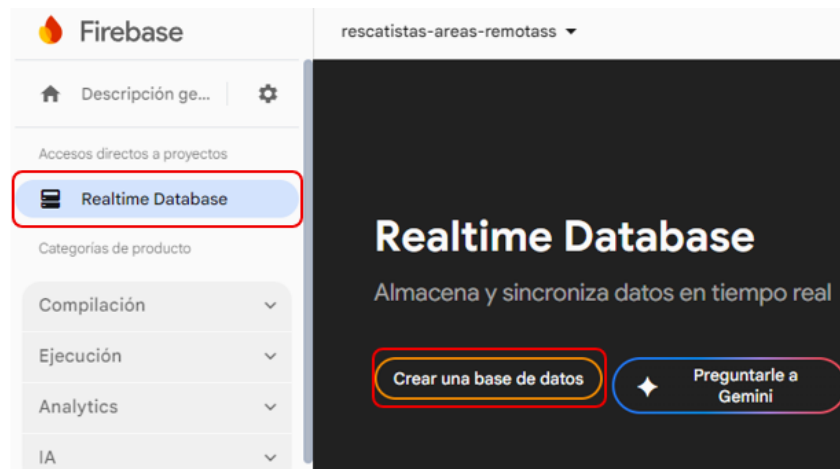


Figura 4.19: Creación de base de datos.

La inicialización del servicio abre un panel para la configuración de ubicación y reglas de seguridad. La Figura 4.20 detalla la selección de la región geográfica. El diseño establece el servidor ***us-central1***. Esta ubicación minimiza la latencia de red debido a su proximidad física con el país de operación.

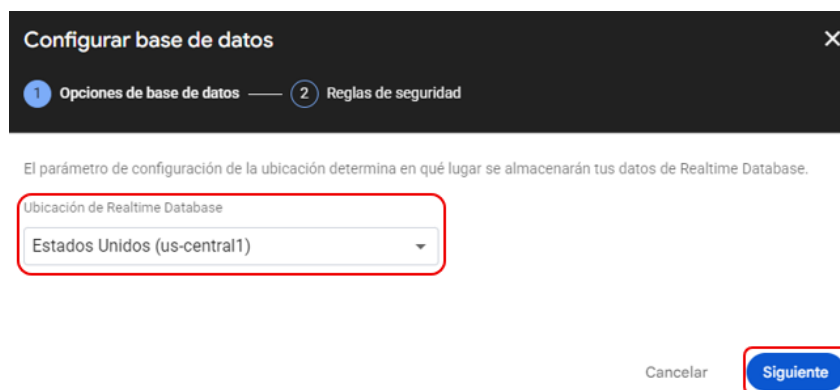


Figura 4.20: Opciones de base de datos.

En el apartado de ***Reglas de seguridad***, se selecciona el modo de prueba. La Figura 4.21 expone esta configuración. Esta opción habilita temporalmente la escritura de información en la base de datos sin requerir autenticación previa.



Figura 4.21: Reglas de seguridad.

Tras la creación del proyecto, la plataforma genera una URL base correspondiente a la dirección del servidor. El enlace requiere una modificación de sufijo para habilitar la recepción estructurada de información. El proyecto emplea el plan de facturación Blaze (pago por uso) de Firebase. Este nivel de servicio permite el despliegue de Google Cloud Functions. Un plan Spark (gratuito) soporta una arquitectura equivalente, pero transfiere los datos desde The Things Network directamente hacia Firebase sin una capa de preprocesamiento. Esta carencia de lógica intermedia altera la distribución jerárquica de los registros almacenados.

4.7.2. Creación de una función en Google Cloud

La integración nativa entre plataformas habilita la implementación de la lógica de procesamiento en la consola de Google Cloud Platform (GCP).

El entorno de la nube despliega el servicio Cloud Functions. El proceso de configuración inicia mediante la opción **Crear función**. La plataforma establece **Node.js** como entorno de ejecución. Este lenguaje ofrece un rendimiento óptimo para el manejo de peticiones asíncronas en tiempo real. La Figura 4.22 expone la definición de los parámetros operativos y de región.

Configurar

Nombre de Servicio *
endpointpersonalizado

Región *
us-central1 (Iowa)
[¿Cómo se selecciona la región?](#)

URL del extremo ②
https://endpointpersonalizado-521521055482.us-central1.run.app

Tiempo de ejecución *
Node.js 24

Activador (opcional) ②
[+ Agregar activador](#)

Autenticación *

☒ Permite el acceso público
No se realizarán verificaciones de autenticación.

☐ Necesita autenticación
Selecciona entre Identity and Access Management (IAM) o Identity-Aware Proxy (IAP).

Figura 4.22: Configuración De función de Google Cloud.

La implementación de la lógica de procesamiento requiere la modificación de los archivos fuente *index.js* y *package.json*. La Figura 4.23 muestra esta interfaz de programación. El Anexo A contiene el detalle de estos bloques de código. El despliegue del servicio genera una dirección URL de punto de conexión (Endpoint). Este enlace opera nativamente como una API REST sin requerir parámetros adicionales.

endpointpersonalizado Región: us-central1 URL: <https://endpointpersonalizado-521521055482.us-central1.run.app>

Observabilidad Revisiones **Fuente** Activadores Redes Seguridad YAML

Fuente Imagen base: Node.js 24 (Ubuntu 24) Punto de entrada de la función: ttn2Firebase [Editar fuente](#)

☒ index.js ☒ package.json

```

1  const functions = require("firebase-functions");
2  const admin = require("firebase-admin");
3
4  admin.initializeApp({
5    databaseURL: "https://rescatistas-areas-remotas-default-rtdb.firebaseio
6  });
7
8  exports.ttn2Firebase = functions.https.onRequest(async (req, res) => {
9
10   if (req.method !== "POST") {
11     return res.status(405).send('Método no permitido. Usa POST.');
12   }
13
14   try {
15     const body = req.body;
16
17     const deviceId = body.end_device_ids ? body.end_device_ids.device_id
18
19     const datosUtiles = body.uplink_message && body.uplink_message.decoded
20                       ? body.uplink_message.decoded_payload
21                       : {};

```

[Descargar archivo](#)

Figura 4.23: Modificación de códigos fuente.

4.7.3. Configuración en The Things Network

La interfaz de gestión de la aplicación administra la salida de datos mediante el menú integraciones. Este apartado contiene la herramienta **Ganchos de red** (Webhooks). La ejecución del comando **Agregar webhook** despliega la ventana de configuración. Este panel establece los parámetros de retransmisión. La Figura 4.24 muestra esta interfaz de red.

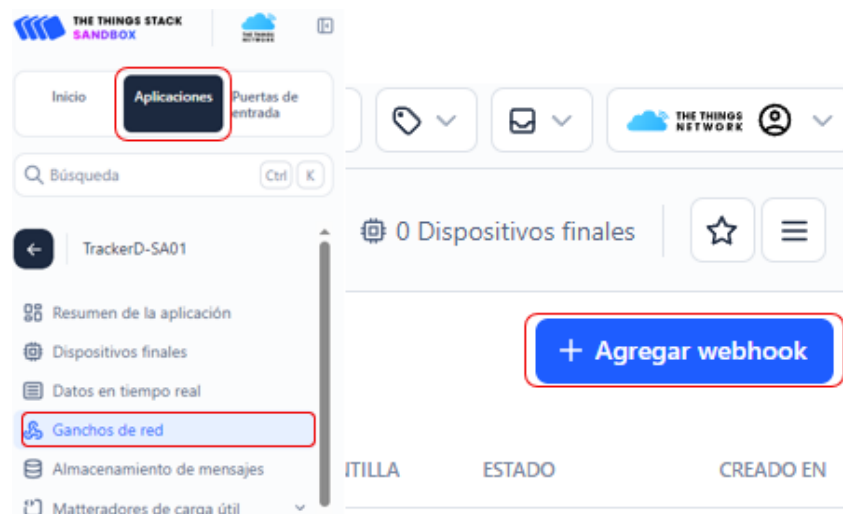


Figura 4.24: Agregar webhook.

La omisión de Google Cloud Functions (arquitectura con plan Spark) exige la concatenación del sufijo **registros_ttn.json** al final de la URL base. Esta modificación de la ruta habilita la API REST. La plataforma instruye a Firebase para la creación de un nodo contenedor raíz denominado **registros_ttn**. Este entorno aloja todos los datos entrantes.

El formulario de configuración requiere el ingreso de los parámetros de enlace. La Figura 4.25 expone los campos solicitados. El diseño de red asigna el identificador **firebase-conector** al campo **Webhook ID**. El sistema establece JSON como formato de carga útil. Esta estructura de datos constituye el estándar de interacción nativo de Firebase. El campo **Base URL** recibe la dirección del endpoint. Finalmente, la interfaz habilita la casilla **Mensaje de enlace ascendente**. Este parámetro autoriza la transmisión de las tramas de información hacia la nube.

The image shows a configuration page for a device named 'TrackerD-SA01' with ID 'lorawan-gps-tracker-01'. Under the 'Configuraciones generales' section, the 'Webhook ID' is set to 'firebase-conector'. The 'Formato webhook' is set to 'JSON'. The 'Base URL' is 'https://us-central1-rescatistas-areas-remotas.cloudfunctions.net/t'. At the bottom, the 'Mensaje de enlace ascendente' checkbox is checked, and the path '/camino/a/webhook' is shown. A red box highlights the 'Formato webhook', 'Base URL', and 'Mensaje de enlace ascendente' fields.

TrackerD-SA01 + Añadir etiqueta
ID: lorawan-gps-tracker-01

Configuraciones generales

Webhook ID *

firebase-conector

Formato webhook *

JSON

Base URL *

https://us-central1-rescatistas-areas-remotas.cloudfunctions.net/t

☒ Mensaje de enlace ascendente /camino/a/webhook

La aplicación recibe un mensaje de enlace ascendente

Figura 4.25: Configuración webhook.

4.8. Estación de monitoreo

El sistema requiere una interfaz gráfica para la visualización eficiente de los nodos TrackerD. La estación de monitoreo emplea un software desarrollado en el lenguaje Python. Esta aplicación centraliza la adquisición, el procesamiento y la representación cartográfica de las coordenadas espaciales.

4.8.1. Arquitectura lógica del software

La estructura interna del programa opera mediante entornos funcionales interconectados. La Figura 4.26 expone el diagrama de arquitectura del sistema.

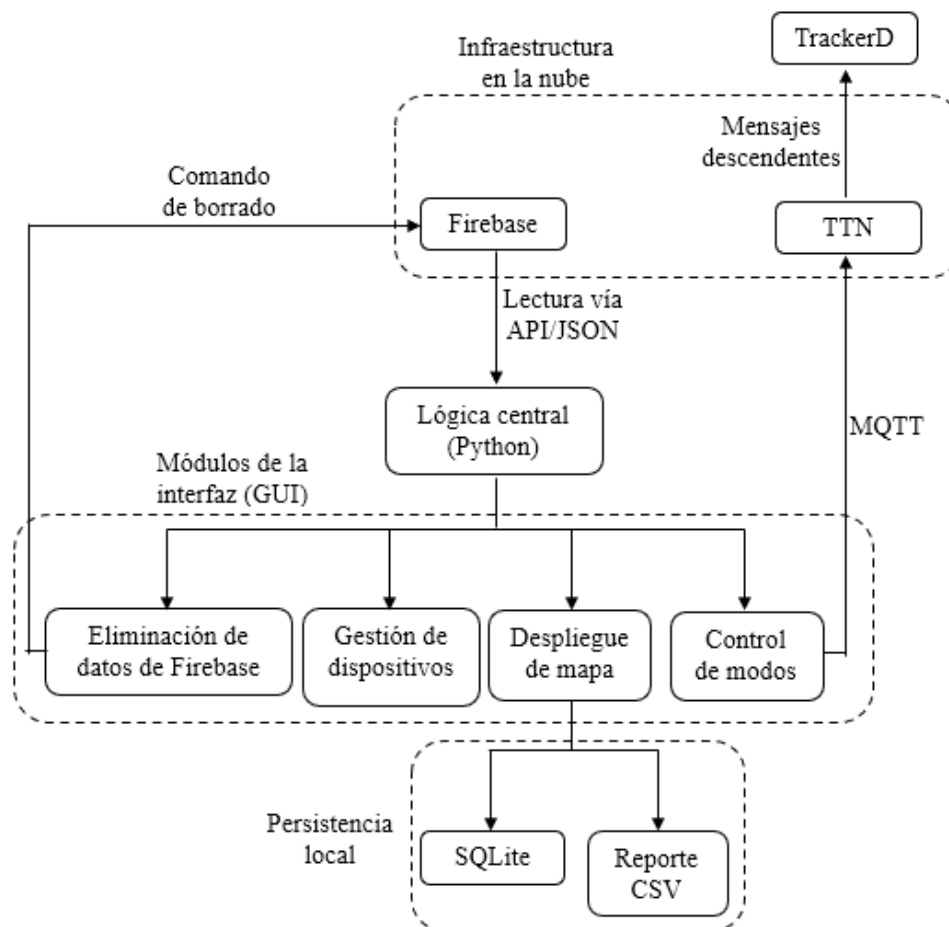
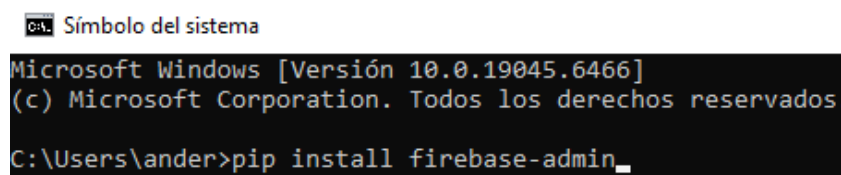


Figura 4.26: Diagrama de bloques del software.

El diseño segmenta el flujo de datos en cuatro niveles operativos principales. La **Infraestructura en la nube** provee el acceso a los historiales de ubicación y enruta los comandos de control remoto. El módulo de **Lógica central** actúa como el núcleo de procesamiento bidireccional entre la red externa y la estación de trabajo local. A nivel operativo, los **Módulos de la interfaz** centralizan el despliegue cartográfico interactivo y las herramientas de administración de misiones. Finalmente, el entorno de **Persistencia local** asegura el respaldo físico de la información generada durante cada evento de rescate. Las siguientes subsecciones detallan la implementación técnica de cada componente de esta arquitectura.

4.8.2. Lógica central (Python)

El entorno de desarrollo requiere la instalación previa del intérprete de Python en la estación de trabajo. La interacción nativa con la base de datos exige la integración del kit de desarrollo de software (SDK) *firebase-admin*. La consola de comandos del sistema ejecuta la instalación de este paquete. La Figura 4.27 detalla la sintaxis del comando.



```
C:\> Símbolo del sistema

Microsoft Windows [Versión 10.0.19045.6466]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\ander>pip install firebase-admin_
```

Figura 4.27: Instalación de SDK firebase-admin.

La autenticación segura entre el software local y la nube requiere la generación de una clave privada. La plataforma Firebase emite este certificado con formato JSON desde el panel *Cuentas de servicio*. La Figura 4.28 expone esta interfaz de seguridad.

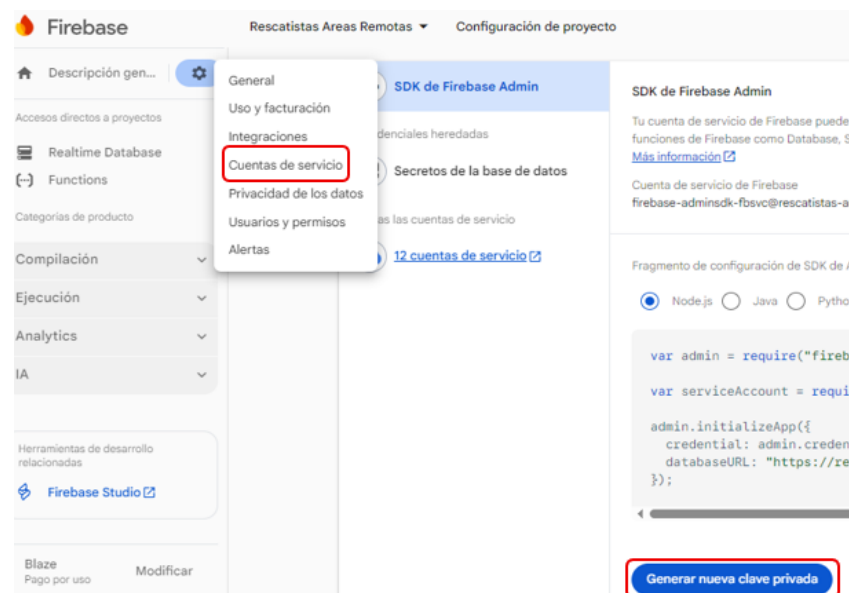
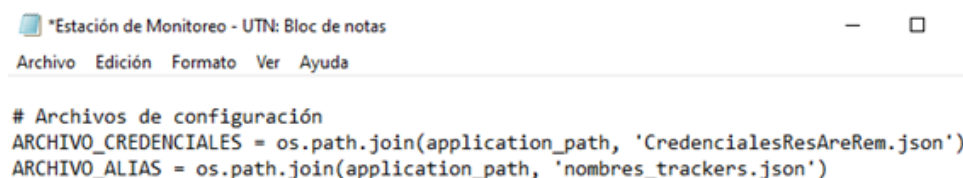


Figura 4.28: Creación de nueva clave privada.

La arquitectura del programa exige el alojamiento físico de esta credencial en el directorio principal del proyecto. La nomenclatura del archivo constituye un parámetro crítico. El código

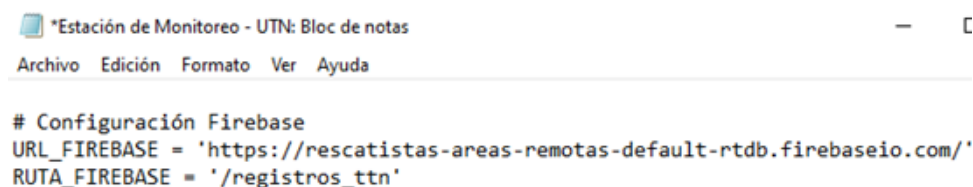
fuente referencia este texto exacto para autorizar el acceso. El diseño asigna el nombre **CredencialesResAreRem.json** a este documento de validación. La Figura 4.29 expone la declaración de este parámetro dentro de la sintaxis del programa.



```
# Archivos de configuración
ARCHIVO_CREDENCIALES = os.path.join(application_path, 'CredencialesResAreRem.json')
ARCHIVO_ALIAS = os.path.join(application_path, 'nombres_trackers.json')
```

Figura 4.29: Referencia a la credencial.

Adicionalmente, el establecimiento del enlace requiere la configuración del punto de conexión. El código fuente declara la dirección URL de la base de datos y la ruta del nodo contenedor. El sistema emplea el directorio **/registros_ttn** para la extracción de las tramas de información. La Figura 4.30 ilustra la sintaxis de estos parámetros de red. La lógica central utiliza toda esta estructura para habilitar las peticiones de lectura vía API y extraer los datos en formato JSON. El Anexo B documenta el script completo del programa, incluyendo estas funciones de conexión a la base de datos.



```
# Configuración Firebase
URL_FIREBASE = 'https://rescatistas-areas-remotas-default-rtdb.firebaseio.com/'
RUTA_FIREBASE = '/registros_ttn'
```

Figura 4.30: Registro del endpoint.

4.8.3. Eliminación de datos de Firebase

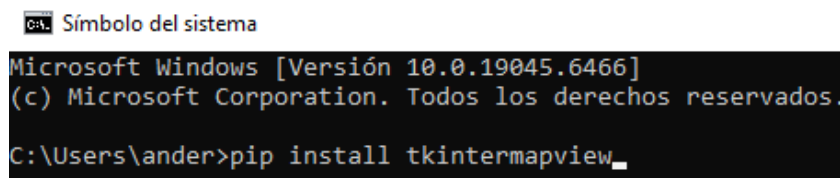
La interfaz del sistema integra una herramienta de depuración en la nube. La ejecución de este módulo emite una petición de borrado (comando DELETE) hacia Firebase Realtime Database. El proceso reutiliza la autenticación establecida previamente por el SDK firebase-admin sin requerir dependencias adicionales. Esta instrucción vacía el nodo contenedor de registros. La rutina lógica libera espacio de almacenamiento y elimina información de misiones de rescate obsoletas.

4.8.4. Gestión de dispositivos

El módulo de gestión administra la identificación de los equipos desplegados en campo. La interfaz de la estación base integra un proceso de escaneo automatizado. Esta rutina lee la estructura de datos en Firebase y detecta los nodos TrackerD homologados y activos. El software extrae los identificadores únicos (ID) de cada dispositivo detectado en la red. Posteriormente, el panel de control habilita la asignación de alias de texto personalizados para cada identificador. Esta función vincula lógicamente el código de hardware del dispositivo con el perfil del rescatista portador. El programa almacena temporalmente este emparejamiento en memoria para facilitar el reconocimiento visual en el mapa. El Anexo B detalla la lógica de programación detrás de esta asignación de variables.

4.8.5. Despliegue de mapa

El módulo de representación visual requiere la implementación de la librería *tkintermapview*. La preparación del entorno de desarrollo exige la descarga de este paquete mediante la consola de comandos (CMD). La Figura 4.31 expone la sintaxis exacta para la instalación de esta dependencia cartográfica.



CA Símbolo del sistema

```
Microsoft Windows [Versión 10.0.19045.6466]  
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.  
C:\Users\ander>pip install tkintermapview_
```

Figura 4.31: Instalación de librería tkintermapview.

El sistema emplea esta herramienta para la carga interactiva de mapas. La inicialización de una sesión de rastreo requiere el ingreso de un identificador para la misión y la selección de los dispositivos involucrados. El programa compila estos parámetros y despliega la ubicación espacial en tiempo real de los nodos TrackerD. Una vez terminada la sesión, se habilita el módulo de almacenamiento persistente.

4.8.5.1. SQLite

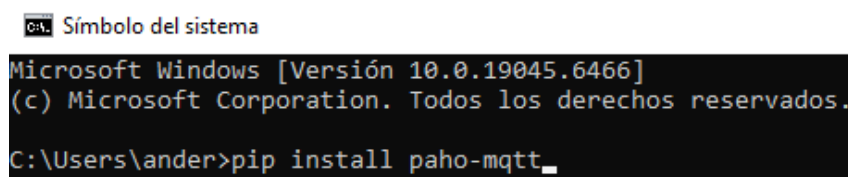
Al iniciar una misión, el sistema genera dinámicamente un archivo de base de datos relacional bajo el motor SQLite (.db). Durante el transcurso de la sesión, el programa realiza una persistencia inmediata de cada registro recibido en este repositorio local. Esta arquitectura evita la saturación de consultas hacia la nube, al reducir las peticiones constantes de lectura y escritura a Firebase, y segmenta la información de forma ordenada para cada evento de búsqueda y rescate.

4.8.5.2. Reporte CSV

Paralelamente a la creación de la base de datos, la interfaz habilita un control secundario para la generación de reportes planos. La ejecución de esta herramienta extrae los registros de la misión y los exporta hacia un archivo CSV. Este formato estandariza los datos de geolocalización para su posterior análisis en herramientas de cálculo externas. El sistema nombra este documento de forma idéntica a la sesión activa.

4.8.6. Control de modos

La transmisión de comandos hacia los nodos físicos requiere la implementación de la librería *paho-mqtt*. La consola del sistema ejecuta la descarga de este paquete de comunicación. La Figura 4.32 expone la sintaxis para la instalación de esta dependencia de red.



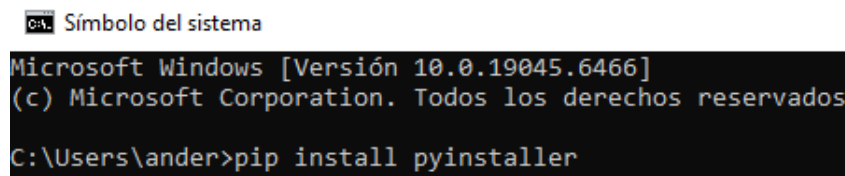
```
Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.19045.6466]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.
C:\Users\ander>pip install paho-mqtt_
```

Figura 4.32: Instalación de librería paho-mqtt.

El enlace bidireccional bajo el protocolo MQTT exige una autenticación estricta con TTN. La consola de administración de esta plataforma genera una Clave API (API Key) para autorizar la conexión del programa externo. La Figura 4.33 detalla la interfaz de creación de este parámetro de seguridad.

4.8.7. Empaquetado del software

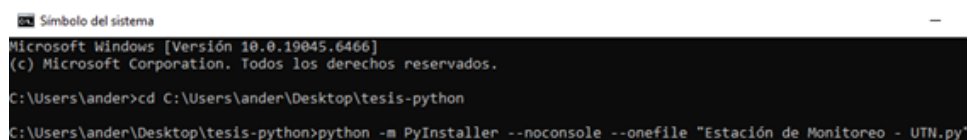
El código fuente del sistema reside en un archivo con extensión **.py**. El despliegue operativo exige la conversión de este script hacia un formato ejecutable. Esta transformación garantiza la portabilidad de la aplicación en estaciones de trabajo sin el intérprete de Python preinstalado. El proceso de empaquetado emplea la herramienta **pyinstaller**. La descarga de esta utilidad opera desde la consola de comandos. La Figura 4.35 detalla el comando de instalación.



```
ca: Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.19045.6466]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.
C:\Users\ander>pip install pyinstaller
```

Figura 4.35: PyInstaller.

La compilación requiere la navegación previa hacia el directorio raíz del proyecto mediante la instrucción **cd**. La ejecución del comando de empaquetado inicia la conversión del código fuente. La Figura 4.36 muestra la sintaxis exacta de esta instrucción.



```
ca: Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.19045.6466]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.
C:\Users\ander>cd C:\Users\ander\Desktop\tesis-python
C:\Users\ander\Desktop\tesis-python>python -m PyInstaller --noconsole --onefile "Estación de Monitoreo - UTN.py"
```

Figura 4.36: Convertir a ejecutable.

El compilador genera el archivo ejecutable resultante dentro de una subcarpeta predeterminada denominada **dist**. La arquitectura del software utiliza rutas relativas para la lectura de dependencias externas. Esta característica estructural obliga la reubicación del ejecutable hacia el directorio principal. El programa final y el documento **CredencialesResAreRem.json** deben residir obligatoriamente en la misma ruta física. Esta configuración jerárquica garantiza la correcta autenticación del programa con la base de datos.

4.9. Pruebas y validación

4.9.1. Funcionamiento del software de la estación de monitoreo

La validación operativa del sistema requiere la energización simultánea de los TrackerD. El módulo de representación visual confirma la correcta adquisición de las coordenadas de ambos equipos. La Figura 4.37 expone el despliegue cartográfico con el rastreo en tiempo real de los dispositivos.

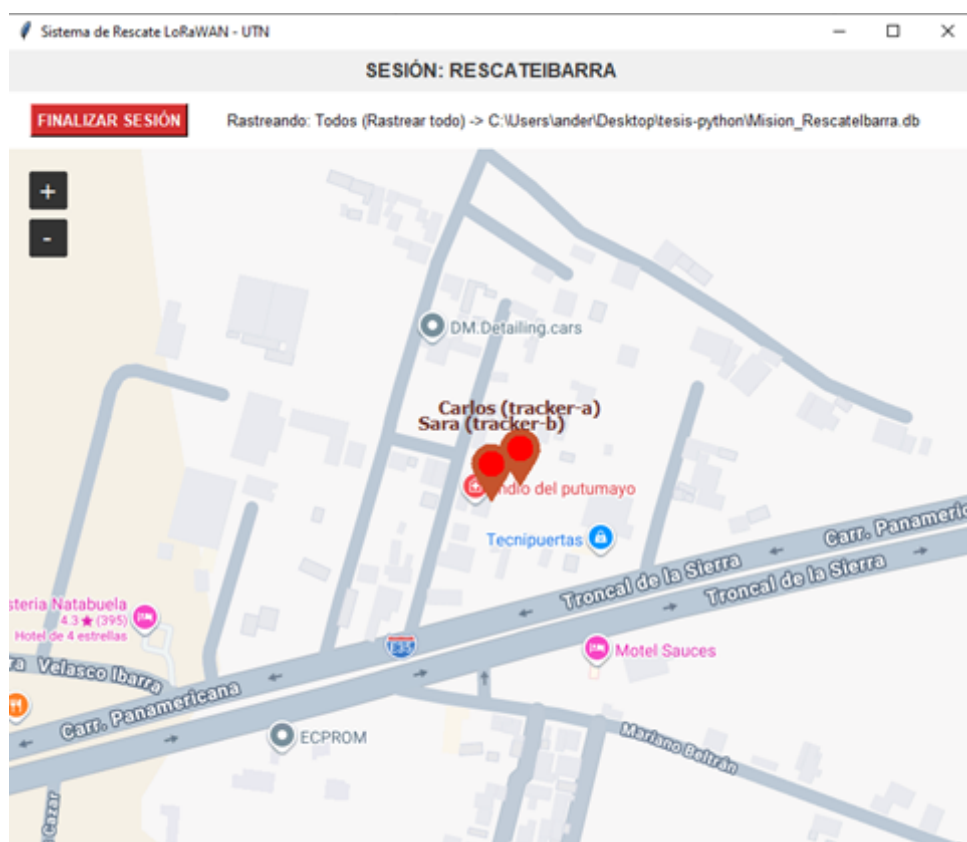


Figura 4.37: Seguimiento de los TrackerD.

La comprobación de los comandos de control remoto emplea el *Monitor Serial* del entorno de desarrollo (IDE) de Arduino. La arquitectura LoRaWAN de Clase A condiciona la recepción de estos mensajes. El protocolo exige la transmisión previa de un mensaje ascendente para habilitar la apertura temporal de las ventanas de escucha en el nodo físico. TTN retiene el enlace descendente hasta detectar esta disponibilidad en el canal. La Figura 4.38 ilustra la interfaz

operativa durante la emisión de esta orden.

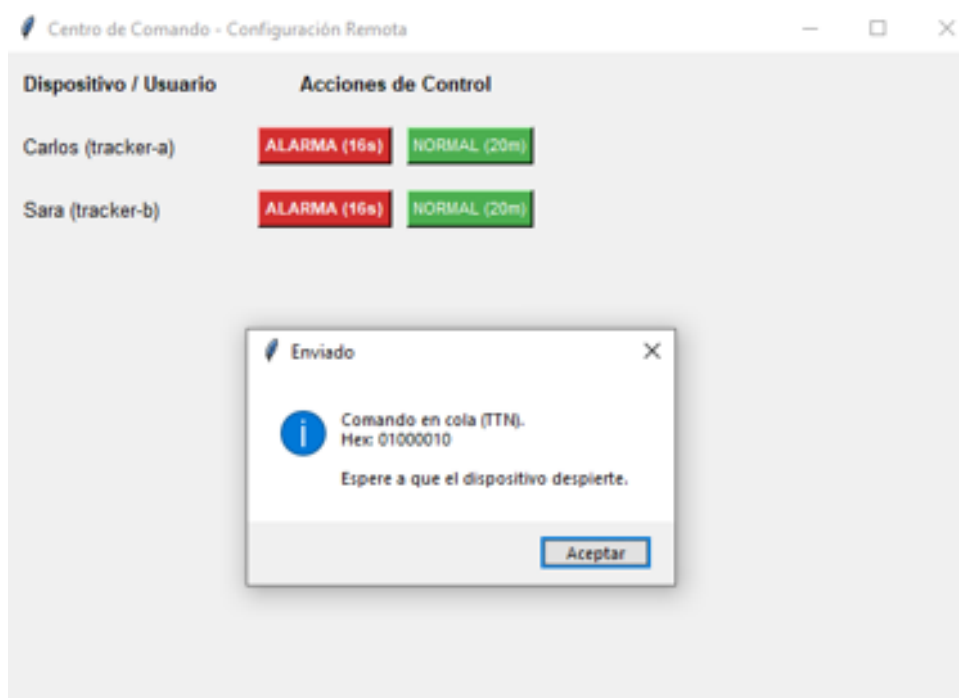


Figura 4.38: Interfaz del Centro de Comandos.

La evaluación confirma la conmutación remota exitosa de los parámetros físicos. La Figura 4.39 documenta la activación del modo alarma. La terminal serial del dispositivo confirma la recepción de la carga útil en la variable **Received** y reconfigura el ciclo de trabajo de transmisión (TDC) hacia un intervalo de 16000 ms.

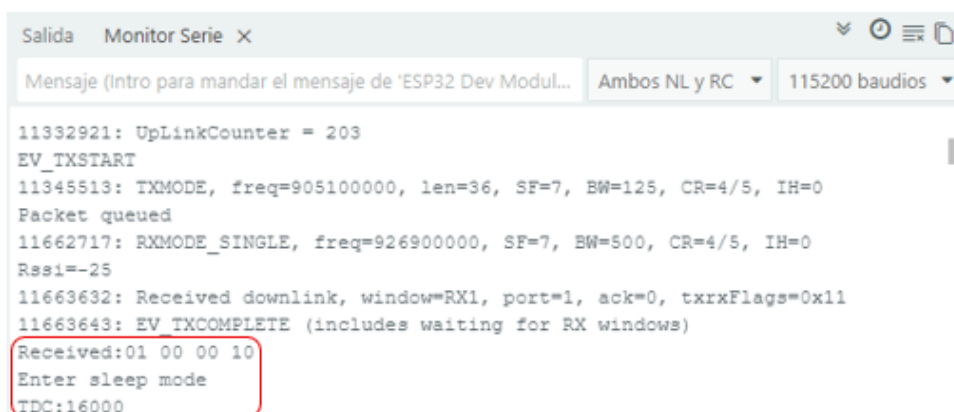


Figura 4.39: Activación del Modo Alarma.

Posteriormente, el sistema valida la recepción del comando inverso para el restablecimiento del equipo. La Figura 4.40 evidencia la transición exitosa hacia el modo normal dentro de los registros del hardware.



```
Salida Monitor Serie X
Mensaje (Intro para mandar el mensaje de 'ESP32 Dev Modul... Ambos NL y RC 115200 baudios
11325734: UpLinkCounter = 209
EV_TXSTART
11338325: TXMODE, freq=904700000, len=36, SF=7, BW=125, CR=4/5, IH=0
Packet queued
11655528: RXMODE_SINGLE, freq=925700000, SF=7, BW=500, CR=4/5, IH=0
Rssi=-33
11656444: Received downlink, window=RX1, port=1, ack=0, txrxFlags=0x11
11656454: EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)
Received:01 00 04 B0
Enter sleep mode
TDC:1200000
```

Figura 4.40: Activación del Modo Normal.

4.9.2. Pruebas de funcionamiento del gateway en un vehículo

La arquitectura de hardware del gateway opera con un nivel de tensión de 5V en corriente continua (DC). Esta característica técnica viabiliza la energización del equipo de telecomunicaciones mediante los puertos USB estándar integrados en la cabina de un vehículo. La Figura 4.41 documenta el acoplamiento eléctrico y la inicialización del dispositivo en un entorno móvil.



Figura 4.41: Conexión del gateway a puerto USB de un vehículo.

El despliegue de campo requiere la instalación exterior del elemento radiante, la antena Dragino BLG-AN-040, para la ejecución de las pruebas experimentales. La estructura contempla la fijación de este componente sobre la carrocería del automóvil para optimizar la propagación de las ondas de radio. La Figura 4.42 expone la adaptación física de la antena en el vehículo.



Figura 4.42: Adaptación de la Antena en un automóvil.

El panel de la tarjeta electrónica dispone de un indicador luminoso (LED) para la validación de la red. La iluminación de este componente en color verde confirma el establecimiento exitoso del enlace hacia internet mediante la red celular. La Figura 4.43 evidencia el estado operativo de esta conexión inalámbrica.



Figura 4.43: Verificación de conexión celular.

4.9.3. Validación de los TrackerD

Para cuantificar el desempeño de la comunicación de los TrackerD, se definieron seis indicadores de rendimiento. Estos parámetros permiten evaluar no solo la conectividad, sino también la robustez de la comunicación.

1. Tasa de éxito de posicionamiento

2. Intervalo de transmision

3. Envíos perdidos

4. Airtime

5. Indicador de intensidad de señal recibida

6. Relación señal-ruido

4.9.3.1. Evaluación del sistema sobre un automóvil

La evaluación integral de la infraestructura de red requiere la activación simultánea de ambos dispositivos bajo el modo alarma. El ensayo de campo comprende un desplazamiento vehicular sobre la ruta E35, en el tramo comprendido entre las localidades de Ibarra y Natabuela, provincia de Imbabura. El sistema consolida los registros espaciales dentro del reporte tabular (.csv) al finalizar la sesión. La Tabla 4.4 expone un fragmento representativo de las tramas geolocalizadas extraídas durante el recorrido. El Anexo C contiene el historial de ubicaciones íntegro de la prueba.

Tabla 4.4: Datos de los TrackerD sobre un vehículo.

ID Tracker	Usuario Asignado	Hora	Latitud	Longitud
tracker-a	Carlos	1:06:28	0,34771	-78,124256
tracker-b	Sara	1:06:29	0,347525	-78,123928
tracker-a	Carlos	1:07:03	0,347465	-78,123904
tracker-b	Sara	1:07:03	0,347481	-78,124024
tracker-a	Carlos	1:07:33	0,347501	-78,123992
tracker-b	Sara	1:07:37	0,347517	-78,123776
tracker-a	Carlos	1:08:10	0,346987	-78,124504
tracker-b	Sara	1:08:11	0,347054	-78,124392
tracker-b	Sara	1:08:46	0,346647	-78,1258
tracker-a	Carlos	1:08:52	0,346541	-78,12636
tracker-b	Sara	1:09:23	0,347603	-78,126664
tracker-a	Carlos	1:09:25	0,347751	-78,126888
tracker-b	Sara	1:09:57	0,348013	-78,12672
tracker-a	Carlos	1:10:02	0,348142	-78,126896
tracker-b	Sara	1:10:36	0,34792	-78,128776
tracker-a	Carlos	1:10:36	0,347951	-78,128896

Las Tablas 4.5 y 4.6 resumen el tabulado de métricas de rendimiento para cada nodo físico. Los resultados demuestran una eficacia operativa del 100 % tanto en la adquisición satelital de coordenadas GPS como en la transmisión de paquetes mediante el protocolo LoRa. Los promedios registrados para la intensidad de señal y la relación señal a ruido corroboran la existencia de una línea de vista directa sostenida hacia el gateway. La ausencia de atenuación severa por obstáculos físicos permite a los nodos negociar la modulación más rápida de la red, correspondiente al factor de dispersión 7 (SF7). Esta configuración de espectro ensanchado garantiza el airtime mínimo para cada transmisión registrada.

Tabla 4.5: Métricas de la prueba sobre un automóvil del tracker-a.

Métrica trackerd-a	Valor
Datos enviados	50
Posicionamientos fallidos	0
Posicionamientos exitosos	50
Tasa de éxito de posicionamiento	100 %
Int. Transmisión Max.	55 s
Int. Transmisión Min.	29 s
Int. Transmisión promedio	35,61 s
Envíos perdidos	0
Airtime Max.	0,066816 s
Airtime Min.	0,066816 s
Airtime promedio	0,066816 s
RSSI Max.	-34 dBm
RSSI Min.	-46 dBm
RSSI promedio	-38,34 dBm
SNR Max.	11,8 dB
SNR Min.	9,2 dB
SNR promedio	10,82 dB

Tabla 4.6: Métricas de la prueba sobre un automóvil del tracker-b.

Métrica trackerd-b	Valor
Datos enviados	51
Posicionamientos fallidos	0
Posicionamientos exitosos	51
Tasa de éxito de posicionamiento	100 %
Int. Transmisión Max.	41 s
Int. Transmisión Min.	31 s
Int. Transmisión promedio	34,66 s
Envíos perdidos	0
Airtime Max.	0,077056 s
Airtime Min.	0,077056 s
Airtime promedio	0,077056 s
RSSI Max.	-30 dBm
RSSI Min.	-54 dBm
RSSI promedio	-46,31 dBm
SNR Max.	14,2 dB
SNR Min.	8,2 dB
SNR promedio	13,09 dB

4.9.3.2. Evaluación de la infraestructura bajo LOS moderado y comparación con Google Maps

La presente prueba define los límites de alcance de la infraestructura, específicamente del enlace radioeléctrico del *gateway* con los dispositivos TrackerD. A su vez, compara las posiciones obtenidas en cinco puntos estratégicos con Google Maps para verificar el funcionamiento del módulo GPS de los nodos. Por lo tanto, se activa el modo alarma en ambos dispositivos. Las tablas del Anexo D muestran el cambio del modo normal al modo alarma; en consecuencia, el primer ciclo tarda 20 minutos. Para evitar el sesgo en las métricas, esta prueba analiza los datos a partir del cuarto ciclo.

El escenario para esta prueba es el parque Ciudad Blanca de la ciudad de Ibarra. El *gateway* se posiciona de forma fija en un extremo del parque, como ilustra la Figura 4.44. Luego, dos personas con los dispositivos TrackerD recorren la distancia desde ese punto hasta el otro extremo del parque y regresan.

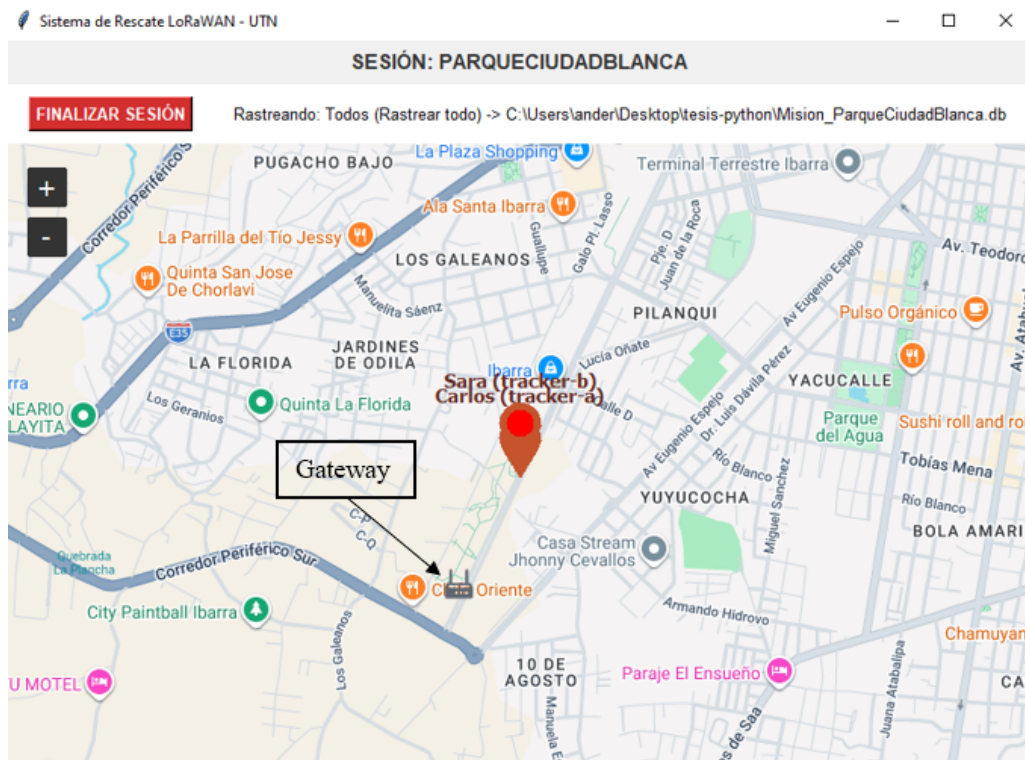


Figura 4.44: Mapa de prueba en un parque.

La primera pérdida de un paquete del trackerd-a ocurre a los 223 m. A partir de esa distancia, el dispositivo pierde tramas de paquetes, sumando un total de 43 datos perdidos, como se observa en la Tabla 4.7. La causa principal de este comportamiento es el uso del SF8. El protocolo LoRaWAN realiza un salto a un canal más ancho (500 kHz), lo que reduce el airtime a 0,028288 s. Sin embargo, el mayor ancho de banda incrementa el ruido electromagnético y, en consecuencia, la probabilidad de perder tramas de datos. Por esta razón, el SNR adquiere valores más negativos; durante la prueba, el demodulador del gateway registró señales con un SNR de hasta -11,5 dB.

Tabla 4.7: Métricas de la prueba en LOS moderado del trackerd-a.

Métricas trackerd-a	Valor
Datos enviados	50
Posicionamientos fallidos	0
Posicionamientos exitosos	50
Tasa de éxito de posicionamiento	100 %
Int. Transmisión Max.	211 s
Int. Transmisión Min.	30 s
Int. Transmisión promedio	69,04 s
Envíos perdidos	43
Airtime Max.	0,028288 s
Airtime Min.	0,028288 s
Airtime promedio	0,028288 s
RSSI Max.	-35 dBm
RSSI Min.	-112 dBm
RSSI promedio	-89,36 dBm
SNR Max.	13,2 dB
SNR Min.	-11,5 dB
SNR promedio	1,42 dB

Para comparar la calidad del posicionamiento GPS con Google Maps, se calcula el error de posición absoluta. Este proceso determina la distancia entre las dos localizaciones aplicando la Ecuación 4.1.

$$d = 2 \cdot R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

- d : es la distancia final calculada entre los dos puntos.
- R : es el radio medio de la Tierra (por convención, se utiliza el valor de 6371 km o 6371000 metros).
- φ_1 y φ_2 : son las latitudes del punto 1 y punto 2, respectivamente.
- λ_1 y λ_2 : son las longitudes del punto 1 y punto 2, respectivamente.

La Tabla 4.8 detalla el registro de cinco puntos estratégicos, ordenados de forma ascendente según su distancia al origen, donde el quinto punto es el más lejano. El error máximo del trackerd-a es de 16,57 m. Sin embargo, Google Maps despliega un margen mayor que rodea la ubicación (véase la Figura 4.45); esta zona representa una tolerancia de hasta 20 m [51], lo que confirma que el módulo GPS del nodo funciona correctamente. Respecto al alcance de la infraestructura, el paquete 28 representa la transmisión más lejana (longitud: 0,345429, latitud: -78,132208). El *gateway* demoduló esta señal a una distancia de 1,90 km. Cabe recalcar que el *gateway dragino-rescatistas-areas-remotas* recibe el 68,76 % de las tramas en esta prueba, mientras que otro *gateway* capta el porcentaje restante. Esta característica es inherente a la arquitectura de la red LoRaWAN y demuestra la adaptabilidad de la infraestructura.

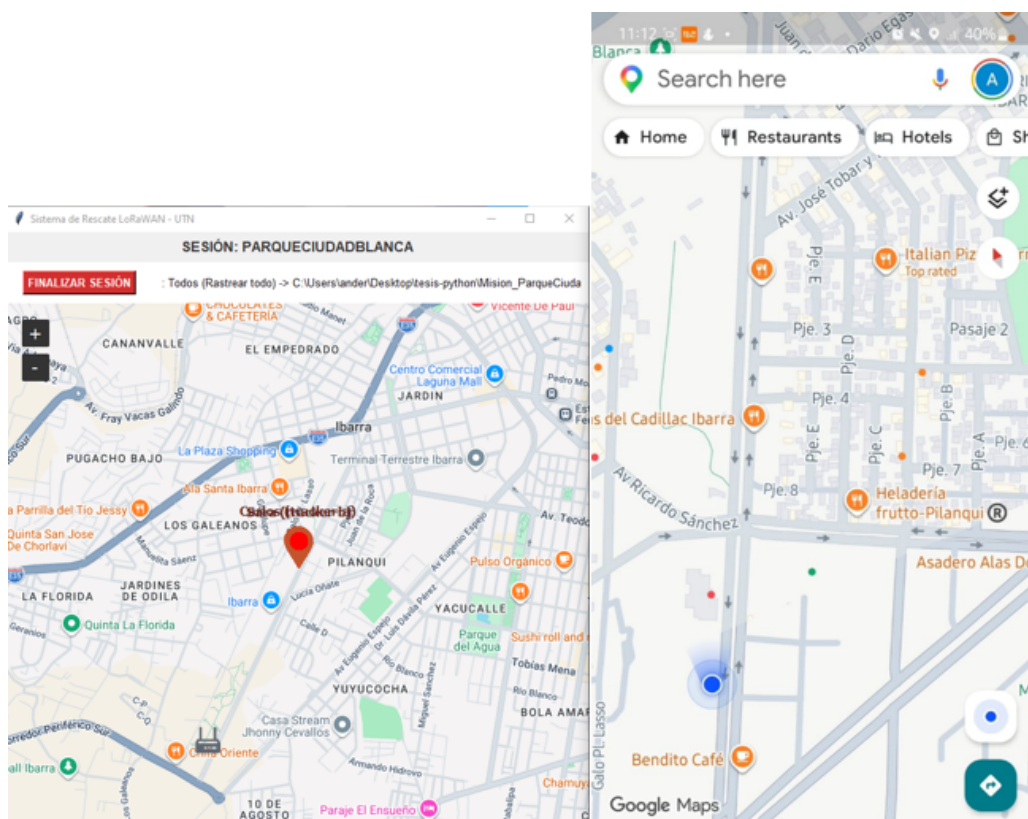


Figura 4.45: Comparación de ubicación con GoogleMaps.

Tabla 4.8: Error con respecto a Google Maps del trackerd-a.

N° paquete	Hora	trackerd-a		Google Maps		Error de posición absoluto km
7	10:55:26	0,330344	-78,139904	0,330396	-78,13987	0,006789237
12	10:58:27	0,331937	-78,138912	0,331935	-78,13906	0,016124527
17	11:02:56	0,33443	-78,137784	0,334403	-78,13793	0,01650946
22	11:11:42	0,339698	-78,135336	0,339564	-78,13539	0,016064453
28	11:23:01	0,345429	-78,132208	0,345578	-78,13221	0,016568417

Por otro lado, los datos de la Tabla 4.9 muestran que el trackerd-b opera con SF7 y un ancho de banda de 125 kHz. Esta configuración se refleja en un airtime constante de 0,073355 s, un SNR que se mantiene por encima de los -6,5 dB y una reducción en la pérdida de paquetes, con un extravío de solo el 14 %. Además, el nodo presenta el fenómeno de arranque en frío (cold start), ya que durante los primeros dos ciclos no logra enlazarse con los satélites; sin embargo, posteriormente fija la posición sin inconvenientes.

Tabla 4.9: Métricas de la prueba en LOS moderado del trackerd-b.

Métricas trackerd-b	Valor
Datos enviados	83
Posicionamientos fallidos	0
Posicionamientos exitosos	83
Tasa de éxito de posicionamiento	100 %
Int. Transmisión Max.	77 s
Int. Transmisión Min.	28 s
Int. Transmisión promedio	37,02 s
Envíos perdidos	14
Airtime Max.	0,077056 s
Airtime Min.	0,071936 s
Airtime promedio	0,073355 s
RSSI Max.	-29 dBm
RSSI Min.	-116 dBm
RSSI promedio	-93,52 dBm
SNR Max.	13,8 dB
SNR Min.	-6,5 dB
SNR promedio	5,0 dB

Respecto a la comparativa del trackerd-b con Google Maps, la Tabla 4.10 indica que el error máximo de la muestra es de 14,03 m. Este valor se adapta aún mejor a la tolerancia de

incertidumbre establecida por Google Maps.

Tabla 4.10: Error con respecto a Google Maps del trackerd-b.

N° paquete	Hora	trackerd-b		Google Maps		Error de posición absoluto km
7	10:54:30	0,330295	-78,139936	0,330209	-78,13986	0,012910012
17	11:00:06	0,3329	-78,138608	0,332843	-78,13866	0,008286016
27	11:06:24	0,336432	-78,136840	0,336518	-78,13688	0,010593873
37	11:12:29	0,340103	-78,135112	0,34008	-78,13517	0,006834541
51	11:22:09	0,346034	-78,132240	0,346006	-78,132117	0,014026634

4.9.3.3. Evaluación de la infraestructura en condiciones de obstrucción topográfica

La siguiente fase de validación evalúa el comportamiento de los nodos TrackerD ante la presencia de un obstáculo topográfico severo. La metodología del ensayo posiciona el gateway de forma estacionaria sobre el vehículo. El recorrido de prueba traza una trayectoria peatonal diseñada para rodear una elevación natural del terreno. La Figura 4.46 ilustra el despliegue espacial y la cartografía de este experimento.



Figura 4.46: Mapa de prueba con obstrucción topográfica.

El análisis de la sesión evidencia una pérdida total de comunicación en el instante en que el relieve bloquea la línea de vista. La superposición de la masa terrestre interrumpe la recepción de paquetes en la estación base. Este fenómeno de sombra electromagnética constituye un comportamiento técnico predecible. Las ondas de radiofrecuencia operativas en la banda ISM de 915 MHz carecen de la longitud de onda necesaria para penetrar accidentes geográficos densos. Por consiguiente, la alta atenuación por difracción justifica la caída del enlace radioeléctrico en esta zona ciega.

4.9.3.4. Evaluación del sistema en zona rural

El análisis topográfico previo justifica la reconfiguración de un parámetro en el nodo trackerd- a con el objetivo de evaluar el sistema bajo un esquema de máxima robustez. Se modifica el factor de esparcimiento, el cual determina la velocidad de transmisión en la capa física de la red.

La configuración de fábrica de los dispositivos delega el control de este parámetro al algoritmo de ADR del estándar LoRaWAN. Este mecanismo evalúa el margen de señal de los paquetes históricos. Ante un enlace con condiciones óptimas (alta proximidad al gateway), TTN emite un comando descendente para retener un SF bajo, como el SF7 a 5470 bps. Por el contrario, ante una atenuación severa, la red instruye el incremento del parámetro hasta el límite regional de SF10 a 980 bps.

La arquitectura del ADR favorece el rendimiento de los nodos estacionarios. El desplazamiento continuo de un dispositivo hacia los límites de cobertura impide la convergencia rápida del algoritmo. Esta latencia de ajuste provoca la retención temporal de un SF bajo en zonas de alta atenuación, lo cual genera la pérdida de tramas de datos.

Para mitigar este fenómeno, en esta prueba se desactiva el ADR en el trackerd-a y se fija el factor de esparcimiento en SF10. Simultáneamente, el trackerd-b conserva la configuración automática de, ambos dispositivos operan con un ancho de banda de 125 kHz. El incremento del SF reduce la velocidad de transmisión, lo que aumenta el airtime para que el receptor pueda demodular las tramas de datos; sin embargo, eleva el consumo energético de la batería. No obstante, este compromiso operativo resulta útil para determinar los límites de cobertura de la infraestructura.

El diseño del experimento contempla un entorno rural forestal con planicie topográfica, ubicado en la parroquia Natabuela, provincia de Imbabura. La instalación ubica el gateway sobre el vehículo a una elevación relativa de cinco metros respecto al nivel del bosque. Esta diferencia de cota geométrica optimiza el alcance del lóbulo de radiación de la antena receptora. La Figura 4.47 presenta la cartografía inicial de este ensayo de campo.

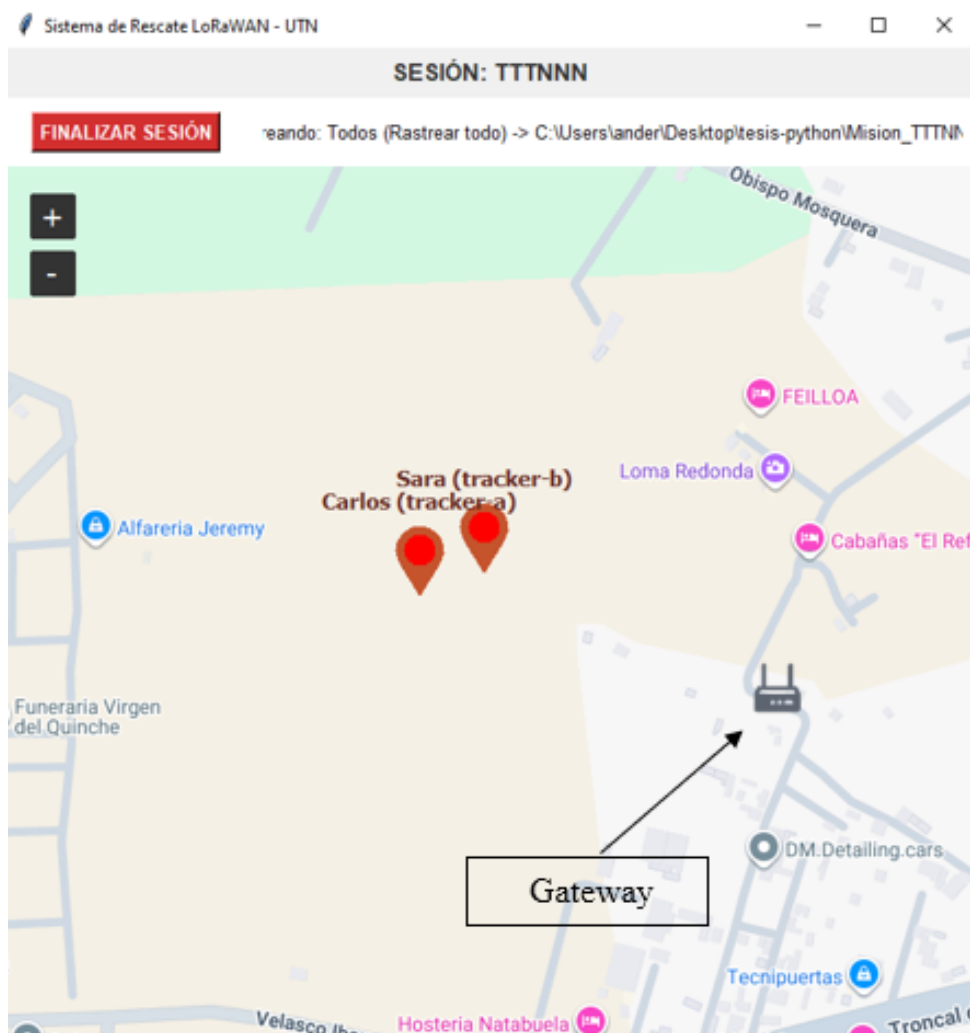


Figura 4.47: Mapa de prueba en zona rural.

La Tabla 4.11 expone un total de 54 mensajes transmitidos por el trackerd-a. Dentro de este conjunto, tres paquetes carecen de las coordenadas de posicionamiento GPS. El Anexo E corrobora que estas tramas vacías corresponden exclusivamente a los primeros envíos de la sesión. Este comportamiento técnico obedece al estado de inicialización del hardware receptor. Tras periodos prolongados de inactividad, el dispositivo ejecuta un arranque en frío. Este proceso requiere mayor tiempo de procesamiento y múltiples ciclos de transmisión para adquirir la señal de los satélites. Posteriormente, el módulo estabiliza la conexión, almacena las efemérides espaciales y acelera el cálculo de la ubicación para los paquetes subsecuentes.

La evaluación de las métricas revela un intervalo de transmisión promedio de 47,58 s para

el trackerd-a, un valor superior a los 41,18 s registrados por el tracker-b bajo el algoritmo ADR (Tabla 4.12). Este incremento temporal justifica la reducción en el volumen total de paquetes del primer nodo y produce una tasa de pérdida del 17 %. A nivel de red, la operación permanente en SF10 incrementa el tiempo de ocupación del canal y aumenta la probabilidad estadística de colisiones radioeléctricas. Por el contrario, la configuración adaptativa del trackerd-b presenta una tasa de pérdida del 10 %, un rendimiento coherente con el uso de modulaciones más veloces (SF8 y SF9). Este fenómeno ratifica el compromiso teórico entre la robustez del enlace y la eficiencia espectral.

El análisis del airtime demuestra que el trackerd-a mantiene una constante estricta en sus valores máximos, mínimos y promedios, en cumplimiento con su configuración estática. El trackerd-b registra fluctuaciones temporales con un promedio de 0,234374 s, lo que representa un consumo de airtime de 63 % menor frente al nodo de prueba. El Anexo E documenta la transición de este dispositivo dinámico desde una modulación inicial en SF8 hacia SF9 conforme incrementa su distancia respecto al gateway.

La comparativa del RSSI promedio indica niveles de recepción superiores para el trackerd-a durante la mayor parte del recorrido. No obstante, el SNR constituye la métrica definitiva para la validación de la infraestructura frente a obstáculos geográficos severos. La fijación del parámetro en SF10 permite al gateway demodular la trama del trackerd-a con un SNR extremo de -17,8 dB. El trackerd-b, limitado por la convergencia del ADR a un tope de SF9, registra un SNR mínimo de -14,2 dB. Estos registros evidencian la capacidad topológica para sostener la comunicación bajo alta atenuación forestal. El demodulador de la estación base extrae la señal útil incluso por debajo del piso de ruido electromagnético, lo cual certifica la viabilidad operativa de la red en áreas remotas.

Tabla 4.11: Métricas de la prueba en zona rural del tracker-a.

Métricas trackerd-a	Valor
Datos enviados	54
Posicionamientos fallidos	3
Posicionamientos exitosos	51
Tasa de éxito de posicionamiento	94 %
Int. Transmisión Max.	125 s
Int. Transmisión Min.	30 s
Int. Transmisión promedio	47,58 s
Envíos perdidos	9
Airtime Max.	0,370688 s
Airtime Min.	0,370688 s
Airtime promedio	0,370688 s
RSSI Max.	-33 dBm
RSSI Min.	-116 dBm
RSSI promedio	-99,02 dBm
SNR Max.	14,2 dB
SNR Min.	-17,8 dB
SNR promedio	-2,85 dB

Tabla 4.12: Métricas de la prueba en zona rural del tracker-b.

Métricas trackerd-b	Valor
Datos enviados	63
Posicionamientos fallidos	0
Posicionamientos exitosos	63
Tasa de éxito de posicionamiento	100 %
Int. Transmisión Max.	182 s
Int. Transmisión Min.	28 s
Int. Transmisión promedio	41,18 s
Envíos perdidos	7
Airtime Max.	0,246784 s
Airtime Min.	0,133632 s
Airtime promedio	0,234374 s
RSSI Max.	-53 dBm
RSSI Min.	-116 dBm
RSSI promedio	-101,73 dBm
SNR Max.	13,5 dB
SNR Min.	-14,2 dB
SNR promedio	0,014286 dB

Capítulo V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO

5.1. Conclusiones

El desarrollo e implementación de la infraestructura propuesta demuestra la viabilidad técnica de un sistema telemático para el monitoreo de rescatistas en áreas remotas basado en LoRaWAN y GPS. La integración coordinada entre nodos de campo, gateway, plataformas en la nube y estación de monitoreo local permitió consolidar un flujo de datos estable desde la captura de la coordenada hasta su visualización en la interfaz final. La arquitectura diseñada reduce la dependencia de conectividad celular exclusivamente al punto de enlace, superando las limitaciones de cobertura telefónica en zonas rurales.

El análisis del desempeño del sistema de posicionamiento global evidenció que la principal limitación operativa en entornos remotos corresponde al fenómeno de arranque en frío del módulo GPS integrado en los dispositivos finales. Esta condición genera transmisiones iniciales sin coordenadas válidas debido a la ausencia temporal de fijación satelital, lo que establece la necesidad de un período mínimo de estabilización previo al despliegue operativo. En consecuencia, el comportamiento observado no compromete la funcionalidad del sistema, pero sí condiciona los tiempos de preparación en escenarios reales de rescate.

El diseño de la infraestructura de hardware y red confirmó que la combinación de nodos TrackerD con tecnología LoRaWAN a 915 MHz y un gateway Dragino LPS8v2 acoplado a

una antena omnidireccional de 3 dBi constituye una configuración adecuada para entornos rurales con presencia de vegetación y relieve irregular. Las pruebas de campo evidencian que la ubicación estratégica del gateway en cotas elevadas resulta determinante para minimizar la atenuación por obstrucción topográfica, validando que el desempeño de la infraestructura depende tanto de la tecnología empleada como de los criterios físicos de despliegue.

La construcción e integración del sistema demuestran la viabilidad de una arquitectura híbrida que articula comunicación LoRaWAN, servicios en la nube y procesamiento local en Python. La separación funcional entre canal ascendente de telemetría y canal descendente de control mediante MQTT permitió establecer un esquema bidireccional estable entre la estación de monitoreo y los dispositivos remotos. Esta estructuración confirma que el sistema no solo recolecta información geoespacial de forma eficiente, sino que también posibilita la gestión activa de los nodos, consolidando una solución operativa completa.

En conclusión, las evaluaciones experimentales validan la capacidad operativa de la infraestructura bajo distintos escenarios de propagación. En condiciones de LOS moderado, el módulo GPS registró márgenes de error inferiores a 17 m frente a Google Maps. En este entorno, el sistema estableció una comunicación efectiva a 1,90 km de distancia mediante una configuración en SF7 a 125 kHz, manteniendo la pérdida de paquetes en un 14 %. Por su parte, la prueba en el entorno rural forestal determinó los límites de alcance del enlace radioeléctrico. Al configurar el trackerd-a en SF10 para evaluar un esquema de máxima robustez, el gateway demoduló tramas con un SNR crítico de hasta -17,8 dB, lo que comprueba la extracción de la señal útil por debajo del piso de ruido. Aunque esta configuración elevó el airtime a 0,37 s y produjo una pérdida de paquetes del 17 %, el rastreo espacial mantuvo su continuidad. Simultáneamente, el trackerd-b evidenció el comportamiento autónomo del algoritmo ADR, el cual adaptó la transmisión hasta SF9 como respuesta a la severa atenuación del follaje, lo que redujo el porcentaje de paquetes perdidos a un 10 %. En conjunto, los resultados certifican la viabilidad y resistencia de la arquitectura LoRaWAN para el monitoreo en campo.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda posicionar el gateway en la cota geográfica más alta disponible respecto al área donde se realice la misión de rescate. Esta práctica es fundamental para maximizar la línea de vista, despejar la primera zona de Fresnel y reducir la atenuación severa por obstáculos topográficos.

Previo a la incursión en zonas de alta densidad vegetal, es importante que al encender el modo alarma, los dispositivos TrackerD se encuentren en un ambiente a cielo abierto y esperar

la confirmación del primer posicionamiento exitoso. Esto mitiga la pérdida de tramas iniciales causada por el fenómeno físico de arranque en frío y asegura la descarga completa de la ubicación de los satélites.

Se sugiere establecer un protocolo de depuración periódica en Firebase. Eliminar los registros crudos una vez que la misión haya finalizado y los datos estén respaldados localmente evitará la acumulación innecesaria de información, optimizando la capacidad de respuesta de la base de datos y liberando almacenamiento.

5.3. Trabajo a futuro

Se propone investigar la modificación profunda del firmware o parámetros de los TrackerD mediante comandos AT. Las optimizaciones incluirían ajustar la precisión de ubicación geométrica (PDOP) para filtrar coordenadas inexactas, deshabilitar la activación de los indicadores LED para maximizar el ahorro energético, y programar una lógica interna para que el nodo opere exclusivamente con SF altos al activarse el modo alarma.

Ampliar las capacidades de la interfaz de usuario desarrollada en Python. El objetivo sería integrar la totalidad de los comandos MAC disponibles para el TrackerD mediante enlaces descendentes, permitiendo una configuración remota integral desde el centro de control.

Estudiar el impacto de sustituir la antena actual del gateway por arreglos de antenas colineales de mayor ganancia. Esta mejora en la etapa de radiofrecuencia permitiría incrementar el presupuesto de enlace y extender el radio de cobertura efectiva a mayores distancias durante los operativos de búsqueda.

Bibliografía

- [1] M. Lombardi, F. Pascale, and D. Santaniello, “Internet of things: A general overview between architectures, protocols and applications,” *Information*, vol. 12, no. 2, p. 87, 2021.
- [2] Cisco Systems, Inc., “Omni antenna vs. directional antenna,” 2026. Cisco Support. Accedido: 22-Feb-2026.
- [3] J. P. Morales-Alvarez, E. Cruz-Sánchez, D. A. Hiraes-Valles, V. I. Rodríguez-Abdalá, J. N. García-Verdugo, and G. E. Vázquez-Morales, “Sistema de monitoreo LoRaWAN de consumo de agua,” *ICBI*, vol. 11, p. 185, sep. 2023.
- [4] MOKO LoRa, “Comprensión completa de LoRa y LoRaWAN,” ago. 2021. Accedido: 27-feb-2026.
- [5] G. Reimondo, “Seguridad en redes LoRaWAN™,” *Tecnología Humanizada*, vol. 1, Jan. 2019. Accedido: 27-feb-2026.
- [6] A. F. Chabi *et al.*, “A iot system for vehicle tracking using long range wide area network,” in *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, (Penghu, Taiwan), 2021.
- [7] Dragino Technology Co., “TrackerD - LoRaWAN tracker user manual,” 2026. Dragino Wiki. Accedido: 20-ene-2026.
- [8] Dragino Technology Co., “HP0C - user manual for all gateway models,” 2026. Dragino Wiki. Accedido: 20-ene-2026.
- [9] Dragino Technology Co., “BLG-AN-040 glass fiber outdoor antenna,” 2026. Accedido: 20-ene-2026.
- [10] Garmin, “Tecnología gps en operaciones de rescate y salvamento,” 2024. Accedido: 28-oct-2024.

- [11] Data Bridge Market Research, “Global gps (global positioning systems) market report,” 2024. Accedido: 28-oct-2024.
- [12] Y. Apriani, W. A. Oktaviani, and I. M. Sofian, “Design and implementation of lora-based forest fire monitoring system,” *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 3, pp. 236–241, May 2022.
- [13] P. K, A. M, K. R, S. A, A. M, and S. A, “Smart ambulance for traffic control and tracking by gps through iot,” in *2022 International Conference on Smart Technologies and Systems for Next Generation Computing (ICSTSN)*, (Villupuram, India), 2022.
- [14] C. A. P. Sánchez, “Protocolo lora para análisis de medición con gps y arduino en la industria ganadera del ecuador: una revisión sistemática,” 2021.
- [15] A. Jin, A. Ko, C. Zhao, and S. Bhardwaj, “Open-source gps long range (lora) tracker for rural environments,” tech. rep., Georgia Institute of Technology, 2020. Proyecto de Diseño Senior, ECE4871.
- [16] N. Ramli, M. M. Zabidi, A. Ahmad, and I. A. Musliman, “An open source lora based vehicle tracking system,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, vol. 7, pp. 221–228, Jun. 2019.
- [17] J. R. Sánchez and J. R. Gonzalez, “Diseño de un nodo lora-gps para localización de bicicletas implementado en una red lorawan,” 2021.
- [18] W. Q. Calcina, “Optimización de la transmisión de paquetes lpwan/lorawan,” 2019.
- [19] H. Soy, “Coverage analysis of lora and nb-iot technologies on lpwan-based agricultural vehicle tracking application,” *Sensors*, vol. 23, no. 21, 2023.
- [20] A. E. Ferreira, F. M. Ortiz, L. H. M. K. Costa, *et al.*, “A study of the lora signal propagation in forest, urban, and suburban environments,” *Annals of Telecommunications*, vol. 75, pp. 333–351, Aug. 2020.
- [21] M. Căţeanu and M. A. Moroianu, “Performance evaluation of real-time kinematic global navigation satellite system with survey-grade receivers and short observation times in forested areas,” *Sensors*, vol. 24, no. 19, p. 6404, 2024.
- [22] T. Feng, S. Chen, Z. Feng, C. Shen, and Y. Tian, “Effects of canopy and multi-epoch observations on single-point positioning errors of a GNSS in coniferous and broadleaved forests,” *Remote Sensing*, vol. 13, no. 12, p. 2325, 2021.

- [23] E. Abdi, H. S. Mariv, Z. Mashayekhi, A. Deljouei, and S. Rahbarisisakht, "Seasonal variation of GPS accuracy and precision in forest road mapping," *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series II: Forestry • Wood Industry • Agricultural Food Engineering*, vol. 15, no. 1, 2022.
- [24] M. O. Ojo, D. Adami, and S. Giordano, "Experimental evaluation of a LoRa wildlife monitoring network in a forest vegetation area," *Future Internet*, vol. 13, no. 5, p. 115, 2021.
- [25] N. J. Chapungo and O. Postolache, "Experimental evaluation of LoRaWAN connectivity reliability in remote rural areas of mozambique," *Sensors*, vol. 25, no. 19, p. 6027, 2025.
- [26] Muladi, H. Wijaya, S. D. Prasetyo, S. A. Hamzah, and A. K. Mahamad, "LoRa mesh-based IoT GPS tracking system for mountain climbers," *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 1751–1761, 2024.
- [27] T. Domínguez-Bolaño, O. Campos, V. Barral, C. J. Escudero, and J. A. García-Naya, "An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects," *Internet of Things*, vol. 20, p. 100626, 2022.
- [28] D. Orlovs, A. Rusins, V. Skrastiņš, and J. Judvaitis, "LPWAN technologies for IoT: Real-world deployment performance and practical comparison," *IoT*, vol. 6, no. 4, p. 77, 2025.
- [29] A. D. L. Torregroza, "Implementación de tecnología lora para mejorar la fiabilidad de la transmisión de datos en aplicaciones de monitoreo energético," Apr. 2024.
- [30] P. Robyns *et al.*, "Complete reverse engineering of LoRa PHY," tech. rep., École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2020. Accedido: 22-feb-2026.
- [31] J. C. Liando, A. Gamage, A. W. Tengourtius, and M. Li, "Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large-scale measurement study," *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 15, p. 16, Feb. 2019.
- [32] J. Lorincz, K. Levarda, M. Čagalj, and A. Kukuruzović, "A comprehensive analysis of LoRa network wireless signal quality in indoor propagation environments," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 14, no. 6, p. 111, 2025.
- [33] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Propagación por difracción," tech. rep., Recomendación ITU-R P.526-15, Ginebra, Suiza, 2019. Accedido: 27-feb-2026.

- [34] LoRa Alliance, “What is LoRaWAN?,” 2023. Accedido: 15-ene-2025.
- [35] M. N. B. C. Kamarudin, A. B. Ayob, A. B. Hussain, S. Ansari, M. G. M. Abdulrasol, and M. H. B. M. Saad, “Review of LoRaWAN: Performance, key issues and future perspectives,” *Jurnal Kejuruteraan*, vol. 36, no. 2, pp. 407–418, 2024.
- [36] The Things Network, “4 most popular LoRaWAN trackers on the market,” 2025. Accedido: 25-ene-2025.
- [37] A. Osorio, M. Calle, J. D. Soto, and J. E. Candelo-Becerra, “Routing in LoRaWAN: Overview and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, pp. 72–76, June 2020.
- [38] D. Magrin, M. Capuzzo, A. Zanella, and M. Zorzi, “A configurable mathematical model for single-gateway LoRaWAN performance analysis,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, pp. 5049–5063, July 2022.
- [39] R. M. C. Ortega and D. M. C. Castro, “Despliegue y configuración de una red LoRaWAN usando una plataforma the things network (TTN) para dispositivos de internet de las cosas (IoT),” 2022.
- [40] Google, “Firebase Realtime Database,” 2026. Documentación de Firebase. Accedido: 27-feb-2026.
- [41] SQLite, “About SQLite,” 2026. SQLite.org. Accedido: 27-feb-2026.
- [42] J. Sanchez-Gomez, J. Gallego-Madrid, R. Sanchez-Iborra, J. Santa, and A. F. Skarmeta, “Impact of schc compression and fragmentation in LPWAN: A case study with LoRaWAN,” *Sensors*, vol. 20, no. 1, p. 280, 2020.
- [43] V. Bonilla, B. Campoverde, and S. G. Yoo, “A systematic literature review of LoRaWAN: Sensors and applications,” *Sensors*, vol. 23, no. 20, p. 8440, 2023.
- [44] G. S. Sáez, “Localizador GPS basado en arduino. diseño y fabricación de prototipo para su aplicación en el análisis de parámetros de rutas,” julio 2024.
- [45] N. T. M. Lan, “Evolution of wireless technology: From 1G to 5G,” *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, vol. 7, pp. 68–73, Oct.–Dec. 2023.
- [46] J. L. B. Valero, N. G. Villén, and R. C. Romá, *GNSS: GPS, Galileo, Glonass, Beidou. Fundamentos y métodos de posicionamiento*. València: Editorial Universitat Politècnica de València, 2019.

- [47] L. Lei, A. Tang, and X. Wang, “Achieving scalable capacity in wireless mesh networks,” *Computer Networks*, vol. 253, p. 110696, 2024.
- [48] A. F. H. Sarango, E. R. C. Pallmay, J. P. R. Sarzosa, and J. E. C. Pozo, “Tipos y clasificación de las investigaciones,” *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, vol. 5, no. 2, p. 1927, 2024.
- [49] C. Ramos-Galarza, “Editorial: Diseños de investigación experimental,” *CienciAmérica*, vol. 10, pp. 1–7, Feb. 2021.
- [50] Dragino, “Dragino end node decoder,” 2026. GitHub repository. Accedido: 20-ene-2026.
- [51] Google, “Cómo encontrar tu ubicación y mejorar su precisión en google maps.” <https://support.google.com/maps/answer/2839911?hl=es&co=GENIE.Platform%3DAndroid>. Accedido: 7 de marzo de 2026.

Anexos

A.1. Anexo A. Códigos fuente de la función de Google Cloud

Código fuente (index.js)

```
1 const functions = require("firebase-functions");
2 const admin = require("firebase-admin");
3
4 // Inicialización del SDK de administración
5 admin.initializeApp();
6
7 exports.ttnToFirebase = functions.https.onRequest(async (req, res) => {
8   // 1. Validación de método HTTP
9   if (req.method !== 'POST') {
10     return res.status(405).send('Method Not Allowed');
11   }
12
13   try {
14     const body = req.body;
15
16     // 2. Extracción segura de datos (Uso de Optional Chaining para evitar
17     // crash por undefined)
18     const deviceId = body.end_device_ids?.device_id || "unknown_device";
19     const payload = body.uplink_message?.decoded_payload || {};
20     const rawPayload = body.uplink_message?.frm_payload || null;
21
22     // Metadatos de red (RSSI, SNR) útiles para análisis de cobertura en
23     // tesis
24     const gateways = body.uplink_message?.rx_metadata || [];
25     const bestGateway = gateways.length > 0 ? gateways[0] : {}; // Gateway
    principal
26
27     // 3. Estructuración del objeto a persistir
```



```

26     const telemetryData = {
27       device_id: deviceId,
28       timestamp: admin.database.ServerValue.TIMESTAMP, // Timestamp nativo
del servidor
29       payload: payload,           // Datos decodificados (lat, lon, etc.)
30       network_metadata: {         // Datos de calidad de señal
31         rssi: bestGateway.rssi || null,
32         snr: bestGateway.snr || null,
33         gateway_id: bestGateway.gateway_ids?.gateway_id || "unknown"
34       },
35       raw_body: body              // Respaldo completo para auditoría (
Optional)
36     };
37
38     // 4. Persistencia en Firebase Realtime Database
39     // Ruta: /telemetria/{device_id}/{push_id}
40     const dbRef = admin.database().ref(`registros_ttn/${deviceId}`);
41     await dbRef.push(telemetryData);
42
43     console.info(`Telemetry received and stored for device: ${deviceId}`);
44     return res.status(200).json({ success: true, message: "Data processed
successfully" });
45
46   } catch (error) {
47     console.error("Error processing TTN webhook:", error);
48     return res.status(500).send("Internal Server Error");
49   }
50 });

```

Código fuente (package.json)

```

1 {
2   "name": "functions",
3   "description": "Cloud Functions for Firebase",
4   "scripts": {
5     "serve": "firebase emulators:start --only functions",
6     "shell": "firebase functions:shell",
7     "start": "npm run shell",
8     "deploy": "firebase deploy --only functions",
9     "logs": "firebase functions:log"
10  },
11  "engines": {

```

```
12     "node": "24"
13   },
14   "main": "index.js",
15   "dependencies": {
16     "firebase-admin": "^13.6.0",
17     "firebase-functions": "^7.0.0"
18   },
19   "devDependencies": {
20     "firebase-functions-test": "^3.4.1"
21   },
22   "private": true
23 }
```

A.2. Anexo B. Código en Python del programa *Estación de Monitoreo*

<https://github.com/1Sanderson7/Estacion-Monitoreo-UTN>

A.3. Anexo C. Tablas de datos del experimento en un auto-móvil

Tabla C.1: Registros detallados de posicionamiento del trackerd-a en prueba de automóvil.

ID TrackerD	Usuario Asignado	Fecha	Hora	Latitud	Longitud
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:06:28	0,34771	-78,124256
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:07:03	0,347465	-78,123904
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:07:33	0,347501	-78,123992
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:08:10	0,346987	-78,124504
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:08:52	0,346541	-78,12636
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:09:25	0,347751	-78,126888
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:10:02	0,348142	-78,126896
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:10:36	0,347951	-78,128896
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:11:07	0,347709	-78,129952
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:11:43	0,34733	-78,13152
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:12:16	0,347206	-78,131832
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:12:53	0,347255	-78,132024
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:13:26	0,347116	-78,13268
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:13:58	0,346628	-78,134888
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:14:34	0,346064	-78,137024
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:15:11	0,345763	-78,13812
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:15:55	0,344255	-78,14044
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:16:32	0,343186	-78,142008
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:17:06	0,342673	-78,142552
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:17:45	0,341838	-78,143848
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:18:23	0,340831	-78,145328
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:19:00	0,340083	-78,14664
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:19:36	0,340113	-78,14864
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:20:14	0,338963	-78,150488
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:20:52	0,337219	-78,152096
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:21:31	0,33599	-78,15392
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:22:07	0,336457	-78,155992
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:22:42	0,336684	-78,156816
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:23:13	0,336734	-78,15684
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:23:47	0,336743	-78,156816
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:24:26	0,337317	-78,158992
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:25:01	0,337863	-78,160944
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:25:36	0,338359	-78,162824
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:26:12	0,338356	-78,164728
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:26:48	0,338097	-78,166528
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:27:24	0,337888	-78,168416
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:27:54	0,337807	-78,168848
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:28:26	0,337736	-78,170168
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:29:09	0,338941	-78,171616
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:30:04	0,341641	-78,171
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:30:40	0,342687	-78,171952
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:31:16	0,342659	-78,17336
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:31:48	0,341972	-78,174464
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:32:24	0,34101	-78,175752
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:32:54	0,340608	-78,177408
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:33:29	0,340206	-78,179096
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:33:59	0,339715	-78,180656
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:34:29	0,339673	-78,181592
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:35:01	0,3404	-78,181072
tracker-a	Carlos	15/02/2026	1:35:33	0,340451	-78,18108

Tabla C.2: Registros detallados de posicionamiento del trackerd-b en prueba de automóvil.

ID TrackerD	Usuario Asignado	Fecha	Hora	Latitud	Longitud
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:06:29	0,347525	-78,123928
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:07:03	0,347481	-78,124024
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:07:37	0,347517	-78,123776
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:08:11	0,347054	-78,124392
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:08:46	0,346647	-78,1258
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:09:23	0,347603	-78,126664
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:09:57	0,348013	-78,12672
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:10:36	0,34792	-78,128776
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:11:08	0,347601	-78,129904
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:11:40	0,347292	-78,131368
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:12:12	0,347216	-78,131776
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:12:49	0,347193	-78,131888
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:13:22	0,34723	-78,132368
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:13:58	0,346589	-78,134736
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:14:34	0,346044	-78,137056
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:15:07	0,345812	-78,137816
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:15:41	0,344667	-78,139784
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:16:16	0,34368	-78,14104
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:16:50	0,342795	-78,142424
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:17:22	0,342535	-78,14292
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:17:59	0,341548	-78,144184
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:18:36	0,34055	-78,145664
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:19:09	0,340248	-78,147152
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:19:44	0,340016	-78,148856
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:20:22	0,338677	-78,15044
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:20:55	0,337209	-78,151944
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:21:27	0,335976	-78,153568
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:21:58	0,336313	-78,155448
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:22:30	0,336724	-78,156776
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:23:02	0,336707	-78,156784
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:23:34	0,336669	-78,15676
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:24:08	0,336986	-78,157808
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:24:44	0,337616	-78,159992
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:25:17	0,338085	-78,161784
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:25:55	0,338424	-78,163784
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:26:29	0,338205	-78,165528
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:27:04	0,338055	-78,167216
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:27:43	0,337816	-78,168816
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:28:22	0,337751	-78,169824
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:28:57	0,3384	-78,171352
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:29:31	0,34015	-78,171976
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:30:05	0,341553	-78,171072
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:30:41	0,342747	-78,172024
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:31:17	0,342744	-78,173456
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:31:52	0,341644	-78,17444
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:32:25	0,341022	-78,175848
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:32:58	0,340537	-78,177648
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:33:39	0,340137	-78,17976
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:34:13	0,339566	-78,181344
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:34:50	0,340644	-78,181496
tracker-b	Sara	15/02/2026	1:35:22	0,340427	-78,181088

A.4. Anexo D. Tablas de datos del experimento con LOS moderado

Tabla D.3: Registros detallados de posicionamiento del tracker-d-a en la prueba de parque.

Nº paquete	ID Tracker	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Movimiento	F. Cnt (Secuencia)	SF	Airtime (s)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Gateway ID	Freq Offset (Hz)	Nro Gateways
	tracker-a	06/03/2026	10:28:10	0.330136	-78.139848	STILL	814	8	0.028288	-27	11.5	rescatistas-areas	-5953	1
	tracker-a	06/03/2026	10:46:20	0.330311	-78.139928	STILL	815	8	0.030848	-38	12.2	rescatistas-areas	-5541	1
	tracker-a	06/03/2026	10:51:35	0.330273	-78.140040	STILL	816	8	0.028288	-27	11.5	rescatistas-areas	-5053	1
1	tracker-a	06/03/2026	10:52:19	0.330329	-78.140088	STILL	817	8	0.028288	-39	12.5	rescatistas-areas	-4839	1
2	tracker-a	06/03/2026	10:52:50	0.330291	-78.139888	STILL	818	8	0.028288	-44	12	rescatistas-areas	-4793	1
3	tracker-a	06/03/2026	10:53:22	0.330244	-78.139864	STILL	819	8	0.028288	-40	13.2	rescatistas-areas	-4778	1
4	tracker-a	06/03/2026	10:53:52	0.33025	-78.139712	STILL	820	8	0.028288	-37	12.2	rescatistas-areas	-4732	1
5	tracker-a	06/03/2026	10:54:23	0.330341	-78.140040	STILL	821	8	0.028288	-36	12	rescatistas-areas	-4717	1
6	tracker-a	06/03/2026	10:54:54	0.330278	-78.139904	STILL	822	8	0.028288	-45	11.5	rescatistas-areas	-4702	1
7	tracker-a	06/03/2026	10:55:26	0.330344	-78.139904	STILL	823	8	0.028288	-61	13.2	rescatistas-areas	-4656	2
8	tracker-a	06/03/2026	10:56:01	0.330589	-78.139816	STILL	824	8	0.028288	-68	11.5	rescatistas-areas	-4610	2
9	tracker-a	06/03/2026	10:56:34	0.330835	-78.139680	STILL	825	8	0.028288	-91	6.8	rescatistas-areas	-4595	1
10	tracker-a	06/03/2026	10:57:15	0.331284	-78.139472	STILL	826	8	0.028288	-95	2	rescatistas-areas	-4641	2
11	tracker-a	06/03/2026	10:57:52	0.331601	-78.139328	STILL	827	8	0.028288	-94	1.2	rescatistas-areas	-4656	2
12	tracker-a	06/03/2026	10:58:27	0.331937	-78.138912	STILL	828	8	0.028288	-110	-9	5031395362754	0	1
13	tracker-a	06/03/2026	10:59:33	0.332547	-78.138872	STILL	830	8	0.028288	-109	-7.5	5031395362754	0	1
14	tracker-a	06/03/2026	11:00:19	0.332954	-78.138424	STILL	831	8	0.028288	-110	-7	5031395362754	0	1
15	tracker-a	06/03/2026	11:00:59	0.333456	-78.138464	STILL	832	8	0.028288	-109	-3.5	5031395362754	0	1
16	tracker-a	06/03/2026	11:02:18	0.334115	-78.138200	STILL	834	8	0.028288	-108	-7	5031395362754	0	1
17	tracker-a	06/03/2026	11:02:56	0.33443	-78.137784	STILL	835	8	0.028288	-109	-1.5	5031395362754	0	1
18	tracker-a	06/03/2026	11:03:31	0.334761	-78.137536	STILL	836	8	0.028288	-100	-10.5	rescatistas-areas	-4885	1
19	tracker-a	06/03/2026	11:05:37	0.335965	-78.137008	STILL	839	8	0.028288	-109	-11.5	5031395362754	0	1
20	tracker-a	06/03/2026	11:07:41	0.337227	-78.136576	STILL	842	8	0.028288	-106	0.25	5031395362754	0	1
21	tracker-a	06/03/2026	11:11:07	0.339216	-78.135552	STILL	848	8	0.028288	-108	-9.5	5031395362754	0	1
22	tracker-a	06/03/2026	11:11:42	0.339698	-78.135336	STILL	849	8	0.028288	-110	-6	5031395362754	0	1
23	tracker-a	06/03/2026	11:12:43	0.340182	-78.135184	STILL	851	8	0.028288	-108	3	5031395362754	0	1
24	tracker-a	06/03/2026	11:13:15	0.340743	-78.134744	STILL	852	8	0.028288	-110	-4.25	5031395362754	0	1
25	tracker-a	06/03/2026	11:14:21	0.341269	-78.134656	STILL	854	8	0.028288	-107	-1.25	5031395362754	0	1
26	tracker-a	06/03/2026	11:16:48	0.342887	-78.133808	STILL	858	8	0.028288	-109	-10.75	5031395362754	0	1
27	tracker-a	06/03/2026	11:20:11	0.344912	-78.132904	STILL	864	8	0.028288	-108	-8.75	5031395362754	0	1
28	tracker-a	06/03/2026	11:23:01	0.345429	-78.132208	STILL	869	8	0.028288	-102	-6	rescatistas-areas	-5510	1
29	tracker-a	06/03/2026	11:23:33	0.345033	-78.132344	STILL	870	8	0.028288	-112	-9.75	5031395362754	0	1
30	tracker-a	06/03/2026	11:24:09	0.344678	-78.132568	STILL	871	8	0.028288	-100	-6.2	rescatistas-areas	-5556	1
31	tracker-a	06/03/2026	11:25:37	0.343672	-78.132888	STILL	873	8	0.028288	-102	-10.2	rescatistas-areas	-5480	1
32	tracker-a	06/03/2026	11:29:08	0.341855	-78.133880	STILL	878	8	0.028288	-106	-3.5	5031395362754	0	1
33	tracker-a	06/03/2026	11:31:04	0.340726	-78.134512	STILL	881	8	0.028288	-107	-11	5031395362754	0	1
34	tracker-a	06/03/2026	11:34:28	0.338656	-78.135944	STILL	886	8	0.028288	-95	4.5	rescatistas-areas	-5648	1
35	tracker-a	06/03/2026	11:35:45	0.337821	-78.135752	STILL	888	8	0.028288	-95	5.5	rescatistas-areas	-5739	1
36	tracker-a	06/03/2026	11:36:17	0.337531	-78.136176	STILL	889	8	0.028288	-99		dragino-rescatistas-areas	-5785	1
37	tracker-a	06/03/2026	11:38:53	0.33599	-78.136744	STILL	893	8	0.028288	-82	11.2	rescatistas-areas	-5785	2
38	tracker-a	06/03/2026	11:39:24	0.335641	-78.136912	STILL	894	8	0.028288	-88	9	rescatistas-areas	-5815	1
39	tracker-a	06/03/2026	11:40:00	0.335228	-78.137400	STILL	895	8	0.028288	-97	6.2	rescatistas-areas	-5831	2
40	tracker-a	06/03/2026	11:40:34	0.334789	-78.137448	STILL	896	8	0.028288	-108	-9.5	5031395362754	0	1
41	tracker-a	06/03/2026	11:41:09	0.334506	-78.137584	STILL	897	8	0.028288	-110	-7.75	5031395362754	0	1
42	tracker-a	06/03/2026	11:41:41	0.334139	-78.137832	STILL	898	8	0.028288	-87	9.2	rescatistas-areas	-5861	2
43	tracker-a	06/03/2026	11:42:19	0.333763	-78.138008	STILL	899	8	0.028288	-103	5	rescatistas-areas	-5846	1
44	tracker-a	06/03/2026	11:43:04	0.333331	-78.138008	STILL	900	8	0.028288	-92	6	rescatistas-areas	-5861	1
45	tracker-a	06/03/2026	11:43:47	0.332953	-78.138312	STILL	901	8	0.028288	-80	10.2	rescatistas-areas	-5846	1
46	tracker-a	06/03/2026	11:45:02	0.332043	-78.138696	STILL	903	8	0.028288	-81	11.8	rescatistas-areas	-5861	1
47	tracker-a	06/03/2026	11:46:15	0.331391	-78.138832	STILL	905	8	0.028288	-67	9	rescatistas-areas	-5831	1
48	tracker-a	06/03/2026	11:46:49	0.33146	-78.139296	STILL	906	8	0.028288	-73	11.5	rescatistas-areas	-5815	1
49	tracker-a	06/03/2026	11:47:30	0.331333	-78.139728	STILL	907	8	0.028288	-67	9.2	rescatistas-areas	-5754	1
50	tracker-a	06/03/2026	11:49:07	0.330205	-78.139864	STILL	909	8	0.028288	-35	11.8	rescatistas-areas	-5678	1

A.5. Anexo E. Tablas de datos del experimento en zona rural

Tabla E.5: Registros detallados de posicionamiento del trackerd-a en prueba en zonal rural.

N°	ID Tracker	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Movimiento	F. Cnt (Secuencia)	SF (Spread Factor)	Airtime (s)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Gateway ID	Freq Offset (Hz)	N° Gateways
1	tracker-a	16/02/2026	21:20:51	0	0	STILL	21	10	0.370688	-85	11	o-rescatistas-areas-r	-5922	1
2	tracker-a	16/02/2026	21:21:55	0	0	STILL	22	10	0.370688	-98	5,20	o-rescatistas-areas-r	-5717	2
3	tracker-a	16/02/2026	21:23:01	0	0	STILL	23	10	0.370688	-101	2,2	o-rescatistas-areas-r	-5502	2
4	tracker-a	16/02/2026	21:24:56	0,343049	-78,182720	STILL	25	10	0.370688	-97	5,8	o-rescatistas-areas-r	-5126	2
5	tracker-a	16/02/2026	21:25:48	0,343074	-78,182768	STILL	26	10	0.370688	-105	-3	o-rescatistas-areas-r	-5038	2
6	tracker-a	16/02/2026	21:26:35	0,343125	-78,182704	STILL	27	10	0.370688	-98	5,5	o-rescatistas-areas-r	-4926	2
7	tracker-a	16/02/2026	21:27:09	0,343117	-78,182736	STILL	28	10	0.370688	-105	-6,5	o-rescatistas-areas-r	-4874	1
8	tracker-a	16/02/2026	21:27:46	0,343120	-78,182832	STILL	29	10	0.370688	-104	-5,2	o-rescatistas-areas-r	-4803	3
9	tracker-a	16/02/2026	21:28:20	0,343154	-78,182976	STILL	30	10	0.370688	-103	-9	o-rescatistas-areas-r	-4777	2
10	tracker-a	16/02/2026	21:28:58	0,343129	-78,182888	STILL	31	10	0.370688	-103	-2,8	o-rescatistas-areas-r	-4829	3
11	tracker-a	16/02/2026	21:29:29	0,343066	-78,183052	STILL	32	10	0.370688	-102	0,5	o-rescatistas-areas-r	-4907	2
12	tracker-a	16/02/2026	21:30:11	0,343076	-78,183128	STILL	33	10	0.370688	-106	-6,5	o-rescatistas-areas-r	-5015	2
13	tracker-a	16/02/2026	21:30:50	0,343057	-78,183112	STILL	34	10	0.370688	-98	4,2	o-rescatistas-areas-r	-5024	1
14	tracker-a	16/02/2026	21:31:28	0,343029	-78,183560	STILL	35	10	0.370688	-104	-5	o-rescatistas-areas-r	-5001	3
15	tracker-a	16/02/2026	21:32:11	0,343082	-78,183320	STILL	36	10	0.370688	-106	-14,2	o-rescatistas-areas-r	-4936	2
16	tracker-a	16/02/2026	21:32:57	0,343087	-78,183152	STILL	37	10	0.370688	-105	-10	o-rescatistas-areas-r	-4797	1
17	tracker-a	16/02/2026	21:34:15	0,343053	-78,183232	STILL	39	10	0.370688	-105	-10,2	o-rescatistas-areas-r	-4779	2
18	tracker-a	16/02/2026	21:36:02	0,342994	-78,183416	STILL	42	10	0.370688	-103	-3	o-rescatistas-areas-r	-4565	2
19	tracker-a	16/02/2026	21:36:40	0,343010	-78,183456	STILL	43	10	0.370688	-103	1	o-rescatistas-areas-r	-4558	3
20	tracker-a	16/02/2026	21:37:10	0,343004	-78,183720	STILL	44	10	0.370688	-104	-4	o-rescatistas-areas-r	-4597	2
21	tracker-a	16/02/2026	21:37:51	0,343070	-78,183376	STILL	45	10	0.370688	-100	3,5	o-rescatistas-areas-r	-4575	3
22	tracker-a	16/02/2026	21:38:28	0,343074	-78,183352	STILL	46	10	0.370688	-105	-4,5	o-rescatistas-areas-r	-4531	2
23	tracker-a	16/02/2026	21:39:04	0,343052	-78,183360	STILL	47	10	0.370688	-115	-7	ii-50313953627547.	0	1
24	tracker-a	16/02/2026	21:39:36	0,343059	-78,183240	STILL	48	10	0.370688	-106	-4,5	o-rescatistas-areas-r	-4492	3
25	tracker-a	16/02/2026	21:40:09	0,343123	-78,183104	STILL	49	10	0.370688	-106	-11,8	o-rescatistas-areas-r	-4599	1
26	tracker-a	16/02/2026	21:40:42	0,343120	-78,183552	STILL	50	10	0.370688	-106	-8	o-rescatistas-areas-r	-4665	2
27	tracker-a	16/02/2026	21:41:15	0,343101	-78,183808	STILL	51	10	0.370688	-105	-4,5	o-rescatistas-areas-r	-4684	1
28	tracker-a	16/02/2026	21:41:50	0,343182	-78,183744	STILL	52	10	0.370688	-105	-2,8	o-rescatistas-areas-r	-4737	2
29	tracker-a	16/02/2026	21:42:26	0,343213	-78,184040	STILL	53	10	0.370688	-111	-9,75	ii-50313953627547.	0	1
30	tracker-a	16/02/2026	21:43:05	0,343344	-78,183464	STILL	54	10	0.370688	-115	-5	ii-50313953627547.	0	1
31	tracker-a	16/02/2026	21:43:40	0,343366	-78,183872	STILL	55	10	0.370688	-107	-11	o-rescatistas-areas-r	-5059	1
32	tracker-a	16/02/2026	21:44:22	0,343255	-78,184352	STILL	56	10	0.370688	-106	-17,8	o-rescatistas-areas-r	-5082	1
33	tracker-a	16/02/2026	21:44:59	0,343470	-78,184296	STILL	57	10	0.370688	-106	-11,8	o-rescatistas-areas-r	-5067	2
34	tracker-a	16/02/2026	21:47:04	0,343414	-78,184072	STILL	60	10	0.370688	-105	-13	o-rescatistas-areas-r	-4930	2
35	tracker-a	16/02/2026	21:48:33	0,343272	-78,184376	STILL	62	10	0.370688	-115	-6	ii-50313953627547.	0	1
36	tracker-a	16/02/2026	21:49:54	0,343158	-78,183624	STILL	64	10	0.370688	-98	4,2	o-rescatistas-areas-r	-4946	2
37	tracker-a	16/02/2026	21:50:30	0,343188	-78,183880	STILL	65	10	0.370688	-107	-10,8	o-rescatistas-areas-r	-5019	1
38	tracker-a	16/02/2026	21:51:02	0,343175	-78,183312	STILL	66	10	0.370688	-106	-11,2	o-rescatistas-areas-r	-5057	1
39	tracker-a	16/02/2026	21:51:46	0,343041	-78,183544	STILL	67	10	0.370688	-91	9,5	o-rescatistas-areas-r	-5037	3
40	tracker-a	16/02/2026	21:52:31	0,342724	-78,183416	STILL	68	10	0.370688	-101	1,8	o-rescatistas-areas-r	-5100	2
41	tracker-a	16/02/2026	21:53:13	0,342721	-78,182944	STILL	69	10	0.370688	-103	-1,5	o-rescatistas-areas-r	-5248	2
42	tracker-a	16/02/2026	21:53:53	0,342626	-78,183288	STILL	70	10	0.370688	-105	-5,2	o-rescatistas-areas-r	-5425	3
43	tracker-a	16/02/2026	21:54:37	0,342564	-78,182968	STILL	71	10	0.370688	-106	-6,2	o-rescatistas-areas-r	-5625	2
44	tracker-a	16/02/2026	21:55:13	0,342478	-78,182840	STILL	72	10	0.370688	-104	-3,8	o-rescatistas-areas-r	-5646	1
45	tracker-a	16/02/2026	21:55:50	0,342167	-78,182680	STILL	73	10	0.370688	-110	-6,75	ii-50313953627547.	0	1
46	tracker-a	16/02/2026	21:57:01	0,341625	-78,182608	STILL	75	10	0.370688	-94	8,2	o-rescatistas-areas-r	-5633	1
47	tracker-a	16/02/2026	21:57:35	0,341568	-78,182296	STILL	76	10	0.370688	-105	-16,5	o-rescatistas-areas-r	-5630	1
48	tracker-a	16/02/2026	21:58:20	0,341708	-78,182032	STILL	77	10	0.370688	-107	-10,8	o-rescatistas-areas-r	-5564	1
49	tracker-a	16/02/2026	21:59:11	0,341865	-78,181944	STILL	78	10	0.370688	-116	-11,25	ii-503035418c1a47:	0	1
50	tracker-a	16/02/2026	21:59:56	0,342477	-78,181736	STILL	79	10	0.370688	-80	12	o-rescatistas-areas-r	-5449	3
51	tracker-a	16/02/2026	22:00:39	0,342470	-78,181792	STILL	80	10	0.370688	-47	13	o-rescatistas-areas-r	-5523	3
52	tracker-a	16/02/2026	22:01:18	0,342323	-78,181336	STILL	81	10	0.370688	-46	12,2	o-rescatistas-areas-r	-5616	1
53	tracker-a	16/02/2026	22:02:06	0,342134	-78,181224	STILL	82	10	0.370688	-33	13	o-rescatistas-areas-r	-5704	2
54	tracker-a	16/02/2026	22:02:53	0,342305	-78,181240	STILL	83	10	0.370688	-40	14,2	o-rescatistas-areas-r	-5728	1

Tabla E.6: Registros detallados de posicionamiento del trackerd-b en prueba en zonal rural.

N° Paquete	ID Tracker	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Movimiento	F_Cnt (Secuencia)	SF	Airtime (s)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Gateway ID	Freq Offset (Hz)	Nro Gateways
1	tracker-b	16/02/2026	21:20:36	0,342920	-78,182344	STILL	635	8	0,13363	-94	10	'escatistas-area:	-10229	1
2	tracker-b	16/02/2026	21:21:21	0,343113	-78,182224	STILL	636	8	0,13363	-106	4,2	'escatistas-area:	-10213	1
3	tracker-b	16/02/2026	21:21:53	0,343032	-78,182296	STILL	637	8	0,13363	-108	0,8	'escatistas-area:	-10183	1
4	tracker-b	16/02/2026	21:22:26	0,343056	-78,182416	STILL	638	8	0,13363	-98	11,8	'escatistas-area:	-10079	1
5	tracker-b	16/02/2026	21:22:58	0,343060	-78,182352	STILL	639	8	0,13363	-94	11,5	'escatistas-area:	-9997	1
6	tracker-b	16/02/2026	21:23:29	0,343184	-78,182544	STILL	640	8	0,13363	-109	1,8	'escatistas-area:	-9947	1
7	tracker-b	16/02/2026	21:24:00	0,343028	-78,182584	STILL	641	8	0,14387	-104	1	'escatistas-area:	-9964	1
8	tracker-b	16/02/2026	21:24:29	0,343086	-78,182720	STILL	642	9	0,24678	-107	3,8	'escatistas-area:	-9813	2
9	tracker-b	16/02/2026	21:25:08	0,342936	-78,182864	STILL	643	9	0,24678	-106	-6,2	'escatistas-area:	-9791	2
10	tracker-b	16/02/2026	21:25:47	0,343093	-78,182776	STILL	644	9	0,24678	-105	2,2	'escatistas-area:	-9722	2
11	tracker-b	16/02/2026	21:26:28	0,343114	-78,182792	STILL	645	9	0,24678	-99	10,2	'escatistas-area:	-9688	2
12	tracker-b	16/02/2026	21:26:59	0,343112	-78,182912	STILL	646	9	0,24678	-101	0,5	'escatistas-area:	-9707	2
13	tracker-b	16/02/2026	21:27:32	0,343153	-78,182792	STILL	647	9	0,24678	-110	-0,8	'escatistas-area:	-9626	1
14	tracker-b	16/02/2026	21:28:02	0,343170	-78,182904	STILL	648	9	0,24678	-104	-4	'escatistas-area:	-9624	1
15	tracker-b	16/02/2026	21:29:24	0,342991	-78,182952	STILL	650	9	0,24678	-106	-5	'escatistas-area:	-9507	1
16	tracker-b	16/02/2026	21:30:13	0,343152	-78,183104	STILL	651	9	0,24678	-112	-7,5	'escatistas-area:	-9336	2
17	tracker-b	16/02/2026	21:30:45	0,342958	-78,182984	STILL	652	9	0,24678	-109	-4	'escatistas-area:	-9300	2
18	tracker-b	16/02/2026	21:31:23	0,343055	-78,183104	STILL	653	9	0,24678	-107	3	'escatistas-area:	-9393	1
19	tracker-b	16/02/2026	21:32:04	0,343137	-78,183080	STILL	654	9	0,24678	-111	-1	'escatistas-area:	-9423	2
20	tracker-b	16/02/2026	21:32:45	0,343118	-78,183216	STILL	655	9	0,24678	-113	-13	'escatistas-area:	-9492	1
21	tracker-b	16/02/2026	21:33:18	0,343150	-78,183328	STILL	656	9	0,24678	-104	-6	'escatistas-area:	-9447	1
22	tracker-b	16/02/2026	21:34:15	0,343129	-78,183168	STILL	657	9	0,24678	-111	-3	'escatistas-area:	-9269	1
23	tracker-b	16/02/2026	21:34:52	0,343166	-78,183216	STILL	658	9	0,24678	-101	-6	'escatistas-area:	-9267	1
24	tracker-b	16/02/2026	21:35:39	0,343183	-78,183016	STILL	659	9	0,24678	-105	-12	'escatistas-area:	-9197	2
25	tracker-b	16/02/2026	21:36:27	0,343049	-78,183112	STILL	660	9	0,24678	-107	3,2	'escatistas-area:	-9216	1
26	tracker-b	16/02/2026	21:37:06	0,343174	-78,183240	STILL	661	9	0,24678	-105	-3,8	'escatistas-area:	-9244	2
27	tracker-b	16/02/2026	21:37:46	0,343126	-78,183216	STILL	662	9	0,24678	-102	6	'escatistas-area:	-9248	3
28	tracker-b	16/02/2026	21:38:26	0,343088	-78,183216	STILL	663	9	0,24678	-103	-10	'escatistas-area:	-9281	1
29	tracker-b	16/02/2026	21:39:12	0,343018	-78,183360	STILL	664	9	0,24678	-107	2,2	'escatistas-area:	-9245	1
30	tracker-b	16/02/2026	21:39:45	0,343014	-78,183360	STILL	665	9	0,24678	-111	-10	'escatistas-area:	-9372	2
31	tracker-b	16/02/2026	21:40:38	0,343046	-78,183616	STILL	666	9	0,24678	-104	-9,8	'escatistas-area:	-9380	1
32	tracker-b	16/02/2026	21:41:17	0,343159	-78,183720	STILL	667	9	0,24678	-113	-9,8	'escatistas-area:	-9382	1
33	tracker-b	16/02/2026	21:41:48	0,343147	-78,183776	STILL	668	9	0,24678	-108	-14	'escatistas-area:	-9457	2
34	tracker-b	16/02/2026	21:42:18	0,343316	-78,183832	STILL	669	9	0,24678	-113	-5	'escatistas-area:	-9521	1
35	tracker-b	16/02/2026	21:42:51	0,343210	-78,183752	STILL	670	9	0,24678	-115	-8,5	503035418c1a:	0	1
36	tracker-b	16/02/2026	21:43:55	0,343313	-78,184128	STILL	672	9	0,24678	-104	-9,8	'escatistas-area:	-9420	1
37	tracker-b	16/02/2026	21:46:57	0,343282	-78,184344	STILL	678	9	0,24678	-110	-0,8	'escatistas-area:	-9399	1
38	tracker-b	16/02/2026	21:47:29	0,343310	-78,184248	STILL	679	9	0,24678	-104	-4,2	'escatistas-area:	-9537	1
39	tracker-b	16/02/2026	21:48:03	0,343336	-78,184096	STILL	680	9	0,24678	-106	-7,5	'escatistas-area:	-9610	2
40	tracker-b	16/02/2026	21:48:34	0,343324	-78,184056	STILL	681	9	0,24678	-104	-1,8	'escatistas-area:	-9657	2
41	tracker-b	16/02/2026	21:49:07	0,343311	-78,183952	STILL	682	9	0,24678	-116	-8	503035418c1a:	0	1
42	tracker-b	16/02/2026	21:49:39	0,343279	-78,183936	STILL	683	9	0,24678	-111	-8,2	'escatistas-area:	-9761	1
43	tracker-b	16/02/2026	21:50:12	0,343237	-78,183800	STILL	684	9	0,24678	-102	0,5	'escatistas-area:	-9770	3
44	tracker-b	16/02/2026	21:50:58	0,343134	-78,183736	STILL	685	9	0,24678	-107	2,2	'escatistas-area:	-9809	1
45	tracker-b	16/02/2026	21:51:48	0,342933	-78,183472	STILL	686	9	0,24678	-92	9	'escatistas-area:	-9958	1
46	tracker-b	16/02/2026	21:52:16	0,342860	-78,183424	STILL	687	9	0,24678	-90	10,8	'escatistas-area:	-10113	2
47	tracker-b	16/02/2026	21:52:46	0,342458	-78,183440	STILL	688	9	0,24678	-99	3,5	'escatistas-area:	-10160	1
48	tracker-b	16/02/2026	21:53:34	0,342643	-78,183352	STILL	689	9	0,24678	-101	1	'escatistas-area:	-10155	1
49	tracker-b	16/02/2026	21:54:22	0,342670	-78,183120	STILL	690	9	0,24678	-110	-8,2	'escatistas-area:	-10337	2
50	tracker-b	16/02/2026	21:55:10	0,342619	-78,183000	STILL	691	9	0,24678	-104	-2	'escatistas-area:	-10379	1
51	tracker-b	16/02/2026	21:55:57	0,342169	-78,182672	STILL	692	9	0,24678	-102	0,2	'escatistas-area:	-10416	1
52	tracker-b	16/02/2026	21:56:37	0,341790	-78,182760	STILL	693	9	0,24678	-111	-2,2	'escatistas-area:	-10288	1
53	tracker-b	16/02/2026	21:57:10	0,341617	-78,182568	STILL	694	9	0,24678	-112	-7,8	'escatistas-area:	-10286	1
54	tracker-b	16/02/2026	21:57:42	0,341553	-78,182272	STILL	695	9	0,24678	-102	2	'escatistas-area:	-10298	1
55	tracker-b	16/02/2026	21:58:20	0,341819	-78,182200	STILL	696	9	0,24678	-101	2,5	'escatistas-area:	-10302	1
56	tracker-b	16/02/2026	21:59:06	0,341813	-78,182152	STILL	697	9	0,24678	-97	10,5	'escatistas-area:	-10244	1
57	tracker-b	16/02/2026	21:59:37	0,342245	-78,182072	STILL	698	9	0,24678	-91	10,5	'escatistas-area:	-10240	1
58	tracker-b	16/02/2026	22:00:08	0,342335	-78,181824	STILL	699	9	0,24678	-86	13,5	'escatistas-area:	-10257	3
59	tracker-b	16/02/2026	22:00:42	0,342487	-78,181640	STILL	700	9	0,24678	-53	12	'escatistas-area:	-10342	2
60	tracker-b	16/02/2026	22:01:14	0,342341	-78,181536	STILL	701	9	0,24678	-73	11,8	'escatistas-area:	-10405	1
61	tracker-b	16/02/2026	22:01:45	0,342311	-78,181208	STILL	702	9	0,24678	-64	13,2	'escatistas-area:	-10443	1
62	tracker-b	16/02/2026	22:02:25	0,342338	-78,181288	STILL	703	9	0,24678	-75	12,8	'escatistas-area:	-10360	1
63	tracker-b	16/02/2026	22:03:09	0,342172	-78,181136	STILL	704	9	0,24678	-70	12,5	'escatistas-area:	-10134	1