



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

**“SISTEMA DE MONITOREO GPS DE PERSONAL DE RESCATE A
TRAVÉS DE COMUNICACIÓN LORAWAN”**

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

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Juan Esteban Vásquez Pabón

DIRECTOR:

Dr. 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:	1050332285		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Vásquez Pabón Juan Esteban		
DIRECCIÓN:	San Martín de Porres 1-26 y Vía San Lorenzo (Frente a Hotel La Carolina), El Limonal, La Carolina, Ibarra, Imbabura		
EMAIL:	jevasquezp1@utn.edu.ec / juanevp10@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	N/A	TELÉFONO MÓVIL:	0986104184

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Sistema de monitoreo GPS de personal de rescate a través de comunicación LoRaWAN"
AUTOR (ES):	Vásquez Pabón Juan Esteban
FECHA: DD/MM/AAAA	03/03/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mecatrónica
DIRECTOR / ASESOR:	Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi. MSc. Cosme Damian Mejia Echeverria

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 3 días del mes de marzo de 2026

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Vásquez Pabón Juan Esteban



Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Certificación del director del trabajo de integración curricular

En mi calidad de director del trabajo de integración curricular “Sistema de monitoreo GPS de personal de rescate a través de comunicación LoRaWAN”, presentado por el egresado Juan Esteban Vásquez Pabón, que opta por el título de ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 3 de marzo de 2026

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi
Director de Tesis



Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Aprobación del comité calificador

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Sistema de monitoreo GPS de personal de rescate a través de comunicación LoRaWAN”, elaborado por Juan Esteban Vásquez Pabón, 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, 3 de marzo de 2026

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

Director

MSc. Cosme Damian Mejia Echeverria

Asesor

Dedicatorias

‘La raíz de la educación es amarga, pero sus frutos son dulces’, decía Aristóteles. Hoy, al ver este trabajo terminado, comprendo que el camino no fue sencillo, pero la dulzura de la meta lo compensa todo. Dedico esta tesis a mi familia, cuya paciencia y apoyo incondicional fueron el abono que permitió que este proyecto floreciera. Sin su confianza en mis capacidades, este fruto no sería posible.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todos aquellos docentes que, con su guía, supieron sembrar una semilla de conocimiento en mí, lo cual me ha permitido llegar hasta donde estoy hoy.

Índice general

Cesión de derechos de autor a favor de la Universidad Técnica del Norte	II
Declaración	III
Certificación del director del trabajo de integración curricular	IV
Aprobación del comité calificador	V
Dedicatorias	VI
Agradecimientos	VII
Índice general	VIII
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XII
Resumen	XIV
Abstract	XVI

I. Introducción	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. General	3
1.2.2. Específicos	3
1.3. Alcance y delimitación	4
1.4. Justificación	4
II. Marco teórico	6
2.1. Antecedentes	6
2.2. Tecnologías aplicadas	8
2.2.1. LoRaWan	8
2.2.2. Sistema de posicionamiento global (GPS)	11
2.2.3. FireBase	12
2.3. Propuesta de Arquitectura del Sistema	13
III. Marco metodológico	14
3.1. Enfoque y tipos de investigación	15
3.2. Diseño de la investigación	15
3.2.1. Fase 1: Adquisición de información de rescates y tecnologías IoT.	16
3.2.2. Fase 2: Diseño del sistema IoT.	16
3.2.3. Fase 3: Implementación y pruebas.	16
3.3. Arquitectura del sistema de monitoreo	17

3.3.1.	Dispositivos finales	17
3.3.2.	Puerta de enlace	19
3.3.3.	Servidor de red <i>The Things Network</i> - <i>TTN</i>	20
3.3.4.	Servicios de integración	23
3.3.5.	Base de datos en la nube	27
3.3.6.	Plataforma web	28
3.3.7.	Módulos de trabajo	31
IV.	Pruebas y Resultados	34
4.1.	Pruebas	34
4.1.1.	Prueba de la usabilidad del sistema (Escala SUS)	34
4.1.2.	Prueba de precisión estática (Error de posicionamiento)	36
4.1.3.	Prueba de la fidelidad de ruta (Error dinámico)	37
4.2.	Resultados	37
4.2.1.	Análisis de la usabilidad del sistema	37
4.2.2.	Análisis de precisión estática	38
4.2.3.	Análisis de la fidelidad de la ruta	38
V.	Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo a futuro	41
5.1.	Conclusiones	41
5.2.	Recomendaciones	42
5.3.	Trabajo a futuro	42

Índice de figuras

2.1. Propuesta de la Arquitectura del Sistema.	13
3.1. Arquitectura del sistema.	17
3.2. Código único de identificación.	21
3.3. Registro LoRaWan.	21
3.4. Registro del Gateway.	22
3.5. Registro de los dispositivos.	22
3.6. Configuración del Webhook.	23
3.7. Diagrama de flujo del ingreso de datos (Backend PHP).	25
3.8. Diagrama de flujo del servicio de integración (Python Middle- ware).	26
3.9. Diagrama de la estructura NoSQL en Firestore.	28
3.10. Diagrama de flujo del proceso de inicio de sesión y configura- ción inicial.	29
3.11. Lógica de seguridad y actualización reactiva del monitor.	30
4.1. Disposición física de los equipos en el punto de prueba. De iz- quierda a derecha: MokoSmart LW004-PB, Dragino TrackerD- LS y el smartphone de referencia.	36

4.2.	Comparación visual de las trayectorias registradas por los dispositivos LoRaWAN frente a la ruta de referencia.	39
4.3.	Ruta del dispositivo LW004-Pb.	39
4.4.	Ruta del dispositivo TrakerD-LS.	40

Índice de tablas

3.1. Características de dispositivos finales.	18
3.2. Configuración del TrakerD-LS.	19
3.3. Configuración del LW004-PB.	19
3.4. Configuración de parámetros de radiofrecuencia del Gateway . .	20
3.5. Configuración de enlace con el servidor de red	20
3.6. Descripción del módulo de acceso y gestión de sesiones.	31
3.7. Descripción del módulo de monitorización y análisis geográfico. .	31
3.8. Descripción del módulo de historial y reproducción de sesiones. .	32
3.9. Descripción del módulo de administración de usuarios.	33
4.1. Resultados de la encuesta por usuario	37
4.2. Comparativa de la precisión estática de los dispositivos.	38

Resumen

El presente proyecto de titulación describe el diseño, desarrollo e implementación de un prototipo funcional para el monitoreo y localización en tiempo real de personal de rescate en zonas con infraestructura de telecomunicaciones limitada o inexistente. La problemática abordada se centra en la vulnerabilidad operativa de las unidades de emergencia en entornos extremos, donde la falta de conectividad convencional dificulta la coordinación y eleva el riesgo para el personal en campo.

La solución propuesta integra tecnologías de geolocalización GPS con el protocolo de comunicación de bajo consumo y largo alcance LoRaWAN. La arquitectura del sistema se estructura en cuatro capas: dispositivos finales (nodos IoT), red de transporte gestionada por The Things Network (TTN), una capa de persistencia en la nube utilizando Google Cloud Firestore y una interfaz web interactiva para la visualización cartográfica. Para la validación del sistema, se evaluaron dos dispositivos de grado industrial: el TrackerD-LS de Dragino y el LW004-PB de Moko Technology, estandarizados bajo el plan de frecuencias US915.

Los resultados de las pruebas de precisión estática mostraron errores promedio de 2.34 m para el dispositivo LW004-PB y 9.08 m para el TrackerD-LS,

ambos dentro de márgenes aceptables para operaciones en exteriores. En las pruebas dinámicas, se determinó que la frecuencia de transmisión es crítica para la fidelidad de la ruta, siendo el intervalo de 60 segundos el más eficaz para el seguimiento preciso. Finalmente, la plataforma web alcanzó un puntaje de 90/100 en la escala de usabilidad SUS, validando su eficiencia como herramienta de apoyo en la toma de decisiones críticas durante misiones de búsqueda y salvamento.

Palabras clave: Internet de las cosas, Sistema de Posicionamiento Global, LoRaWAN, Sistemas en tiempo real, Servicios de emergencia.

Abstract

This degree project describes the design, development, and implementation of a functional prototype for real-time monitoring and location of rescue personnel in areas with limited or non-existent telecommunications infrastructure. The problem addressed focuses on the operational vulnerability of emergency units in extreme environments, where the lack of conventional connectivity hinders coordination and increases risks for field personnel.

The proposed solution integrates GPS geolocation technologies with the LoRaWAN long-range, low-power communication protocol. The system architecture is structured into four layers: end devices (IoT nodes), a transport network managed by The Things Network (TTN), a cloud persistence layer using Google Cloud Firestore, and an interactive web interface for cartographic visualization. For system validation, two industrial-grade devices were evaluated: the Dragino TrackerD-LS and the Moko Technology LW004-PB, standardized under the US915 frequency plan.

The results of the static precision tests showed average errors of 2.34 m for the LW004-PB and 9.08 m for the TrackerD-LS, both within acceptable margins for outdoor operations. In dynamic tests, it was determined that the transmission frequency is critical for route fidelity, with a 60-second interval being the most

effective for precise tracking. Finally, the web platform achieved a score of 90/100 on the System Usability Scale (SUS), validating its efficiency as a tool for critical decision-making during search and rescue missions.

Keywords: Internet of Things, Global Positioning System, LoRaWAN, Real-time systems, Emergency services.

Capítulo I

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Las operaciones de rescate en zonas rurales, montañosas o selváticas presentan condiciones complejas debido a la limitada infraestructura de telecomunicaciones. Desde hace décadas, se ha evidenciado la necesidad de tecnologías que permitan la localización y monitoreo del personal en tiempo real, especialmente en contextos donde la cobertura celular es inexistente o colapsa por desastres naturales como terremotos, incendios forestales o inundaciones.

Investigaciones recientes demuestran el potencial de tecnologías como LoRaWAN en soluciones de rastreo y comunicación. En [1], se desarrolla un sistema de rastreo GPS para monitoreo industrial usando LoRaWAN, superando interferencias y limitaciones de métodos convencionales. En [2], se implementa una solución con franjas horarias que permite comunicación bidireccional entre dispositivos portátiles GPS y servidores en refugios. El estudio [3] integra sensores GPS y microcontroladores con LoRaWAN para el rastreo de ambulancias en tiempo real.

A pesar del avance en tecnologías de monitoreo, gran parte de los equipos de rescate aún carecen de sistemas integrados de localización en tiempo real. Las

infraestructuras de comunicación tradicionales no están diseñadas para operar en entornos extremos o colapsados, lo que impide una supervisión continua y segura del personal en campo. Esta carencia afecta directamente la eficiencia en la coordinación y eleva el riesgo operativo.

Los cuerpos de rescate no disponen de un sistema eficiente, accesible y robusto que permita el monitoreo y localización en tiempo real de su personal en zonas sin conectividad convencional, dificultando las labores de búsqueda, respuesta y protección durante emergencias. De no abordarse esta problemática, se mantendrá la vulnerabilidad operativa de las unidades de rescate, aumentando el riesgo de pérdida de contacto con el personal, retrasos en la respuesta, accidentes y fallas en la toma de decisiones durante las emergencias.

Se plantea el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo basado en GPS y comunicación LoRaWAN, que permita la localización precisa y continua del personal de rescate en áreas sin infraestructura de red tradicional, mejorando su seguridad y optimizando la coordinación en situaciones críticas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo de personal de rescate, basado en tecnología GPS y protocolo de comunicación LoRaWAN.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar el estado del arte sobre las tecnologías GPS y LoRaWAN aplicables a escenarios de rescate.
- Diseñar un prototipo que integre dispositivos GPS con módulos LoRaWAN, optimizando el consumo energético y la cobertura en campo.

- Implementar el sistema incluyendo una plataforma web para visualizar en tiempo real la ubicación de los rescatistas, con funciones de seguimiento, historial y alertas.

1.3. Alcance y delimitación

El presente proyecto contempla el diseño, desarrollo e implementación de un prototipo funcional para el monitoreo en tiempo real del personal de rescate, utilizando tecnología GPS para geolocalización y el protocolo LoRaWAN para la transmisión eficiente de datos.

Incluye la revisión del estado del arte, la selección de tecnologías adecuadas, y el diseño de una arquitectura que integre dispositivos GPS con módulos LoRaWAN de bajo consumo energético, garantizando la transmisión confiable de información hacia un servidor central.

También se desarrollará una plataforma web interactiva que permita visualizar en tiempo real la ubicación del personal sobre un mapa, consultar el historial de movimientos y generar alertas según parámetros definidos.

El proyecto se limita a la validación del sistema en un entorno de prueba controlado. No contempla su producción a gran escala, implementación en contextos operativos reales, ni integración con sistemas institucionales existentes.

1.4. Justificación

El presente proyecto plantea una solución tecnológica integral para el monitoreo en tiempo real del personal de rescate, mediante la integración de dispositivos GPS y comunicación LoRaWAN, caracterizada por su bajo consumo energético y amplio alcance. Se complementa con una plataforma web que permite la visualización geográfica, el historial de desplazamientos y la emisión de

alertas personalizadas, constituyendo un aporte significativo a la gestión operativa en situaciones de emergencia.

Para el estudiante de Ingeniería en Mecatrónica, el desarrollo del proyecto representa una oportunidad formativa de alto valor, al aplicar de manera integrada conocimientos en sistemas embebidos, electrónica y desarrollo de software, en un contexto real.

Desde la perspectiva comunitaria, el sistema propuesto mejora la capacidad de respuesta ante desastres, fortalece la seguridad del personal operativo y optimiza los recursos durante intervenciones en zonas de difícil acceso o con conectividad limitada.

En el ámbito de la ingeniería, el proyecto contribuye al desarrollo de soluciones innovadoras, alineadas con las necesidades actuales de protección civil.

Capítulo II

Marco teórico

El presente capítulo establece las bases conceptuales y técnicas necesarias para el desarrollo del sistema de monitoreo. Inicialmente, se exponen los antecedentes, revisando investigaciones previas que contextualizan el estado del arte en soluciones de búsqueda y rescate. A continuación, se describen las tecnologías aplicadas, profundizando en los fundamentos de LoRaWAN, GPS y Cloud Firestore como pilares del proyecto. Finalmente, se presenta la propuesta de arquitectura del sistema, la cual integra teóricamente estos componentes para definir el funcionamiento lógico de la solución planteada.

2.1. Antecedentes

La viabilidad de implementar sistemas de monitoreo en zonas donde las redes convencionales son inexistentes se sustenta en la robustez operativa del protocolo LoRaWAN. Investigaciones fundamentales, como la desarrollada en [1], evidencian la capacidad de esta tecnología para superar interferencias electromagnéticas severas en entornos industriales, garantizando la integridad de los datos de rastreo. Ampliando este espectro a escenarios de aislamiento total, estudios recientes sobre rastreo marítimo y offshore [4] demuestran que es posible mantener la trazabilidad de activos en áreas sin ninguna cobertura celular, una

característica operativa análoga a las zonas montañosas profundas. Para la gestión eficiente de esta infraestructura distribuida, [5]. validan la integración de redes definidas por software con plataformas como The Things Network (TTN), estableciendo una arquitectura escalable para la visualización centralizada de datos.

Si bien la tecnología ha demostrado su eficacia en el seguimiento vehicular, como lo ilustra el sistema para ambulancias de [3], capaz de transmitir coordenadas a la nube con baja latencia, el monitoreo de personal en riesgo requiere parámetros distintos. En [6] se avanza, en esta dirección proponiendo arquitecturas de supervisión remota para robots de rescate, sentando las bases para el control a distancia. Sin embargo, el salto cualitativo hacia el factor humano lo presentan en [7] con el sistema táctico uLoRa, que integra datos fisiológicos y geográficos de tropas en combate. Especificando aún más las necesidades de seguridad para el personal de emergencia, investigaciones sobre First Responders [8] proponen el uso de sensores corporales (wearables) que monitorean signos vitales críticos en tiempo real, validando la necesidad de diseñar dispositivos ergonómicos que no interfieran con las labores de salvamento.

Adaptando estos conceptos a la logística de un desastre natural, en [2] se propone soluciones que utilizan franjas horarias (time-slots) para garantizar la comunicación bidireccional entre refugios y equipos de campo, evitando la saturación de la red. Complementariamente, en [9] se destaca la importancia de mecanismos de interacción directa, validando sistemas IoT con botones de pánico para el envío de alertas inmediatas. No obstante, para superar las barreras físicas que limitan a los nodos terrestres en orografías complejas, arquitecturas modernas de búsqueda y rescate integran vehículos aéreos no tripulados (UAV) como pasarelas móviles [10], permitiendo extender dinámicamente la cobertura de la red LoRaWAN hacia barrancos o zonas de sombra inaccesibles para un Gateway fijo.

El despliegue en entornos agrestes enfrenta desafíos físicos significativos que deben ser mitigados desde el diseño. En [11] se advierte que la orografía montañosa bloquea la línea de visión directa, reduciendo el alcance teórico. A este obstáculo se suma la atenuación por vegetación; según modelos recientes de propagación en entornos forestales [12], la densidad de la canopia genera una caída crítica en el indicador RSSI, exigiendo márgenes de diseño superiores. Para contrarrestar la inestabilidad de los enlaces en estas condiciones, investigaciones sobre redes Ad-Hoc, en [13] se sugiere estrategias de enrutamiento dinámico que aseguran la entrega de paquetes incluso si la conexión directa con la base falla. Finalmente, ante la posible pérdida de señal satelital bajo el follaje, en [14] se propone algoritmos híbridos con tolerancia a fallos, mientras que en [15] se valida el uso técnico de trilateración auxiliar para refinar la precisión en rangos reducidos.

2.2. Tecnologías aplicadas

Para lograr la comunicación en tiempo real del sistema de rescate se integran diversas tecnologías. A continuación, se describen los protocolos de comunicación, los sistemas de posicionamiento y la gestión de datos.

2.2.1. LoRaWan

LoRaWAN LongRangeWideAreaNetwork es un protocolo de comunicación diseñado para redes de área amplia de bajo consumo energético (LP-WAN), orientado a aplicaciones IoT que requieren la transmisión de pequeños volúmenes de datos a largas distancias [16]. Su arquitectura se compone de dispositivos finales (End Devices), puertas de enlace (Gateways), servidores de red (Network Servers) y servidores de aplicación (Application Servers), comunicados mediante enlaces IP [17].

Uno de los principios teóricos fundamentales de LoRaWAN es la utilización de modulación LoRa basada en `ChirpSpreadSpectrum`, la cual proporciona alta sensibilidad de recepción y resistencia a interferencias electromagnéticas, permitiendo alcances de varios kilómetros en entornos rurales y de difícil acceso [18].

LoRaWAN define distintos modos de operación denominados clases A, B y C. La clase A, utilizada en este proyecto, es la más eficiente en términos de consumo energético, ya que los dispositivos finales solo abren ventanas de recepción inmediatamente después de cada transmisión [19]. Esta característica la hace especialmente adecuada para dispositivos portátiles alimentados por batería.

Asimismo, el protocolo incorpora mecanismos como el `AdaptiveDataRate` (ADR), que ajusta dinámicamente la velocidad de transmisión y la potencia de salida, optimizando el uso del espectro radioeléctrico y la eficiencia energética de la red [20]. En cuanto a la seguridad, LoRaWAN emplea cifrado de extremo a extremo mediante claves únicas, garantizando la protección de la información transmitida [21].

2.2.1.1. The Things Network (TTN)

`TheThingsNetwork` (TTN) es una infraestructura abierta y comunitaria para redes LoRaWAN, diseñada para facilitar la gestión, supervisión y escalabilidad de aplicaciones IoT de largo alcance [22]. TTN actúa como un `NetworkServerLoRaWAN`, encargándose de la autenticación de los dispositivos finales, evita la duplicación de paquetes recibidos por múltiples puertas de enlace y el encaminamiento seguro de los datos hacia los servidores de aplicación [23].

Desde el punto de vista teórico, TTN implementa la arquitectura de referencia definida por la `LoRaAlliance`, permitiendo la separación funcional entre

la capa física, la capa de red y la capa de aplicación [19]. Esta separación favorece la interoperatividad entre dispositivos de distintos fabricantes y facilita el despliegue de soluciones distribuidas en escenarios de emergencia, donde la rapidez de implementación y la confiabilidad de la red son factores críticos.

Además, TTN incorpora mecanismos de seguridad basados en cifrado AES-128 y autenticación mediante activación aérea, *Over-The-AirActivation* (OTAA), garantizando la confidencialidad e integridad de los datos transmitidos incluso en redes públicas [21]. Estas características hacen de TTN una plataforma adecuada para sistemas de monitoreo de personal en contextos críticos.

2.2.1.2. Puerta de enlace (Gateway)

La puerta de enlace es el elemento intermedio entre los dispositivos finales y el servidor de red LoRaWAN. Su función principal es recibir las tramas transmitidas por los dispositivos finales y reenviarlas hacia el servidor de red sin procesar ni modificar la carga útil de los datos [17].

Desde una perspectiva teórica, los Gateways operan de forma transparente, permitiendo que múltiples puertas de enlace reciban simultáneamente una misma transmisión. Este principio incrementa la confiabilidad de la red y reduce la probabilidad de pérdida de paquetes, lo cual es esencial en aplicaciones críticas como los sistemas de monitoreo para emergencias [16].

El desempeño del Gateway depende de factores como la ubicación, la altura de instalación y las condiciones del entorno. En zonas con orografía compleja, una planificación adecuada del despliegue resulta determinante para maximizar la cobertura efectiva del sistema [11].

2.2.1.3. Dispositivos finales (End Device)

Los dispositivos finales son los nodos IoT encargados de adquirir datos del entorno y transmitirlos a la red LoRaWAN. En aplicaciones de monitoreo de

personal de rescate, estos dispositivos integran módulos GPS, microcontroladores de bajo consumo y transmisores LoRa [24].

Un aspecto teórico fundamental en el diseño de los dispositivos finales es la optimización del consumo energético, dado que suelen operar con baterías y requieren autonomía prolongada. Para ello, se emplean estrategias como intervalos de transmisión configurables, modos de suspensión profunda y el uso de la clase A de LoRaWAN [19].

Asimismo, los dispositivos finales deben cumplir con restricciones regulatorias como el duty cycle y operar dentro de las bandas de frecuencia permitidas en la región, garantizando la correcta convivencia con otros sistemas inalámbricos y el cumplimiento de los estándares internacionales [20].

2.2.2. Sistema de posicionamiento global (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global es una tecnología de navegación satelital que permite determinar la posición geográfica de un receptor mediante el principio de trilateración, a partir de señales transmitidas por una constelación de satélites en órbita terrestre [25]. Para el cálculo de la posición tridimensional, el receptor debe recibir señales de al menos cuatro satélites visibles.

La precisión del posicionamiento GPS está influenciada por factores como la geometría de los satélites, los errores ionosféricos y troposféricos, y la presencia de obstáculos físicos que atenúan o reflejan la señal [26]. Un parámetro ampliamente utilizado para evaluar la calidad del posicionamiento es el `PositionDilutionofPrecision` (PDOP), el cual cuantifica el impacto de la geometría satelital sobre la exactitud de las coordenadas calculadas [27].

En escenarios de rescate, particularmente en zonas boscosas o montañosas, la señal GPS puede degradarse significativamente debido a la densidad de la vegetación y a la orografía [12]. No obstante, su integración con sistemas de comunicación de largo alcance como LoRaWAN permite la transmisión periódica

dica y confiable de la información de localización, facilitando el seguimiento continuo del personal en campo.

2.2.3. FireBase

Firebase es una plataforma de desarrollo móvil y web adquirida por Google, que ofrece un conjunto de servicios Backend-as-a-Service (BaaS). Su característica principal es que permite a los desarrolladores construir aplicaciones sin necesidad de administrar infraestructura de servidores compleja, facilitando la escalabilidad automática [28].

2.2.3.1. Cloud Firestore

Cloud Firestore es una base de datos NoSQL alojada en la nube, diseñada para aplicaciones que requieren sincronización en tiempo real. A diferencia de su predecesor (Realtime Database) que almacena datos en un único árbol JSON gigante, Firestore utiliza un modelo de datos orientado a documentos, organizando la información en colecciones y documentos. Esta estructura facilita consultas complejas y jerárquicas sin comprometer el rendimiento, una ventaja técnica documentada oficialmente por los desarrolladores de la plataforma [29].

En el contexto de este proyecto IoT, la elección de Firestore se sustenta en investigaciones previas, como la de *Varshney*, quienes implementaron exitosamente sistemas de monitoreo basados en Arduino y Firestore. En su estudio, validaron que Firestore maneja eficientemente la ingesta de datos de sensores en tiempo real, permitiendo que la visualización (dashboard) se actualice instantáneamente apenas el hardware envía el dato, característica indispensable para el seguimiento de la ubicación de los rescatistas [30].

2.3. Propuesta de Arquitectura del Sistema

Con base en las tecnologías descritas anteriormente, la propuesta tecnológica para el sistema de monitoreo de equipos de rescate se fundamenta en una arquitectura IoT de cuatro capas como lo muestra la Figura 2.1.

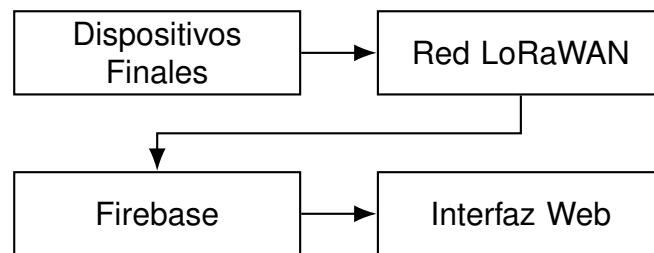


Figura 2.1: Propuesta de la Arquitectura del Sistema.

En primer lugar, la capa física está compuesta por los End Devices que obtienen coordenadas mediante el protocolo GPS. Estos dispositivos transmiten la información utilizando la red LoRaWAN debido a su capacidad de largo alcance y bajo consumo, ideal para operaciones de rescate prolongadas.

Posteriormente, la infraestructura de red gestionada por TTN actúa como intermediaria, reenviando los paquetes de datos hacia la nube. Finalmente, la capa de aplicación utiliza Firestore como base de datos noSQL para sincronizar la ubicación de los rescatistas con la interfaz web de monitoreo, garantizando latencia mínima en la toma de decisiones críticas.

Capítulo III

Marco metodológico

El presente capítulo describe de manera sistemática la metodología adoptada para el diseño, desarrollo e implementación del sistema de monitoreo de activos y personal. La investigación se fundamenta en un enfoque cuantitativo y experimental, orientado a la integración de tecnologías de baja potencia y largo alcance (LPWAN).

La arquitectura propuesta se estructura en un modelo de capas que garantiza la integridad y escalabilidad de los datos. Este flujo inicia con la **capa de percepción**, encargada de la adquisición de coordenadas geográficas mediante dispositivos terminales LoRaWAN. Posteriormente, se transita hacia la **capa de red y transporte**, donde la información es canalizada a través de puertas de enlace (Gateways) hacia un servidor de red centralizado. Finalmente, se implementa una **capa de aplicación y persistencia**, donde procesos de integración (Middleware) transforman y almacenan la información en bases de datos relacionales y no relacionales para su posterior despliegue en una interfaz web orientada al usuario final.

3.1. Enfoque y tipos de investigación

El presente trabajo de integración curricular se desarrolla desde el enfoque ingenieril desde una investigación aplicada, cuyo enfoque es el tratar temas concretos y prácticos, con la finalidad de desarrollar conocimientos que sean utilizados en la practica para solucionar problemas específicos [31].

De acuerdo con lo antes mencionado, para cumplirlo se desarrollar un sistema de monitoreo IoT enfocado en los rescatistas que permita solventar problemas relacionados con el posicionamiento y desplazamiento y por ende con la búsqueda y rescate (SAR, por sus siglas en ingles), la definición proporcionada por [31] se alinea con la metodología planteada.

El análisis de libros, artículos, trabajos de grado, entre otros recursos académicos [32], son requeridos para desarrollar el presente trabajo, adquiriendo así un entendimiento de los procedimientos de búsqueda y rescate, de igual forma las tecnologías IoT aplicables al monitoreo de rescatistas.

El enfoque descriptivo de la investigación consiste en el detalle de las características del objeto de estudio, que para este caso son las variables que presenta el monitoreo de rescatistas, así como de las tecnologías IoT adecuadas [32].

Por otro lado, la investigación experimental se centra en la prueba de funcionamiento del sistema en condiciones reales y el análisis de resultados [33].

3.2. Diseño de la investigación

En el desarrollo de este proyecto se llevaron a cabo varias actividades individuales, orientadas al cumplimiento de los objetivos establecidos. A continuación, se detalla de forma secuencial el proceso seguido en el diseño y construcción del sistema IoT enfocado en el monitoreo de rescatistas.

3.2.1. Fase 1: Adquisición de información de rescates y tecnologías IoT.

En esta fase inicial, se recopila información con el objetivo de comprender las operaciones de búsqueda y rescate y las tecnologías IoT aplicables al monitoreo de rescatistas, lo que permite una estructura clara de la investigación y el enfoque en sus puntos clave.

Actividad 1.1: Revisión del estado del arte Revisión bibliográfica de investigaciones y proyectos previos relacionados con sistemas de monitoreo en rescate.

Actividad 1.2: Comparación de tecnologías IoT Comparación de alternativas tecnológicas en función de consumo energético, alcance, precisión y viabilidad.

3.2.2. Fase 2: Diseño del sistema IoT.

Durante esta fase, se lleva a cabo el diseño del sistema de comunicación IoT, garantizando que esté listo para su implementación con el equipo adecuado y preparado para la recolección de datos en el campo.

Actividad 2.1: Selección de tecnologías IoT Selección de componentes electrónicos adecuados (módulo GPS, LoRaWAN).

Actividad 2.2: Configuración de dispositivos Configuración del módulo LoRaWAN para el envío eficiente de datos.

3.2.3. Fase 3: Implementación y pruebas.

En esta fase final, se implementa el sistema completo, verificando la ausencia de errores y presentando los resultados obtenidos.

Actividad 3.1: Implementación de interfaz web Implementación de la interfaz web con visualización en tiempo real sobre mapas.

Actividad 3.2: Verificación del funcionamiento del sistema Validación del sistema completo con pruebas de funcionamiento e interacción.

3.3. Arquitectura del sistema de monitoreo

Como se ilustra en la Figura 3.1, el sistema sigue una topología de red en estrella, característica del protocolo LoRaWAN. Esta disposición es crítica para optimizar el consumo energético de los nodos finales mientras se mantiene una cobertura amplia. A continuación, se describen detalladamente los componentes lógicos y físicos que conforman cada bloque de esta infraestructura.

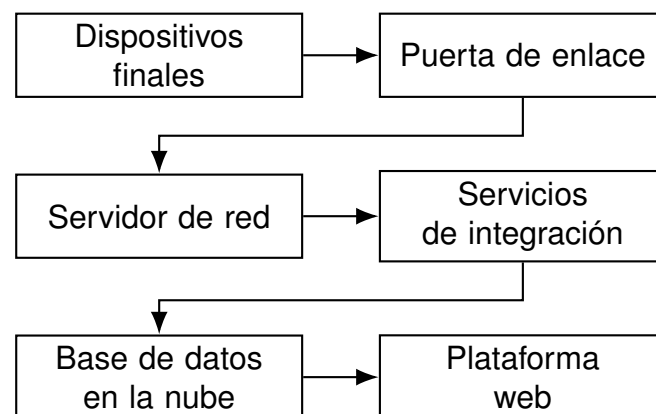


Figura 3.1: Arquitectura del sistema.

3.3.1. Dispositivos finales

Los nodos finales constituyen la fuente primaria de datos del sistema. Para efectos de validación y pruebas de campo, se han seleccionado dos dispositivos de grado industrial: el **TrakerD-LS** de Dragino [34], y el **LW004-PB** de Moko Technology [35]. Ambos dispositivos operan bajo el protocolo LoRaWAN Clase A, lo que significa que la comunicación es iniciada por el nodo y seguida por dos ventanas de recepción descendente, maximizando así la eficiencia energética.

3.3.1.1. Criterios de selección y características

La elección de estos dispositivos responde a una necesidad de heterogeneidad en el monitoreo. Mientras que el modelo de Moko está optimizado para la

seguridad humana mediante sensores de movimiento y alertas activas, el dispositivo de Dragino está diseñado para la persistencia en exteriores. En la Tabla 3.1 se contrastan las especificaciones técnicas que fundamentan su uso en diferentes escenarios operativos.

Característica	MOKO Smart LW004-PB	Dragino TrackerD-LS
Fuente de energía	Batería 540 mAh (Recargable)	3000 mAh + Panel Solar Integrado
Configuración de ahorro	SOS y Man-Down desactivados para maximizar autonomía	Reporte frecuente
Tecnología de ubicación	GPS (Exterior) + BLE (Escaneo Interior)	GPS / GLONASS
Interfaz de carga	Magnética (USB)	Carga Solar + USB Tipo C
Programabilidad	Configuración de intervalos vía Bluetooth/App	Open Source: Firmware modificable (ESP32)
Grado de protección	IP66 (Impermeable)	Diseño intemperie con panel sellado

Tabla 3.1: Características de dispositivos finales.

3.3.1.2. Parametrización de los dispositivos

La configuración de los nodos se ha estandarizado para operar en la banda de frecuencias **US915**, considerando la falta de regulación local para dispositivos de corto alcance. Se han definido intervalos de transmisión diferenciados (60s y 120s) con el fin de evaluar el impacto de la tasa de actualización en la precisión del seguimiento en tiempo real y el consumo de ancho de banda en la red. Las Tablas 3.2 y 3.3 detallan la configuración lógica necesaria para su correcto aprovisionamiento en la red.

Parámetros	Configuración
ID del dispositivo	trakerd-ls
Intervalo de transmisión de datos	60s
Modo de operación	GPS + BAT
Sensibilidad PDOP	7

Tabla 3.2: Configuración del TrakerD-LS.

Parámetros	Configuración
ID del dispositivo	lw004-pb
Intervalo de transmisión de datos	120s
Modo de operación	GPS + BAT
Sensibilidad PDOP	7

Tabla 3.3: Configuración del LW004-PB.

3.3.2. Puerta de enlace

El Gateway actúa como un puente transparente de capa 2, cuya función principal es encapsular los paquetes de radiofrecuencia (RF) recibidos de los nodos y reenviarlos al servidor de red a través de una conexión IP (Ethernet o Wi-Fi). Este componente es vital para la robustez del sistema, ya que gestiona la demodulación de múltiples canales de forma simultánea.

3.3.2.1. Configuración de radiofrecuencia y red

Para garantizar la interoperabilidad, el gateway se configura bajo el estándar **Semtech UDP Packet Forwarder**. Un aspecto crítico es la selección de la **Sub-banda 2** dentro del espectro US915, ya que esto alinea los canales de transmisión de los nodos con los canales de escucha del servidor *The Things Network* (TTN). En las Tablas 3.4 y 3.5 se especifican los parámetros técnicos y de red establecidos para asegurar una latencia mínima y una alta disponibilidad.

Parámetro	Valor Configurado	Descripción
Plan de frecuencia	US915 (902-928 MHz)	Estándar ISM para ITU Región 2 (Américas).
Sub-banda (FSB)	2 (903.9 - 905.3 MHz)	Configuración obligatoria para compatibilidad con los canales de escucha de TTN.
Modo de operación	Semtech UDP	Protocolo heredado para el reenvío de paquetes (*Packet Forwarder*).
Keep Alive	30 segundos	Intervalo de verificación de estado de conexión.

Tabla 3.4: Configuración de parámetros de radiofrecuencia del Gateway

Parámetro	Valor Configurado	Descripción
Proveedor	TTN V3	The Things Stack Community Edition.
Servidor (Cluster)	nam1.cloud.thethings.network	<i>Cluster</i> norteamericano seleccionado para minimizar la latencia de red.
Puertos UDP	1700 <i>Up/Down</i>	Puerto estándar para tráfico de entrada y salida del <i>Packet Forwarder</i> .
Gateway EUI	a8-40-41-ff-ff-25-0a-00	Identificador único global <i>EUI-64</i> del hardware físico.

Tabla 3.5: Configuración de enlace con el servidor de red

3.3.3. Servidor de red *The Things Network* - TTN

The Things Network es el núcleo de la gestión LoRaWAN. Se encarga de la autenticación de los dispositivos, evitar la duplicación de los datos recibidos por varios Gateways, y el des-encryptado de los paquetes de datos.

3.3.3.1. Requerimientos de TTN

Los dispositivos traen consigo un código único de identificación (DEV EUI), este es requerido para su registro en la plataforma TTN, la Figura 3.2 muestra la etiqueta con este código y otros que también son requeridos, dependiendo del dispositivo a registrar.

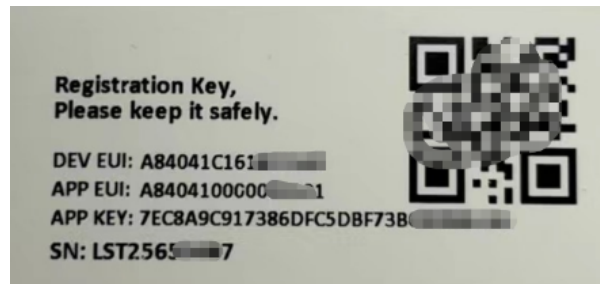


Figura 3.2: Código único de identificación.

En la Figura 3.3 se muestran los parámetros LoRaWAN para el registro tanto de los dispositivos como del Gateway en la plataforma TTN.

Frequency plan ⓘ *

United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN) ▼

LoRaWAN version ⓘ *

LoRaWAN Specification 1.0.3 ▼

Regional Parameters version ⓘ *

RP001 Regional Parameters 1.0.3 revision A ▼

LoRaWAN class capabilities ⓘ

☐ Supports class B

☐ Supports class C

Activation mode ⓘ *

☒ Over the air activation (OTAA)

☐ Activation by personalization (ABP)

☐ Define multicast group (ABP & Multicast)

Figura 3.3: Registro LoRaWan.

3.3.3.2. Registro de dispositivos

En la Figura 3.4 se encuentra los parámetros requeridos para el registro del gateway en TTN.

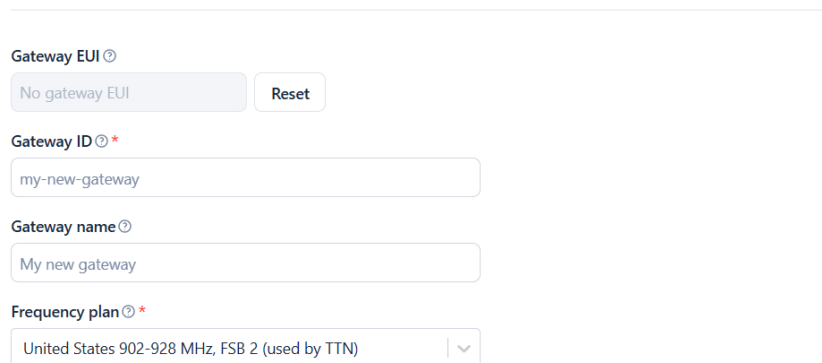


Figura 3.4: Registro del Gateway.

A diferencia del gateway que solo requiere el DEV EUI, los ED requieren el código de identificación para una aplicación definida (APP EUI), y la llave única para comunicaciones seguras (APP KEY). En la Figura 3.5 se muestra estos parámetros, donde el JoinEUI viene a ser el APP EUI de la etiqueta.

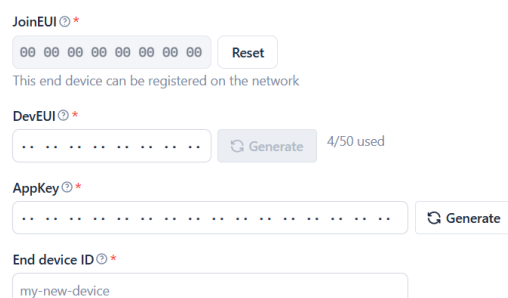


Figura 3.5: Registro de los dispositivos.

3.3.3.3. Webhook

El Webhook es un apartado de TTN en el que se redireccionan los datos hacia una base de datos MySQL la cual se aloja en un servidor. La Figura 3.6 muestra la configuración de este.

Webhook ID*
monitoreo-rescatistas

Webhook format*
JSON

Base URL*
http://[2803:2540:17c:4000:ec28:2453:9a7d:ac20]/insert_dht.php

Downlink API key

The API key will be provided to the endpoint using the "X-Downlink-APIkey" header

Request authentication ⓘ
☐ Use basic access authentication (basic auth)

Additional headers

Filter event data ⓘ

Enabled event types
For each enabled event type an optional path can be defined which will be appended to the base URL

☒ **Uplink message**

An uplink message is received by the application

Figura 3.6: Configuración del Webhook.

3.3.4. Servicios de integración

Dado que los servidores de red LoRaWAN como TTN están diseñados para el enrutamiento y no para el almacenamiento persistente a largo plazo, se desarrolla una capa de *Middleware*. Esta capa cumple tres funciones esenciales: recepción por eventos (Webhooks), normalización de datos (Parsing) y sincronización entre entornos de base de datos distribuidos.

Los scripts de la capa de middleware, así como los de la interfaz web, se encuentran alojados en ¹ para su consulta.

¹Repositorio GitHub: <https://github.com/Jevp1003/Sistema-de-Monitoreo>

3.3.4.1. Lógica de recepción y filtrado

El script `insert_dht.php` actúa como el punto de entrada del Webhook de TTN. Su diseño sigue un flujo de validación riguroso para asegurar que solo datos legítimos y correctamente estructurados ingresen al sistema. Como se detalla en el diagrama de la Figura 3.7, el script realiza una comprobación de identidad (Whitelist) para mitigar inserciones de dispositivos no autorizados, además de una limpieza de coordenadas para evitar errores de graficación en la plataforma web.

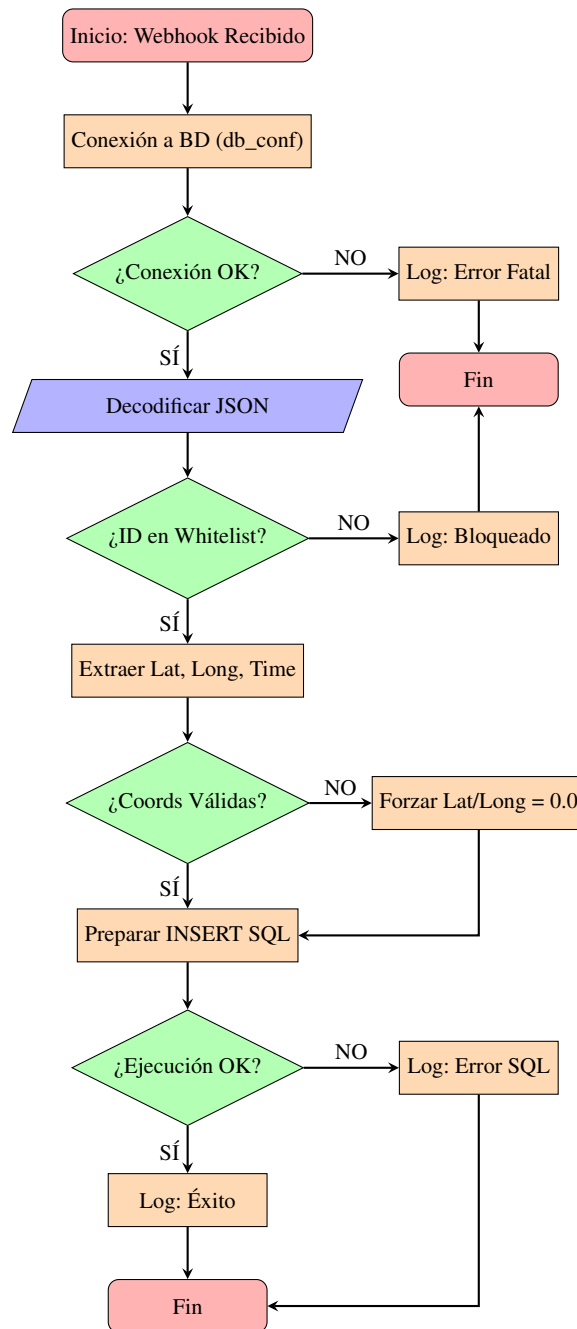


Figura 3.7: Diagrama de flujo del ingreso de datos (Backend PHP).

3.3.4.2. Sincronización y persistencia en la nube

Para dotar al sistema de capacidades en tiempo real y acceso multiplataforma, se implementa un servicio en Python (`Envio_Firebase_Firestore`).

py). Este componente actúa como un monitor que supervisa los cambios en la base de datos local y replica la información de manera selectiva hacia la nube. La importancia de este script radica en su algoritmo de **deduplicación**, el cual asegura que solo los datos nuevos o actualizados sean enviados a Firestore, optimizando así el uso de recursos y el tráfico de red, tal como se esquematiza en la Figura 3.8.

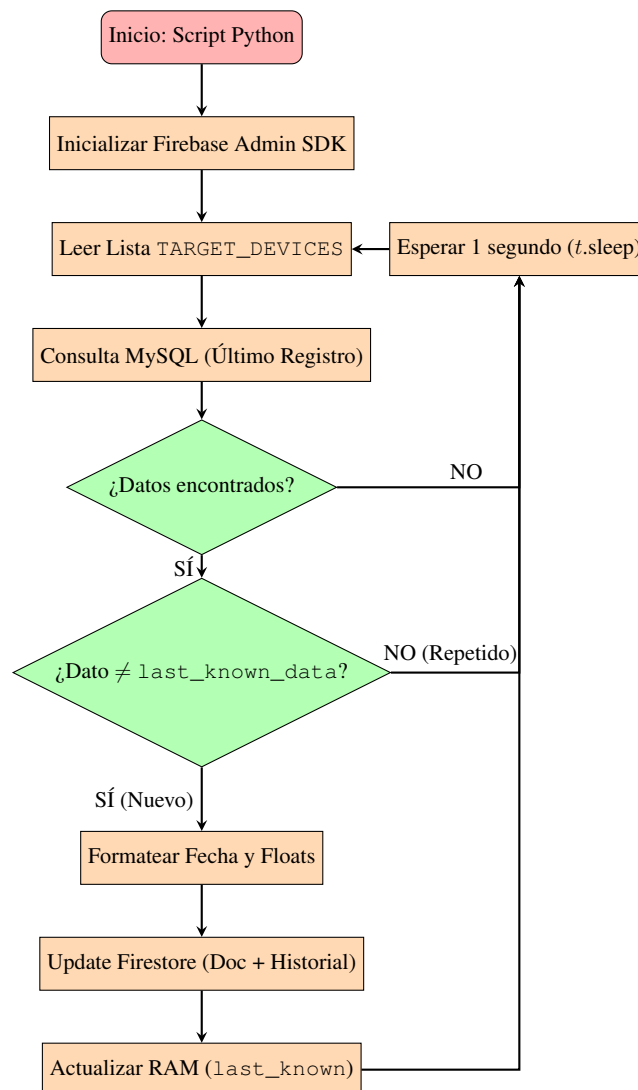


Figura 3.8: Diagrama de flujo del servicio de integración (Python Middleware).

3.3.5. Base de datos en la nube

Para la gestión de persistencia y sincronización de datos, se selecciona **Google Cloud Firestore**, una base de datos de tipo NoSQL como se muestra en la Figura 3.9 orientada a documentos. Esta elección se fundamenta en su capacidad nativa de actualización en tiempo real (*Real-time synchronization*) mediante el uso de *listeners* o escuchadores de eventos, lo que resulta crítico para sistemas de monitoreo geográfico donde la latencia debe ser mínima.

A diferencia de las bases de datos relacionales tradicionales, Firestore organiza la información en colecciones y documentos, permitiendo una escalabilidad horizontal eficiente. La arquitectura lógica de la base de datos se estructuró en tres pilares fundamentales:

- **Colección de Usuarios:** Almacena las credenciales y perfiles de acceso, permitiendo una gestión granular de la seguridad.
- **Colección de Ubicaciones:** Actúa como el repositorio principal de la telemetría. Cada documento representa un dispositivo final y contiene subcolecciones de *Historial*, donde se indexan las coordenadas mediante estampas de tiempo (Timestamps).
- **Colección de Sesiones:** Registra cada ingreso al sistema, vinculando al usuario con los dispositivos autorizados, el motivo de la consulta y los alias personalizados asignados a los sensores durante dicha sesión.

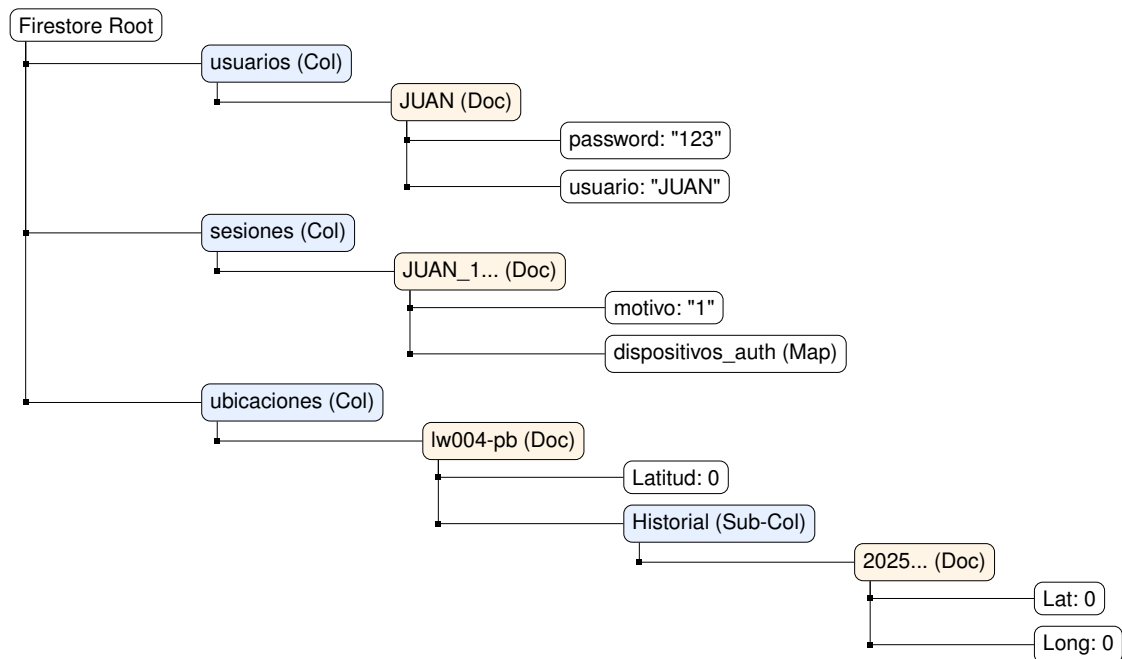


Figura 3.9: Diagrama de la estructura NoSQL en Firestore.

3.3.6. Plataforma web

La plataforma web constituye la capa de presentación del sistema, diseñada como una aplicación de página única (*Single Page Application* - SPA). Su arquitectura permite la interacción directa con los servicios de Firebase sin necesidad de un servidor intermedio para el renderizado, optimizando la velocidad de respuesta en dispositivos móviles y de escritorio.

3.3.6.1. Gestión de acceso y control de sesiones

El control de seguridad se implementa en el cliente mediante un sistema de autenticación que valida credenciales contra la base de datos Firestore. Como se observa en la Figura 3.10, la cual describe la lógica del script de acceso, el sistema no solo verifica la identidad, sino que obliga al usuario a declarar un motivo de ingreso y seleccionar los dispositivos específicos a monitorear.

Un aspecto innovador implementado es la **asignación dinámica de alias**,

que permite al operador renombrar los IDs técnicos de los dispositivos por nombres identificables (ej. “Persona A” ó “Vehículo 1”) en tiempo real. Estos datos se encapsulan en un *token* de sesión almacenado en el *LocalStorage* del navegador, garantizando que la sesión persista únicamente durante el tiempo de actividad del usuario.

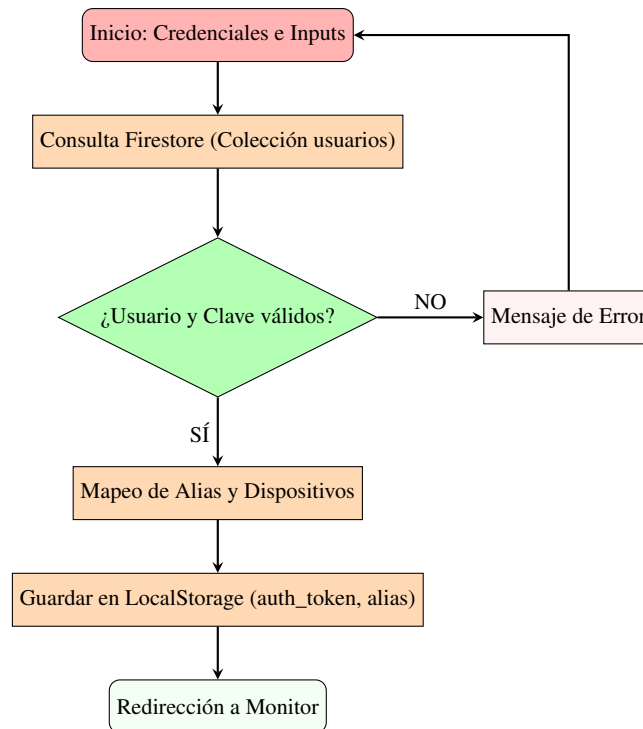


Figura 3.10: Diagrama de flujo del proceso de inicio de sesión y configuración inicial.

3.3.6.2. Visualización cartográfica y análisis espacial

Para la representación geográfica de los datos, se integró la biblioteca **Leaflet.js** [36], un motor de mapas interactivos de código abierto, la Figura 3.11 muestra el como esta implementada. La plataforma implementa dos modos de visualización diferenciados:

1. **Modo en Vivo:** Utiliza funciones de tipo *Snapshot* de Firebase para suscribirse a los cambios en la colección de ubicaciones. Cada vez que un dispositivo transmite una nueva coordenada a través de la red LoRaWAN,

el mapa actualiza la posición del marcador automáticamente mediante una transición fluida, sin necesidad de recargar la página.

2. **Modo Historial y Reproducción:** Permite la reconstrucción de rutas mediante consultas filtradas por rango de fechas. El sistema utiliza polilíneas para dibujar el trayecto seguido por el dispositivo, permitiendo al analista auditar recorridos pasados con precisión métrica.

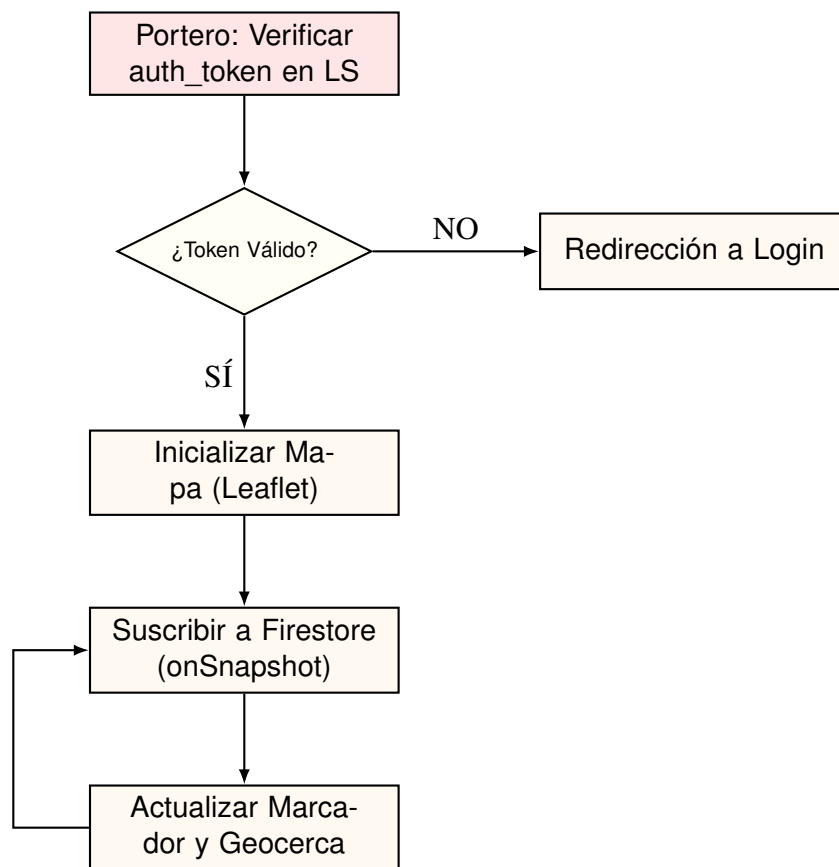


Figura 3.11: Lógica de seguridad y actualización reactiva del monitor.

Finalmente, se incorpora un módulo de **Geocercas (Geofencing)** basado en el algoritmo de *Ray Casting*. Este permite al usuario dibujar polígonos o círculos directamente sobre el mapa y realizar un análisis espacial para determinar qué porcentaje de los puntos registrados cayeron dentro de una zona de interés

específica, facilitando la toma de decisiones en misiones de búsqueda o vigilancia.

3.3.7. Módulos de trabajo

A continuación se mencionan los módulos por los que trabaja el sistema.

3.3.7.1. Módulo de control de acceso y sesión

Este módulo gestiona la seguridad inicial y la configuración de la experiencia de usuario, fíjese en la Tabla 3.6.

Archivo	Componente	Funcionalidad principal
<code>indexLogin.html</code>	Interfaz de acceso	Captura de credenciales, motivo de ingreso y selección de dispositivos.
<code>scriptLogin.js</code>	Lógica de validación	Autenticación contra Firestore y gestión de alias dinámicos .
<code>stilesLogin.css</code>	Estética del módulo	Definición de estilos visuales y contenedores de selección de hardware.
<i>LocalStorage</i>	Persistencia local	Almacenamiento del <i>auth_token</i> y nombres asignados para la sesión.

Tabla 3.6: Descripción del módulo de acceso y gestión de sesiones.

3.3.7.2. Módulo de monitoreo y análisis espacial

El modulo que se muestra en la Figura 3.7 es el núcleo operativo que procesa los datos en tiempo real y gestiona la visualización geográfica.

Archivo	Componente	Funcionalidad principal
<code>scriptPrueba.js</code>	Núcleo del monitor	Gestión del "Portero de seguridadz suscripción reactiva a <i>onSnapshot</i> .
<i>Leaflet.js</i>	Motor cartográfico	Renderizado de capas de OpenStreetMap y gestión de marcadores dinámicos.
<i>Ray Casting</i>	Algoritmo de análisis	Cálculo matemático de puntos dentro de polígonos para el módulo de geocercas.
<code>stilesPrueba.css</code>	Adaptabilidad	Ajuste automático de la interfaz para dispositivos móviles y escritorio.

Tabla 3.7: Descripción del módulo de monitorización y análisis geográfico.

3.3.7.3. Módulo de historial de sesiones

En la Figura 3.8, se muestra el componente que se encarga de recuperar y filtrar los datos de misiones pasadas, permitiendo el análisis post-evento de las rutas registradas.

Archivo	Componente	Funcionalidad principal
<code>indexSesiones.html</code>	Visor de registros	Listado organizado de sesiones que incluye fecha, motivo y dispositivos empleados.
<code>scriptSesiones.js</code>	Filtrado jerárquico	Lógica que discrimina entre usuarios estándar (ven solo su historial) y administradores (ven todo el historial).
<code>stylesSesiones.css</code>	Formato de datos	Definición visual para badges de usuario y listas de dispositivos por sesión.
<i>Playback Mode</i>	Reconstrucción de rutas	Función que transfiere los parámetros de una sesión grabada al mapa para su representación polilínea.

Tabla 3.8: Descripción del módulo de historial y reproducción de sesiones.

3.3.7.4. Módulo de gestión de usuarios

Por ultimo, en la Figura 3.9, se muestra el módulo que permite a los usuarios con privilegios de administrador gestionar las credenciales de acceso al sistema.

Archivo	Componente	Funcionalidad principal
<code>indexAdmin.html</code>	Panel administrativo	Interfaz para la visualización y edición de la lista de usuarios autorizados.
<code>scriptAdmin.js</code>	Lógica CRUD	Ejecución de operaciones de creación, lectura, actualización y borrado de usuarios en Firestore.
<code>stylesAdmin.css</code>	Diseño responsivo	Estilos específicos para tablas administrativas y ventanas modales de confirmación.
<i>Modal-Check</i>	Validación de identidad	Interfaz de seguridad que exige re-autenticación antes de realizar cambios sensibles o revelar contraseñas.

Tabla 3.9: Descripción del módulo de administración de usuarios.

Capítulo IV

Pruebas y Resultados

En el presente capítulo se detallan las pruebas realizadas y sus respectivos resultados.

4.1. Pruebas

Se realiza 3 pruebas, empezando por la opinión de los usuarios con respecto al sistema, y la confiabilidad de los dispositivos tanto estática como dinámicamente.

4.1.1. Prueba de la usabilidad del sistema (Escala SUS)

Para la evaluación de la experiencia de usuario y la interfaz de la plataforma de monitoreo, se aplica un cuestionario basado en la métrica *System Usability Scale* (SUS) [37], desarrollada por John Brooke en 1996. Esta herramienta permite obtener una visión global de la usabilidad del sistema tras la interacción de los usuarios con este.

El instrumento consta de 10 ítems evaluados mediante una escala de Likert del 1 al 5, donde el valor **5** representa “Totalmente de acuerdo” y el valor **1** “Totalmente en desacuerdo”. A continuación, se detallan las afirmaciones presentadas a los usuarios:

1. Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia.
2. Encontré el sistema innecesariamente complejo.
3. Me pareció que el sistema era fácil de usar.
4. Creo que necesitaría el apoyo de un técnico para poder utilizar este sistema.
5. Encontré que las diversas funciones de este sistema estaban bien integradas.
6. Me pareció que había demasiada inconsistencia en este sistema.
7. Imagino que la mayoría de la gente aprendería a usar este sistema muy rápidamente.
8. Encontré el sistema muy engorroso de usar.
9. Me sentí muy confiado al usar el sistema.
10. Necesitaba aprender muchas cosas antes de poder empezar a usar este sistema.

La puntuación final se obtiene de tal manera que a las preguntas impares se le resta 1 a la respuesta del usuario, mientras que a las preguntas pares se resta la respuesta del usuario a 5, luego se suma las puntuaciones y su resultado se multiplica por 2.5.

La ecuación 4.1, muestra la expresión matemática para obtener la escala SUS.

$$SUS = ((Q1 - 1) + (5 - Q2) + \dots + (Q9 - 1) + (5 - Q10)) \times 2,5. \quad (4.1)$$

4.1.2. Prueba de precisión estática (Error de posicionamiento)

Esta prueba tiene como objetivo cuantificar el error de precisión de los dispositivos MokoSmart LW004-PB y Dragino TrackerD-LS en condiciones de reposo. El procedimiento consiste en situar ambos nodos en una coordenada de referencia conocida, determinada mediante un sistema GPS de alta sensibilidad (celular con soporte GNSS multifrecuencia), como lo muestra la Figura 4.1.



Figura 4.1: Disposición física de los equipos en el punto de prueba. De izquierda a derecha: MokoSmart LW004-PB, Dragino TrackerD-LS y el smartphone de referencia.

Se recolectó un total de 30 muestras por cada dispositivo con un intervalo de transmisión constante. Como se muestra en la ecuación 4.2, el error se define como la distancia geodésica entre el dispositivo final y el punto de referencia, calculada mediante la fórmula de Haversine

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_B - \phi_A}{2} \right) + \cos(\phi_A) \cos(\phi_B) \sin^2 \left(\frac{\lambda_B - \lambda_A}{2} \right)} \right), \quad (4.2)$$

donde, d es la distancia entre los dos puntos sobre la superficie de la esfera, r es el radio de la esfera (para la Tierra, $r \approx 6371$ km), ϕ_A, ϕ_B son las latitudes

de los puntos A y B (en radianes), y λ_A, λ_B son las longitudes de los puntos A y B (en radianes).

4.1.3. Prueba de la fidelidad de ruta (Error dinámico)

Para evaluar el comportamiento de los dispositivos en movimiento, se realizó un recorrido perimetral comparativo. La metodología implica el transporte simultáneo de los trackers LoRaWAN junto con una aplicación móvil de referencia que registra la ruta. Esta prueba permite analizar la capacidad de los dispositivos para representar la topografía del terreno y evaluar la presencia de derivas o ruidos en las coordenadas enviadas a través de la red The Things Network (TTN) hacia la plataforma de visualización.

4.2. Resultados

4.2.1. Análisis de la usabilidad del sistema

De acuerdo con la encuesta realizada a 10 usuarios se obtiene los datos mostrados en la Tabla 4.1, lo que resulta en un 90 sobre 100 de aceptabilidad del sistema.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Usuario 1	4	2	5	2	5	1	5	1	4	1
Usuario 2	4	2	5	1	4	2	5	2	3	2
Usuario 3	5	2	5	2	5	1	5	2	5	1
Usuario 4	5	1	5	2	4	1	5	1	4	1
Usuario 5	5	2	5	1	4	1	5	1	5	1
Usuario 6	5	2	5	1	5	1	5	2	3	1
Usuario 7	5	2	5	2	4	1	5	1	5	1
Usuario 8	5	2	5	2	5	1	5	2	4	2
Usuario 9	5	2	5	1	4	1	5	1	5	1
Usuario 10	4	1	5	2	4	2	5	1	4	1

Tabla 4.1: Resultados de la encuesta por usuario

4.2.2. Análisis de precisión estática

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras el procesamiento de las muestras recolectadas en condiciones de reposo. El experimento se diseñó para contrastar la estabilidad de los módulos GPS integrados en ambos dispositivos frente a un punto de referencia de alta sensibilidad.

Como se observa en la Tabla 4.2, ambos dispositivos operan dentro de márgenes aceptables para la localización en exteriores, aunque con diferencias notables en su comportamiento:

Dispositivo	Muestras	Error Prom. (m)	Error Máx. (m)
TrackerD-LS	30	9.08	16.89
LW004-PB	30	2.34	5

Tabla 4.2: Comparativa de la precisión estática de los dispositivos.

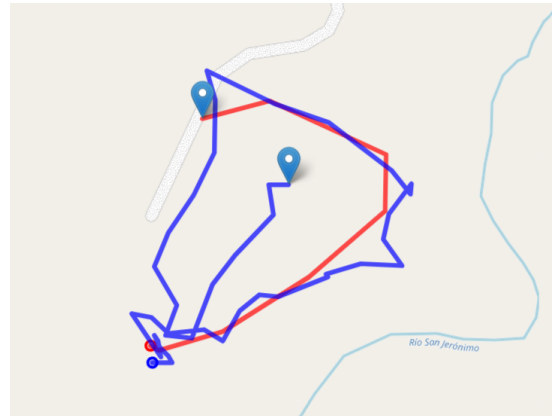
- **El Dispositivo LW004-PB:** Presenta una estabilidad superior con un error promedio de 2.34 m y una desviación máxima de apenas 5 m, estos valores sugieren un filtrado interno de coordenadas más agresivo o una antena con mejor rechazo al ruido en condiciones estáticas.
- **Dispositivo TrackerD-LS:** Aunque su error máximo es de 16.89 m, se mantiene dentro campo de visión promedio en zonas boscosas, el error promedio de 9.08 m indica una mayor susceptibilidad a factores como la geometría satelital o efectos de multipase leves en el entorno de prueba.

4.2.3. Análisis de la fidelidad de la ruta

En la prueba dinámica, se observa en la Figura 4.2 que existe una gran diferencia entre los dispositivos, pero cabe recalcar que no se alejan de la ruta de referencia.



(a) Ruta de la aplicación móvil.



(b) Rutas sobre puestas de los dispositivos.

Figura 4.2: Comparación visual de las trayectorias registradas por los dispositivos LoRaWAN frente a la ruta de referencia.

En la Figura 4.3, que corresponde al dispositivo Moko, debido a su configuración de envío de datos, 120 segundos, se puede observar que falta precisión al momento de ubicar la trayectoria del personal.

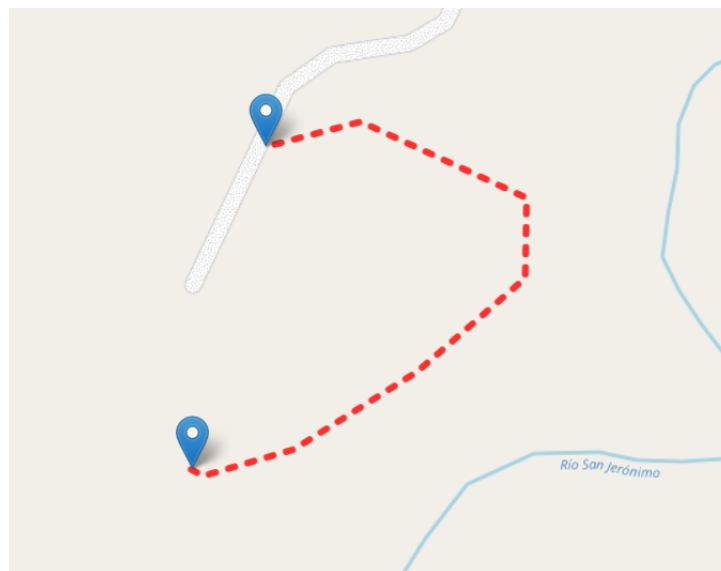


Figura 4.3: Ruta del dispositivo LW004-Pb.

Por otro lado, en la Figura 4.4, el dispositivo de Dragino al tener mayor frecuencia en el envío de los datos, 60 segundos, se observa cómo ubica de manera

más precisa al personal, no obstante, aun presenta ciertos picos de desplazamiento lateral.

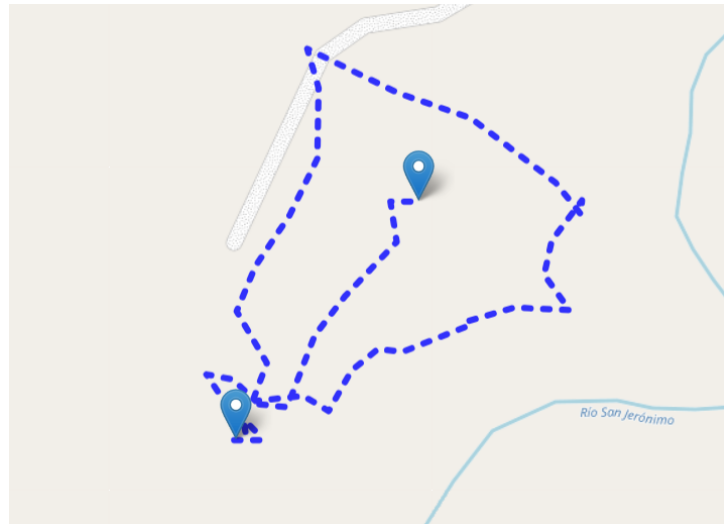


Figura 4.4: Ruta del dispositivo TrakerD-LS.

Capítulo V

Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo a futuro

5.1. Conclusiones

El uso del protocolo LoRaWAN (Clase A) demostró ser adecuado para misiones de rescate debido a su bajo consumo energético y resistencia a interferencias, de igual forma, la utilización de infraestructuras como The Things Network facilitó la gestión segura de datos mediante el cifrado de extremo a extremo.

Se logró desarrollar e implementar un sistema de monitoreo basado en la integración de dispositivos finales GPS, red LoRaWAN, y una plataforma web interactiva utilizando Firebase.

Las pruebas dinámicas evidenciaron que el intervalo de transmisión es crítico para la fidelidad de la ruta. Mientras que el dispositivo con un intervalo de 60s mostró una trayectoria más precisa, el dispositivo configurado a 120s presentó una pérdida notable de detalle en el seguimiento del personal.

La plataforma web obtuvo un puntaje de 90/100 en la escala de usabilidad SUS, esto indica que la interfaz es intuitiva y las funciones de visualización en vivo, historial y geocercas están bien integradas para la toma de decisiones.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda ajustar los intervalos de envío según el tipo de actividad; por ejemplo, reducir el tiempo de transmisión durante desplazamientos rápidos para mejorar la fidelidad de la ruta y aumentarlo en periodos de inactividad para conservar la batería.

5.3. Trabajo a futuro

Para optimizar la precisión del sistema, se recomienda para futuras versiones la aplicación de un Filtro de Kalman que permitiría estabilizar las coordenadas obtenidas, reduciendo los picos de desplazamiento lateral y proporcionando una representación más fiel y continua del recorrido real del dispositivo.

Bibliografía

- [1] W. C. S. S. Simões, G. de Andrade Pacheco, L. de Oliveira França, A. S. Ramos, and S. P. Salehi, “Rastreador gps baseado em lorawan para ambientes industriais,” *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*, vol. 5, p. e13086, 1 2025.
- [2] M. I. Arsyad, A. A. Pekerti, and B. A. Nugraha, “Time-slotted lorawan implementation of gps tracker system for post-disaster utilization,” in *2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*, pp. 172–178, IEEE, 10 2020.
- [3] N. Hayati, D. Arifanto, K. Purwanto, Magfirawaty, and R. D. Mardian, “Developing iot-lorawan ambulance tracking system to enhance emergency response,” in *2024 International Conference on Information Technology and Computing (ICITCOM)*, pp. 318–322, 2024.
- [4] M. R. Villarim, J. V. H. de Luna, D. de Farias Medeiros, R. I. S. Pereira, and C. P. de Souza, “Lora performance assessment in dense urban and forest areas for environmental monitoring,” in *2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*, pp. 1–5, IEEE, 8 2019.
- [5] P. Vulchak, M. Brych, O. Yaremko, B. Strykhalyuk, and S. Dumych, “Iot data collection and processing system using lora wan technology,” in *2023*

IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), pp. 105–108, 2023.

- [6] M. P. Manuel, M. Faied, and M. Krishnan, “A novel lora lpwan-based communication architecture for search & rescue missions,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 57596–57607, 2022.
- [7] S. Ganesh, K. Dhivya, V. Kannagi, M. Rajkumar, and N. Suriya, “Lora assisted intelligent troop tracking and location monitoring system over defense environment,” in *2022 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, pp. 288–294, 2022.
- [8] T. Hadwen, V. Smallbon, Q. Zhang, and M. D’Souza, “Energy efficient lora gps tracker for dementia patients,” in *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 771–774, IEEE, 7 2017.
- [9] M. S. Imran, M. Daniel, Z. S. Attarbashi, D. O. D. Handayani, S. Iftikhar, and D. Al-Madani, “Wireless resilience: A lora-based sensor network and mobile application for flood victim rescue system,” in *2023 IEEE 9th International Conference on Computing, Engineering and Design (ICCED)*, pp. 1–6, 2023.
- [10] H. Zhao, W. Tang, S. Chen, A. Li, Y. Li, and W. Cheng, “Design and implementation of a novel uav-assisted lorawan network,” *Drones*, vol. 8, p. 520, 9 2024.
- [11] G. M. Bianco and G. Marrocco, “Radio frequency identification and localization by wearable lora for search and rescue in mountains,” in *2022 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, pp. 120–125, IEEE, 5 2022.

- [12] W. G. Lima, A. V. R. Lopes, C. M. M. Cardoso, J. P. L. Araújo, M. C. A. Neto, M. E. L. Tostes, A. A. Nascimento, M. Rodriguez, and F. J. B. Barros, “Lora technology propagation models for iot network planning in the amazon regions,” *Sensors*, vol. 24, p. 1621, 3 2024.
- [13] L. Sciullo, A. Trotta, and M. D. Felice, “Design and performance evaluation of a lora-based mobile emergency management system (locate),” *Ad Hoc Networks*, vol. 96, p. 101993, 1 2020.
- [14] A. Pastório and E. Camargo, “Técnicas de geolocalização em redes lorawan como abordagem de tolerância a falhas para dispositivos iot baseados em gps,” in *Anais do XXII Workshop de Testes e Tolerância a Falhas*, pp. 29–42, SBC, 2021.
- [15] Apostolos, K. Vasileios, P. N. B. Christos, and Gkamas, “Iot geolocation performance using lorawan,” in *Advanced Information Networking and Applications* (Flora, M. Francesco, E. Tomoya, T. M. B. Leonard, and Amato, eds.), pp. 229–239, Springer International Publishing, 2020.
- [16] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment,” *ICT Express*, vol. 5, pp. 1–7, 3 2019.
- [17] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, pp. 60–67, 10 2016.
- [18] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, “A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things,” *Sensors*, vol. 16, p. 1466, 9 2016.
- [19] L. Alliance, “Lorawan link layer specification v1.0.4,” tech. rep., LoRa Alliance, 10 2020.

- [20] A. Lavric and V. Popa, “Internet of things and lora™ low-power wide-area networks: A survey,” in *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pp. 1–5, IEEE, 7 2017.
- [21] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, M. Hamalainen, and J. Iinatti, “Evaluation of lora lpwan technology for remote health and wellbeing monitoring,” in *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, pp. 1–5, IEEE, 3 2016.
- [22] T. T. Industries, “The things network documentation,” 2026.
- [23] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, “Understanding the limits of lorawan,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, pp. 34–40, 2017.
- [24] M. Slabicki, G. Premsankar, and M. D. Francesco, “Adaptive configuration of lora networks for dense iot deployments,” in *NOMS 2018 - 2018 IEEE/I-FIP Network Operations and Management Symposium*, pp. 1–9, IEEE, 4 2018.
- [25] E. Kaplan and C. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. Artech House, 3rd ed., 2017.
- [26] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Artech House, 2nd ed., 2013.
- [27] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *GPS: Theory and Practice*. Springer-Verlag Wien, 2001.
- [28] L. Moroney, *The Definitive Guide to Firebase*. Apress, 2017.
- [29] G. Cloud, “Documentación de cloud firestore,” 2026.

- [30] H. Varshney, A. S. Allahloh, and M. Sarfraz, “Iot based ehealth management system using arduino and google cloud firestore,” in *2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, pp. 1–6, IEEE, 11 2019.
- [31] R. H. Sampieri, C. F. Collado, and L. P. Baptista, *Metodologia de la investigacion*, vol. 4. McGraw-Hill, 2006.
- [32] M. E. C. Cortés and M. I. León, *Generalidades sobre Metodología de la Investigación*, vol. 1. 1 ed., 2004.
- [33] A. F. C. Veintimilla, M. S. O. Vergara, E. F. P. Luna, and D. J. S. Chasipanta, *MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN*, vol. 1. 1 ed., 4 2017.
- [34] D. T. C. Limited, “Trackerd-ls: Lorawan asset tracker,” 2024. Accedido el 12 de febrero de 2026.
- [35] MOKOSmart, “Lw004-pb: Lorawan panic button,” 2024. Accedido el 12 de febrero de 2026.
- [36] V. Agafonkin, “Leaflet: An open-source javascript library for mobile-friendly interactive maps,” 2025.
- [37] J. Brooke, *SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale*, pp. 189–194. Taylor & Francis, 1996.

Anexos