

Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Evaluación de redes MESH en comunicaciones LoRa: Conexión y desempeño en escenarios con obstáculos.

Proyecto de Titulación

Previo la obtención del Título de:

Magister en Telecomunicaciones

Presentado por:

César Aristóteles Amat Jaramillo

Pablo Fernando Eras Caraguay

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO: 2025

Dedicatoria

A Jesús y a María Santísima, fuente de todo amor verdadero, quienes me han sostenido con su gracia en este camino de vida. A San José, modelo de hombría y paternidad, ejemplo de fidelidad, trabajo y silencio fecundo, que me inspira a amar más a la Sagrada Familia y a cuidar con entrega la familia que Dios me ha confiado.

A mi amada esposa Maricela Freire y a mis hijos José y César, dones preciosos de Dios, razón de mi alegría y motor de cada uno de mis esfuerzos. Ustedes son mi hogar, mi felicidad y mi mayor bendición, junto con mis hijos del cielo, que permanecen en el amor eterno del Señor.

A mi madre, mis hermanos, mis suegros, y a mi padre que ya goza de la presencia del Señor, por su apoyo, consejos y compañía en cada etapa de mi vida.

Con todo mi amor y gratitud, dedico este trabajo a ustedes.

Cesar Aristóteles Amat Jaramillo

Agradecimientos

A Dios, fuente de toda gracia y sabiduría, por regalarme la oportunidad de crecer como persona, esposo, padre y profesional.

A mi amada esposa Maricela Freire, cuyo invaluable sacrificio ha sido el cimiento de este logro. Gracias por tu confianza, paciencia y entrega generosa a nuestros hijos durante esta etapa compleja; por tus oraciones constantes; y por tu carácter firme que me ha forjado como un hombre más justo y virtuoso. Todo esto lo recibo como un testimonio vivo de amor verdadero.

A mis hijos José y César, aun cuando la distancia me ha separado de ustedes en el tiempo. Son mi pensamiento constante y el lugar al que siempre deseo volver, pues en ustedes encuentro mi alegría y motivación.

A mi madre, hermanos, suegros y padre que está en el cielo, por su ayuda incondicional, compañía y respaldo en cada etapa de mi vida.

A mis colegas, compañeros de estudio y profesores, especialmente MsC. Ronald Criollo por su guía y comprensión.

A mis jefes y amigos de Quito, especialmente a Livingston Briones, por su apoyo y comprensión como un hermano mayor durante este proceso académico y profesional.

Cesar Aristóteles Amat Jaramillo

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi abuela Teresa, cuyo respaldo invaluable hizo posible la realización de esta maestría. A mis padres y hermanos, por su constante apoyo, comprensión y motivación a lo largo de este proceso académico. Asimismo, a mis amigos, en especial a Elizabeth M., quienes con sus palabras de aliento y buenos deseos me brindaron fuerzas para continuar y culminar este camino con éxito.

Pablo Fernando Eras Caraguay

Declaración Expresa

Nosotros Amat Jaramillo César Aristóteles y Eras Caraguay Pablo Fernando acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 2 de septiembre del 2025.

Ing. César Aristóteles
Amat Jaramillo

Ing. Pablo Fernando
Eras Caraguay

Evaluadores

MsC. Ronald Criollo

Tutor

PhD. Boris Ramos

Revisor

RESUMEN

La falta de infraestructura de telecomunicaciones en zonas rurales y de difícil acceso representa un desafío significativo para el monitoreo y control de recursos en sectores productivos (acuicultura, agricultura, entre otros). Este proyecto tiene como objetivo proponer una solución alternativa mediante el desarrollo de un prototipo de red LoRa Mesh, con la premisa de que esta tecnología permite extender la cobertura y garantizar una comunicación más estable en escenarios con vegetación, edificaciones y ausencia de línea de vista.

Para el desarrollo del proyecto se utilizó un prototipo basado en microcontroladores programados con software de código abierto Meshtastic. Se implementaron pruebas en un entorno controlado con presencia de vegetación, obstrucciones, en ambientes sub-urbanos y abierto, comparando el desempeño de una red LoRa convencional frente a una red LoRa Mesh. Adicionalmente, se propone un modelo empírico basado en mediciones de RSSI tomadas en el campus de la ESPOL, conjunto con un análisis estadístico para establecer el gradiente del modelo y contrastarlo con modelos de propagación como Cost-231 Hata y Free Space Loss (FSL).

Los resultados mostraron que la red LoRa Mesh duplicó la distancia de comunicación respecto a la red LoRa convencional, mejorando la estabilidad y cobertura. Asimismo, se obtuvo un modelo de propagación empírico de múltiples gradientes que presenta un mejor ajuste a los datos reales en comparación con los modelos empíricos utilizados como referencia.

Se concluye que la implementación de LoRa Mesh constituye una alternativa eficiente y adaptable para el monitoreo y control en zonas rurales con limitaciones de conectividad.

Palabras clave: Mesh, LoRa, Gateway (GW), prototipo, nodos, multisaltos, Meshtastic, múltiples gradientes.

ABSTRACT

The lack of telecommunications infrastructure in rural and hard-to-reach areas poses a significant challenge for monitoring and controlling resources in productive sectors (aquaculture, agriculture, among others). This project aims to propose an alternative solution by developing a LoRa Mesh network prototype, based on the premise that this technology allows for extended coverage and more stable communication in scenarios with vegetation, buildings, and no line of sight.

A prototype based on microcontrollers programmed with Meshtastic open-source software was used to develop the project. Tests were implemented in a controlled environment with vegetation and obstructions, in suburban and open environments, comparing the performance of a conventional LoRa network with a LoRa Mesh network. Additionally, an empirical model based on RSSI measurements taken on the ESPOL campus is proposed, together with a statistical analysis to establish the model's gradient and contrast it with propagation models such as Cost-231 Hata and Free Space Loss (FSL).

The results showed that the LoRa Mesh network doubled the communication distance compared to the conventional LoRa network, improving stability and coverage. Likewise, an empirical propagation model with multiple gradients was obtained that better fits the actual data compared to the empirical models used as a reference.

It is concluded that the implementation of LoRa Mesh is an efficient and adaptable alternative for monitoring and control in rural areas with connectivity limitations.

Keywords: Mesh, LoRa, Gateway (GW), prototype, nodes, multi-hops, Meshtastic, multiple gradients.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ASBTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGIA	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
1 INTRODUCCION.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Propuesta de la solución	6
1.5 Alcance y consideraciones	9
1.5.1 Alcance.....	9
1.5.2 Consideraciones	9
2 MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Fundamentos de la tecnología Lora y Lora mesh	12
2.1.1 ¿Qué es LoRa?	12
2.1.2 Banda de Frecuencias para LoRa	14
2.1.3 LoRa Mesh	15
2.2 Arquitectura y topología de una red LoRa Mesh	16
2.3 Hardware y Software Lora Mesh	18
2.3.1 ¿Qué es Meshtastic?	18
2.3.2 ¿Cómo funciona Meshtastic?	18
2.3.3 Dispositivos Meshtastic	19
2.3.4 Hardware Adicional.....	20
3 METODOLOGIA.....	23
3.1 Diseño de la solución	23
3.2 Modelos empíricos de pérdida de trayectoria de propagación	26
3.2.1 Modelos empíricos.....	27
4 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	28
4.1 Escenario y dispositivos	28
4.2 Cobertura y Alcance	30
4.3 Fiabilidad de la conexión	34

4.4	Comparativa de Tecnologías.....	35
4.5	Evaluación del nivel de señal RSSI en la red LoRa	37
4.6	Discusión.....	44
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
5.1	Conclusiones.....	46
5.2	Recomendaciones.....	47

ABREVIATURAS

LoRa	Long Range
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIEC	Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación
GW	Gateway
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
TTN	The Things Network
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
FSL	Free-Space Path Loss
RSSI	Received Signal Strength Indicator
GPS	Global Positioning System
CSV	Comma-Separated Values

SIMBOLOGÍA

MHz Mega Hertz

dB Decibelios

dB_i Decibelios Relativos a Isótropo

Km Kilómetros

cm Centímetros

V Voltios

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Conexiones Lora entre nodos	4
Figura 1.2 - Interfaz gráfica de usuario Meshtastic en dispositivo móvil	8
Figura 1.3 - Monitoreo y localización GPS de los nodos	8
Figura 2.1 - Red LoRa Mesh (VENCO, 2024).....	16
Figura 2.2 - Arquitectura Meshtastic (MESHTASTIC, 2024).....	18
Figura 2.3 - Raspberry Pi 4 (Raspberry Pi, 2024)	21
Figura 2.4 - Batería de Litio 3.7 V	21
Figura 2.5 - Panel Solar 5V.....	22
Figura 3.1 - Diagrama de bloques general.....	24
Figura 3.2 - Diagrama de bloques del prototipo	25
Figura 3.3 - Diseño esquemático del prototipo	26
Figura 4.1 - Escenario de pruebas	29
Figura 4.2 - Posición inicial GW y Nodo B.....	30
Figura 4.3 - Estado de la comunicación LoRa Convencional	31
Figura 4.4 - Posición inicial GPS del Nodo B empleando la app Meshtastic	31
Figura 4.5 - Posición Inicial GW y Nodo B.....	32
Figura 4.6 - Estado de la comunicación LoRa empleando Nodo A como Intermediario	32
Figura 4.7 - Nueva posición del Nodo B	33
Figura 4.8 - Nueva posición GPS del nodo B empleando la app Meshtastic	34
Figura 4.9 - Estado de comunicación LoRa del nodo B empleando nodo A como Intermediario	34
Figura 4.10 - Latencia del sistema – GW a Nodo B.....	35
Figura 4.11 - Distribución de nodos en campus Prosperina.....	37
Figura 4.12 - Distribución de puntos con y sin vegetación	38
Figura 4.13 - Visualización de RSSI a través del aplicativo móvil	39
Figura 4.14 - Archivo data base visualizado empelado DB BROWSER	40
Figura 4.15 - Archivo csv con data de cada nodo.....	40
Figura 4.16 - Diagrama de caja del RSSI.....	42
Figura 4.17 - Regresión lineal de las mediciones del RSSI.....	42
Figura 4.18 - Comparación de los modelos de pérdidas de propagación	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 - Banda de Frecuencia LoRa (Huang, 2020).....	14
Tabla 2.2 - Tabla comparativo de dispositivos Meshtastic	20
Tabla 4.1 - Localización de GW y nodo B	30
Tabla 4.2 - Localización de GW y nodos A y B	32
Tabla 4.3 - Localización de GW y nodos A y B	33
Tabla 4.4 - Evaluación Técnica y Comparativa de Redes LoRa	35
Tabla 4.5 - Resumen de distancias y RSSI Promedio	41

CAPITULO 1

1 INTRODUCCION

En las zonas rurales y de difícil acceso, la falta de infraestructuras de telecomunicaciones representa un reto importante para el monitoreo y control eficiente de recursos. La lejanía de las torres de telecomunicaciones, junto con barreras naturales como montañas y bosques, genera problemas de conectividad en sectores clave como la agricultura, la minería, la acuicultura y la floricultura, donde el acceso a información en tiempo real es crucial para la toma de decisiones. Estas limitaciones tecnológicas no solo impactan la productividad, sino que también pueden generar pérdidas económicas y daños ambientales debido a la falta de optimización de los recursos.

En este contexto, la tecnología LoRa Mesh se presenta como una solución innovadora y de bajo costo que permite ampliar la cobertura en áreas remotas mediante la comunicación entre dispositivos de manera directa o a través de otros nodos. A diferencia de las redes tradicionales de punto a multipunto, LoRa Mesh proporciona una mayor flexibilidad y resiliencia, permitiendo que los dispositivos ajusten automáticamente su comunicación en función de las condiciones del entorno. Aunque en Ecuador hay pocos estudios que aborden esta tecnología, su potencial para mejorar la conectividad en áreas rurales y sectores productivos es evidente, y su implementación podría abrir nuevas oportunidades para el desarrollo tecnológico en el país.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En muchas zonas rurales y de difícil acceso, la falta de infraestructuras de telecomunicaciones limita significativamente las posibilidades de monitoreo y control eficiente de recursos. Estas áreas suelen tener una cobertura de comunicación deficiente debido a la lejanía de las torres de telecomunicaciones convencionales, la presencia de barreras naturales como montañas o bosques

densos, y la limitada inversión en infraestructura tecnológica por parte de proveedores. Esto genera desafíos significativos en términos de conectividad en los sectores como la acuicultura, agricultura, la minería, la floricultura y otras actividades productivas, que dependen del acceso a información precisa en tiempo real para la toma de decisiones efectivas.

La falta de cobertura y conectividad adecuada impide el uso de tecnologías avanzadas de monitoreo remoto, automatización de procesos y control eficiente de recursos, lo que puede llevar a ineficiencias operativas, pérdidas económicas y un impacto ambiental negativo debido a la falta de datos precisos para la optimización de recursos.

Ante la falta de cobertura de comunicación en zonas rurales o de difícil acceso, se han implementado varias soluciones temporales y estructuras improvisadas, como postes altos o incluso árboles, para elevar antenas y mejorar la recepción de señales. Estas torres son construidas localmente con materiales disponibles, pero suelen ser inestables o tener un alcance limitado. Además, la calidad de la señal puede depender de las condiciones ambientales o de la ubicación exacta de la antena.

Actualmente en el mercado ecuatoriano existe pocas empresas que se dedican a brindar soluciones de conectividad utilizando tecnologías cableadas, inalámbricas e infraestructura de telecomunicaciones de alto costo como son las torretas para la instalación de antenas.

Por otra parte, la comunidad científica ha emprendido estudios en el diseño de protocolos de comunicación LORA en una configuración de red estrella o MESH para distintas aplicaciones. Sin embargo, estos estudios son frecuentes apreciarlos en países de Europa. En países latinoamericanos como Ecuador este mercado se le puede considerar un “océano azul”.

Según BBC News, en el año 2023 Ecuador se convirtió en el mayor exportador mundial de camarón y existen 4000 empresas camaronesas dentro del país. Esta

industria camaronera se asienta en áreas marinas y fluviales, en donde se erigen los manglares, razón por la cual existen zonas ciegas de cobertura, en la cual la conectividad entre la oficina del biólogo y puntos de interés o sensores se ve afecta.

En ciertos casos, se instalan largas extensiones de cables coaxiales o de fibra óptica improvisados para llevar la conectividad desde áreas urbanas a zonas rurales. Si bien puede ser una solución temporal para llevar conectividad a áreas alejadas, esta práctica resulta costosa y complicada de mantener debido a las distancias involucradas y la exposición de los cables a las inclemencias del entorno.

Lora Mesh es una tecnología que aún sigue en desarrollo, en donde se busca los dispositivos pueden comunicarse entre sí de manera directa o a través de otros dispositivos intermediarios, permitiendo una mayor flexibilidad y cobertura en comparación con las redes punto a multipunto tradicionales. (Mejías Rojas, 2021)

Unos de los usos de la tecnología mesh es en el caso de (Kernel Sistemi), el cual usa mesh para la monitorización gran cantidad de variables de una planta fotovoltaica, dándole un beneficio dado que el espectro de radiofrecuencia cambia diariamente, y en este escenario la tecnología Mesh se adapta muy bien a estos cambios, donde la tecnología Mesh se ajusta de forma automática y en tiempo real a dichas variaciones, asegurando una comunicación estable y eficiente.

En Ecuador existen pocos estudios relacionados al tema a resolver, entre estos se proponen simulaciones y despliegues de redes de largo alcance en donde se utilizan tecnologías inalámbricas LoRaWAN pero no en una configuración malla o MESH. Por ejemplo, el estudio de (Arias, 2020), busca aportar al sector camaronero para la crianza de larvas de camarón, empleando sistemas de control en base a tecnologías inalámbricas y sistemas embebidos que operan bajo energía autosustentable.

Otro estudio propone implementar un prototipo de arquitectura de red basado en la plataforma TTN para administrar dispositivos IoT, en el cual va a utilizar como

medio de transmisión inalámbrica la tecnología LoRaWAN entre los nodos y el GW. (Ricardo Marcelo Chuqui, 2022)

Finalmente, la propuesta del proyecto de titulación consiste en analizar la tecnología MESH dentro de una red LoRa para resolver estos problemas de conexiones inalámbricas en entornos desafiantes con obstáculos o sin línea de vista. Se desarrollará un prototipo de comunicación LoRa Mesh que permita la interconexión de nodos mediante multisaltos, generando rutas alternas para llegar al objetivo, logrando así un mayor alcance y superando obstáculos físicos que impiden la línea de vista directa tal como se muestra en la Figura 1.1 en la cual el Nodo 1 posee línea de vista con el Gateway (GW) y el Nodo 2 carece de línea de vista con el GW debido a una arboleada. La red Mesh permitirá que los datos fluyan entre nodos intermedios, asegurando que la información llegue al destino incluso cuando los nodos finales no puedan comunicarse directamente con el GW.

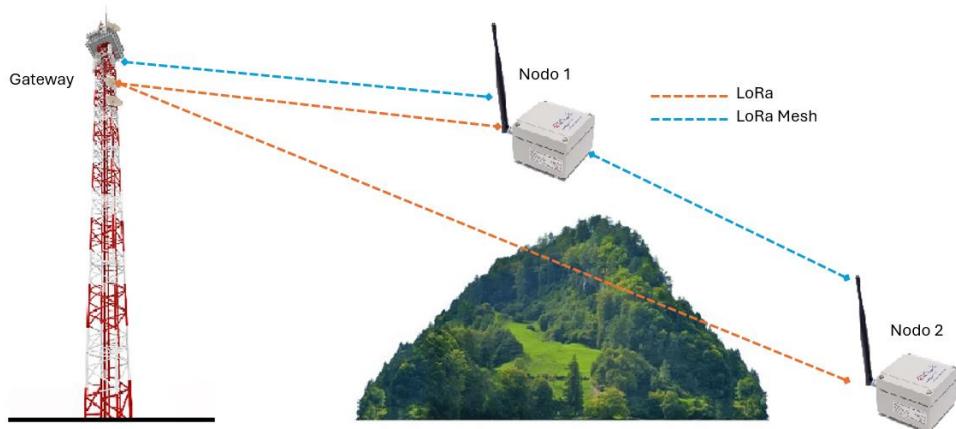


Figura 1.1 - Conexiones Lora entre nodos

Este prototipo será diseñado y evaluado en un entorno controlado, simulando condiciones de obstrucción y cambios en el espectro, con el objetivo de validar su efectividad y estabilidad. La propuesta busca tener aplicaciones en diversas industrias, como la acuicultura, la agricultura y la minería, donde la conectividad remota es crucial para la eficiencia operativa y la toma de decisiones en tiempo real.

1.2 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

El desarrollo de una comunicación basado en LoRa Mesh para el monitoreo y control, responde a la necesidad de mejorar la calidad de servicio. La topología del tipo mesh, permite la realizar conexiones directas entre dispositivos entre sí, dando como resultado una red tolerante a fallas, dado que esto permite tener varias rutas de comunicación entre los diferentes equipos que conforman la red. En caso de que llegue a fallar uno de dichos equipos, el sistema de forma automática procede a tomar otro camino que le permita llegar al destino. Realizar este tipo de tecnología de forma física (es decir, de forma cableada), genera altos costos debido a que se deben emplear grandes cantidades de cable, por lo que es viable un sistema bajo tecnología inalámbrica, donde solo se dependa de transmisiones en radiofrecuencia.

Dado este contexto, con el proyecto se espera mejorar la efectividad de la conectividad y al acceso en tiempo real a los datos censados o actuadores de alimentadores. Además, se espera mermar el costo que le conllevaría a las empresas en la implementación de infraestructura como la instalación de torretas y el despliegue de cables. Cabe recalcar que esta comunicación puede ser extrapolado a industrias acuícolas, agrícolas y mineras en cual se necesitan comunicaciones de largo alcance y con nula o poca línea de vista.

El uso de mesh ante la llegada de la tecnología 5G busca ofrecer una conectividad ultrarrápida y de baja latencia, sobre todo en la Industria 5.0. Se busca que la comunicación sea tiempo real entre máquinas, humanos y sistemas, promoviendo una producción más flexible y eficiente. Sin embargo, el rango de frecuencias más alto del 5G dificulta la cobertura en entornos rurales e interiores debido a la degradación de la señal. Para superar este obstáculo, se han propuesto redes híbridas 5G y WiFi mesh, aprovechando las ventajas de ambas tecnologías. (Bichouna, 2023).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la conexión inalámbrica en un escenario con obstáculos o con falta de línea de vista usando la tecnología Mesh dentro de una red LoRa, facilitando la transmisión de datos eficiente y confiable entre nodos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los componentes de hardware y software necesarios para el diseño de la arquitectura Lora Mesh.
- Desarrollar un prototipo de comunicación en malla dentro de una red LoRa, donde garantice la conectividad de cada uno de los nodos con el Gateway y con el nodo más cercano, aplicando multisaltos entre nodos.
- Evaluar el rendimiento de la red propuesta en un escenario con obstáculos y sin línea de vista.
- Establecer el modelo de pérdida de propagación por gradiente utilizando el método de mínimos cuadrados.

1.4 PROPUESTA DE LA SOLUCIÓN

La implementación de la tecnología LoRa Mesh se justifica como una solución adecuada ante la falta de infraestructura de telecomunicaciones en zonas rurales y de difícil acceso. La necesidad de contar con un sistema de comunicación eficiente, flexible y económico en sectores productivos como la agricultura, acuicultura, minería y floricultura es apremiante, ya que estas áreas suelen estar alejadas de las redes de telecomunicaciones convencionales y enfrentan barreras físicas que limitan la conectividad. Las soluciones tradicionales, como la instalación de torres o el uso de cables coaxiales o de fibra óptica, resultan costosas, complicadas de mantener y, en muchos casos, ineficientes frente a las condiciones ambientales adversas y la geografía accidentada.

LoRa Mesh ofrece una alternativa innovadora, al permitir la creación de redes de topología malla que no dependen de un solo punto de conexión. Al permitir que

los dispositivos se comuniquen entre sí, directamente o mediante nodos intermedios, se amplía la cobertura de manera significativa y se reduce la necesidad de infraestructura física costosa, como torres o cableado extenso. Además, la capacidad de la red para ajustarse automáticamente a cambios en el entorno y adaptarse a condiciones variables garantiza una comunicación más resiliente y estable, incluso en áreas con un espectro de radiofrecuencia cambiante.

Para el levantamiento del presente proyecto de la topología LORA MESH, se ha procedido a identificar los microcontroladores que permitan una comunicación de mallado y que operen dentro del rango de frecuencia disponible en el país. Cada nodo, conformado por un microcontrolador ESP32 LilyGo T-Beam junto con un sistema energético conformado por una batería de litio y un sistema de carga mediante panel solar.

El GW LoRa Mesh está conformado por componentes: ESP32 LilyGo T-Beam junto con una Raspberry Pi 4 cuya función es la del procesamiento y comunicación con los nodos de la red.

Como software se utilizará la plataforma Meshtastic, que es un proyecto de código abierto que permite la comunicación de datos utilizando hardware basado en ESP32 y módulos LoRa. Esta plataforma es personalizable donde se puede modificar el software para ser adaptado a los requerimientos específicos del proyecto, en este caso, se configurará los nodos de tal manera que se establezca una comunicación multisaltos en la cual los dispositivos puedan comunicarse entre sí o desde otros nodos, creando así una red centralizada y robusta. Además, posee una interfaz gráfica de usuario la cual incluye aplicaciones para dispositivos móviles y ordenadores, permitiendo la configuración y monitoreo de la red, tal como se observan en las Figuras 1.2 y 1.3:

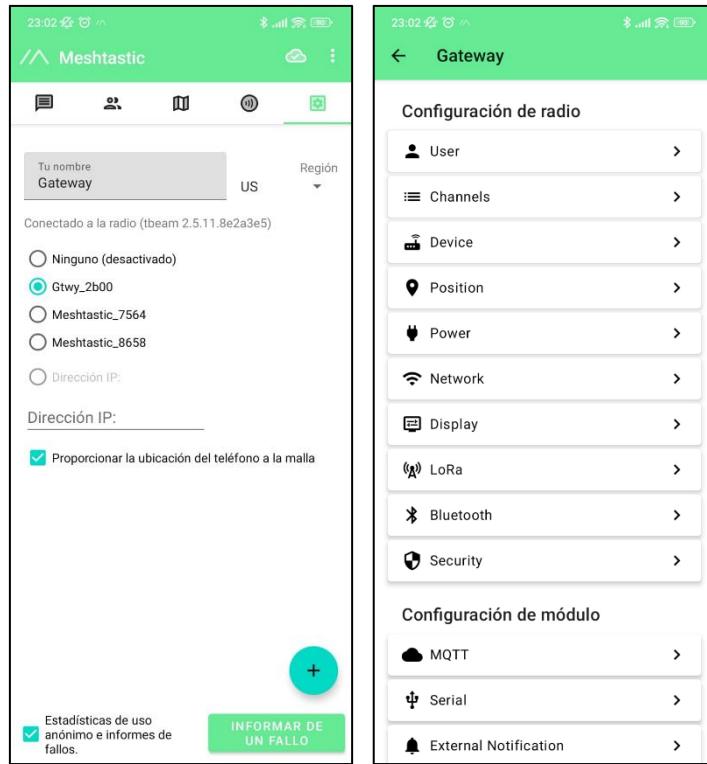


Figura 1.2 - Interfaz gráfica de usuario Meshtastic en dispositivo móvil

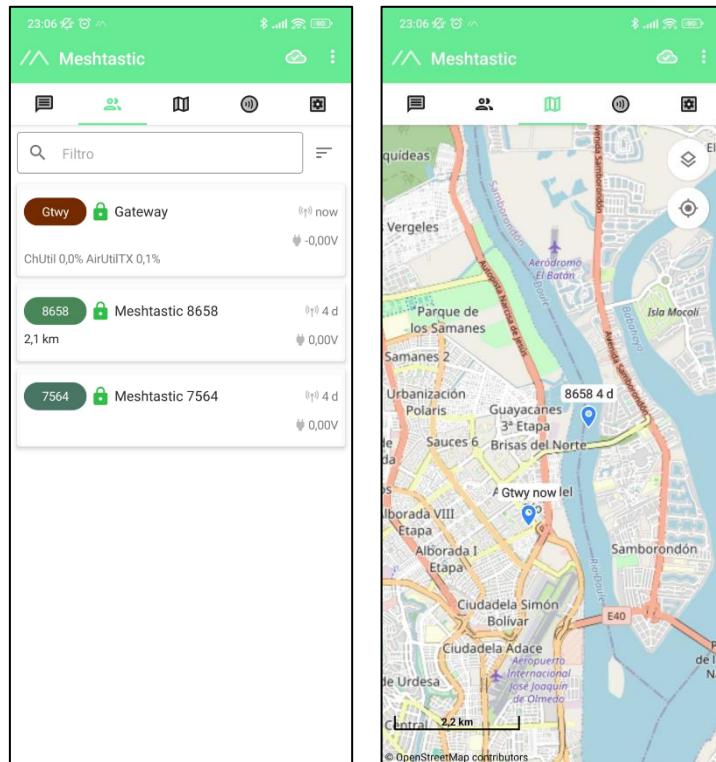


Figura 1.3 - Monitoreo y localización GPS de los nodos

1.5 ALCANCE Y CONSIDERACIONES

1.5.1 ALCANCE

El proyecto tiene como finalidad desarrollar un prototipo que permita obtener una cobertura de comunicación más amplia y fiable en áreas rurales, superando las limitaciones impuestas por obstáculos naturales como cerros y vegetación. Si bien el sistema aún se encuentra en la fase de prototipo, se espera que los avances logrados durante su desarrollo demuestren una mejora significativa en el porcentaje de áreas cubiertas en comparación con las tecnologías de comunicación actualmente empleadas. Estas mejoras facilitarán un monitoreo más efectivo y continuo en entornos difíciles, contribuyendo a una gestión más eficiente de los recursos en zonas remotas, donde el monitoreo en tiempo real es crucial para diversas aplicaciones.

Dado que se trata de un prototipo, el proyecto también busca ofrecer flexibilidad y adaptabilidad, de modo que el sistema pueda ajustarse a los cambios en el entorno y a las condiciones operativas específicas de los entornos rurales. A lo largo de las pruebas, se evaluará la capacidad del prototipo para adaptarse a diferentes escenarios, demostrando su eficacia frente a diversas condiciones ambientales y operativas. Esto permitirá identificar oportunidades de mejora en su diseño, que podrían ser implementadas en futuras versiones para optimizar su rendimiento.

1.5.2 CONSIDERACIONES

Al desarrollar un prototipo de sistema de comunicación basado en LoRa Mesh para entornos remotos, se deben tomar en cuenta algunas consideraciones con el fin de garantizar la funcionalidad, eficiencia y escalabilidad. Entre las principales se incluyen:

- **Prototipo:** Dado que este proyecto se enfoca en el desarrollo de un prototipo, es importante tener en cuenta que la escalabilidad inicial del sistema estará limitada por la cantidad de equipos disponibles.

Al ser una fase de prueba, los recursos y el presupuesto asignado condicionarán el número de nodos, gateways y otros componentes que se pueden integrar en la red. Sin embargo, la principal finalidad de este prototipo es demostrar la viabilidad técnica y funcional del sistema, lo que permitirá identificar las mejoras necesarias para futuras expansiones.

- **Condiciones Geográficas y Ambientales:** Evaluar las características del terreno, como montañas, valles y vegetación densa, que pueden interferir en la propagación de la señal. Esto ayudará a planificar la ubicación óptima de los nodos y a ajustar la potencia de transmisión para mejorar la cobertura.
- **Tipo de Obstrucciones:** Los obstáculos físicos, como árboles, construcciones o cuerpos de agua, deben ser analizados cuidadosamente, ya que pueden atenuar la señal. Se deben implementar estrategias para minimizar su impacto, como el uso de repetidores o antenas elevadas.
- **Distancia entre Nodos:** Determinar la distancia máxima entre los nodos de la red, pese a que LoRa Mesh está diseñado para largas distancias, pero el rendimiento puede variar según el entorno. Realizar pruebas de cobertura en diferentes escenarios ayudará a determinar las distancias óptimas entre nodos.
- **Interferencias de Radiofrecuencia:** En áreas rurales, aunque la congestión de espectro es generalmente baja, es importante considerar posibles interferencias de otros sistemas que operen en bandas de frecuencia similares. El sistema debe configurarse para minimizar estos efectos y garantizar la integridad de la comunicación.

- **Escalabilidad del Sistema:** Es importante que el diseño del sistema permita una fácil expansión en el futuro. A medida que crezcan las necesidades de monitoreo y control, el sistema debe ser capaz de integrar más nodos sin comprometer su eficiencia o rendimiento.
- **Mantenimiento y Accesibilidad:** Se deben considerar las facilidades de mantenimiento de los nodos en áreas remotas. Es preferible un diseño que minimice la necesidad de intervenciones frecuentes y que permita un mantenimiento remoto o de fácil acceso.
- **Regulaciones y Normativas:** Cumplir con las normativas locales sobre el uso de espectro radioeléctrico es crucial. El sistema debe operar dentro de los rangos de frecuencia permitidos y cumplir con las regulaciones del país o región para evitar interferencias y sanciones legales.

CAPITULO 2

2 MARCO TEÓRICO

El presente capítulo desarrolla los conceptos fundamentales y el marco teórico que sustentan el diseño y desarrollo del prototipo basado en la tecnología LoRa Mesh. En él se exploran los principios básicos de LoRa, sus características distintivas y aplicaciones, así como los avances hacia su integración en redes en malla (Mesh) para extender la cobertura y optimizar la comunicación en entornos desafiantes.

2.1 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA LORA Y LORA MESH

A continuación, se presentan las bases teóricas sobre la arquitectura y topología de redes LoRa Mesh, destacando sus ventajas en términos de alcance, robustez y escalabilidad. Estos conceptos permiten contextualizar la elección de esta tecnología para solucionar problemas de comunicación en áreas rurales o remotas, abordando las limitaciones de infraestructura tradicional y garantizando una transmisión eficiente de datos en aplicaciones críticas como la agricultura, el monitoreo ambiental y la gestión de recursos.

2.1.1 ¿QUÉ ES LORA?

LoRa es una tecnología de comunicación inalámbrica que opera en bandas de radiofrecuencia sin licencia. Se trata de un protocolo de capa física que emplea modulación de espectro ensanchado, permitiendo comunicaciones de largo alcance con un consumo eficiente de energía. No obstante, esta capacidad de transmisión a largas distancias se obtiene a cambio de un ancho de banda reducido, lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren el envío de pequeñas cantidades de datos en entornos remotos. (AWS, 2020)

LoRa se distingue por su flexibilidad y escalabilidad, lo que permite adaptarse tanto a implementaciones pequeñas como grandes. Estas características son esenciales en la fase de crecimiento y exploración de la industria del Internet de las Cosas (IoT). Además de su capacidad para ajustarse a diversas necesidades, LoRa es una tecnología segura y confiable, incorporando mecanismos avanzados como la autenticación bidireccional, el cifrado de extremo a extremo y la protección de la integridad de los datos. Este enfoque integral hacia la seguridad refuerza su proyección a futuro, asegurando la confiabilidad en entornos críticos de comunicación. (EBYTE, 2023).

Sus principales características son el bajo consumo de energía, el largo alcance y una fuerte capacidad de resistencia a las interferencias.

- **Largo alcance**

Aunque LoRa tiene una baja velocidad de transmisión, cuenta con una alta sensibilidad. Su alcance de transmisión es significativamente mayor que el de otras tecnologías de comunicación inalámbrica, logrando cubrir varios kilómetros en entornos al aire libre e incluso largas distancias en áreas urbanas. Por esta razón, es ideal para aplicaciones que requieren comunicación a larga distancia, baja velocidad y manejo de pequeños volúmenes de datos.

- **Bajo consumo de energía**

La tecnología LoRa emplea un método de transmisión de baja potencia, lo que permite que los dispositivos funcionen durante largos períodos con batería. Esta característica es especialmente útil para dispositivos que requieren una operación prolongada y donde la sustitución de baterías es complicada, como los nodos de sensores o el equipamiento de ciudades inteligentes.

- **Fuerte capacidad de resistencia a las interferencias**

LoRa utiliza tecnología de espectro ensanchado, lo que le proporciona una excelente capacidad anti-interferencias. En situaciones donde se presentan interferencias electromagnéticas externas durante la comunicación, LoRa es capaz de mantener una comunicación estable, algo que las tecnologías inalámbricas tradicionales no pueden lograr de manera efectiva.

- **Conexiones masivas**

LoRa admite la conexión de un gran número de dispositivos simultáneamente. Cada estación base es capaz de gestionar miles de dispositivos al mismo tiempo, lo que la hace adecuada para la construcción de redes de Internet de las Cosas (IoT) de área amplia, también conocidas como redes LPWAN (Low Power Wide Area Network). (EBYTE, 2024)

2.1.2 BANDA DE FRECUENCIAS PARA LORA

LoRa opera principalmente en las bandas de frecuencia ISM (Industrial, Scientific, and Medical) que están disponibles sin licencia en diversas regiones, tal como se muestra en la Tabla 2.1. Estas bandas suelen estar en el rango de 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. Las bandas específicas y los parámetros de operación pueden variar según la región debido a regulaciones locales.

Tabla 2.1 - Banda de Frecuencia LoRa (Huang, 2020)

REGION	FRECUENCIA
Europa	863 – 870 MHz
	433 MHz
US	902 – 928 MHz
China	470 – 510 MHz
	779 – 787 MHz
Australia	915 – 928 MHz
India	865 – 867 MHz

Asia	433 MHz
Norte América	915 MHz

2.1.3 LORA MESH

Con el desarrollo continuo de la tecnología del Internet de las Cosas (IoT), las tecnologías de comunicación inalámbrica se han implementado ampliamente en diversos campos. Por un lado, se tiene que LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo consumo y largo alcance, mientras que LoRa MESH es un protocolo de red AD HOC basado en la tecnología LoRa, es decir, LoRa MESH es una solución de red basada en malla que utiliza transmisión LoRa.

A través de esta tecnología, múltiples dispositivos pueden formar una red autoorganizada, creando una topología en malla que permite la interconexión entre ellos. De este modo, combina las ventajas de la tecnología LoRa con las características propias de las redes ad hoc en malla.

- **Red en malla AD HOC**

Una red en malla es una "red inalámbrica en malla", donde los nodos en la topología están interconectados, lo que permite una alta tasa de utilización y una fuerte capacidad de autocuración de la red. Estas propiedades son clave para asegurar la continuidad de la comunicación, incluso si uno o varios nodos fallan.

- **Características de las redes AD HOC**

La red LoRa MESH posee la capacidad de autoorganización, permitiendo que se establezca y mantenga automáticamente. Cuando un dispositivo se une o abandona la red, esta ajusta automáticamente su topología para asegurar la estabilidad en la transmisión de datos. Esta capacidad de autoorganización hace que la red LoRa MESH sea altamente flexible y escalable.

- **Transmisión multisalto**

El sistema LoRa MESH emplea la transmisión multisalto, en la cual los datos pueden ser reenviados a través de varios nodos antes de llegar a su nodo de destino. Este método no solo extiende efectivamente la distancia de comunicación, sino que también mejora la capacidad de penetración de la señal y reduce la carga de comunicación de un solo nodo.

2.2 ARQUITECTURA Y TOPOLOGÍA DE UNA RED LORA MESH

La estructura de LoRa Mesh no solo extiende el alcance de la red, sino que también incrementa su confiabilidad, ya que los datos pueden pasar de un dispositivo a otro hasta llegar a su destino. Este enfoque es especialmente ventajoso en entornos complejos donde la comunicación directa entre dos puntos podría verse afectada por obstáculos o interferencias. Gracias a la disponibilidad de múltiples rutas, LoRa Mesh asegura que el mensaje siempre pueda encontrar un camino alternativo para llegar a su destino, tal como se puede observar en la Figura 2.1:

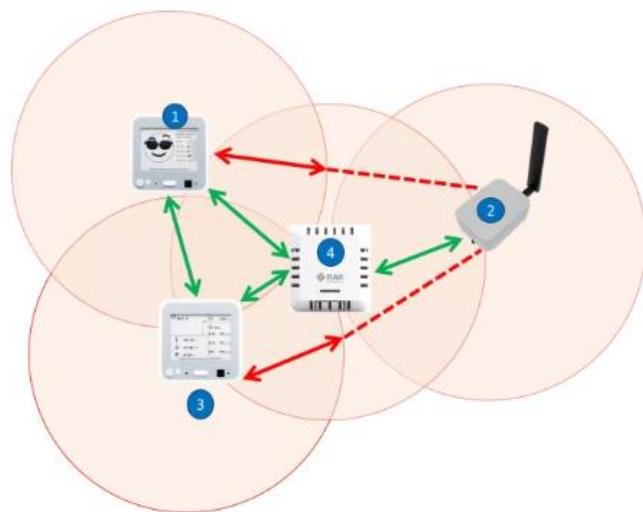


Figura 2.1 - Red LoRa Mesh (VENCO, 2024)

La capacidad de LoRa Mesh para mantener conexiones estables y continuas la convierte en una solución ideal para aplicaciones como ciudades inteligentes, agricultura y gestión de desastres. Además, la red es capaz de ajustarse automáticamente si un dispositivo falla o se incorpora uno nuevo, lo que la dota

de una gran robustez y adaptabilidad frente a los cambios en el entorno. (VENCO, 2024)

Las redes del tipo MESH se han convertido en una solución para un despliegue eficaz de redes de acceso de forma inalámbrica, gracias a su funcionalidad de comunicación de multisaltos, dando un sinfín de soluciones en varios ámbitos, abarcando redes domésticas, redes comunitarias, empresariales y de área metropolitana.

En la recopilación y transmisión de datos en áreas forestales o silvestres, donde no existen redes celulares ni cableadas en distancias que pueden abarcar decenas o incluso cientos de kilómetros, la capacidad de transmisión de un solo salto de LoRa resulta insuficiente. Para superar este desafío, es necesario implementar un sistema de retransmisión multinivel a lo largo de la ruta de transmisión, lo cual es posible mediante una red Mesh.

En una red inalámbrica MESH, los dispositivos se organizan en tres categorías: puertas de enlace Mesh, enrutadores Mesh y nodos terminales Mesh.

- **Puerta de enlace Mesh**

Funciona de manera similar al nodo central en una topología de red estrella, actuando como el centro de recepción y procesamiento de los datos inalámbricos.

- **Enrutador Mesh**

Es un nodo terminal con alimentación externa y capacidad de transmisión de datos inalámbrica. Un ejemplo típico serían los enchufes inteligentes inalámbricos, que no solo funcionan como dispositivos terminales, sino que también pueden retransmitir datos a otros nodos.

- **Nodo terminal Mesh**

Este tipo de nodo es un dispositivo terminal que generalmente funciona con batería, lo que implica que entra en estado de suspensión para conservar

energía. A diferencia del enrutador Mesh, no tiene función de retransmisión. Un ejemplo serían los sensores inalámbricos de puertas. (EBYTE, 2023)

2.3 HARDWARE Y SOFTWARE LORA MESH

2.3.1 ¿QUÉ ES MESHTASTIC?

Meshtastic es un proyecto de código abierto que utiliza la tecnología LoRa para crear una red capaz de enviar pequeños paquetes de datos, incluidos datos GPS, a largas distancias con un bajo consumo de energía. Esta solución permite que las personas que cuentan con dispositivos compatibles se comuniquen sin necesidad de depender de una operadora de telefonía móvil o de acceso a Internet, tal como se muestra en la Figura 2.2. Debido a estas características, Meshtastic resulta particularmente adecuado para su uso en entornos al aire libre, en situaciones de emergencia y en lugares donde no hay opciones de comunicación convencionales disponibles. (VENCO, 2024)

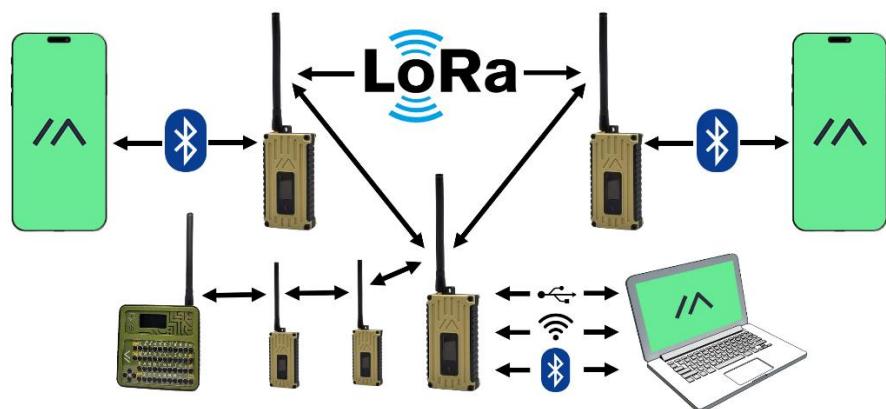


Figura 2.2 - Arquitectura Meshtastic (MESHTASTIC, 2024)

2.3.2 ¿CÓMO FUNCIONA MESHTASTIC?

Cuando un usuario envía un mensaje a través de la aplicación compañera de Meshtastic, este se transmite al radio utilizando conexión Bluetooth, Wi-Fi/Ethernet o conexión serial. Una vez recibido, el mensaje se emite a

través de la radio. Si el dispositivo no ha recibido confirmación de que el mensaje fue recibido por otro dispositivo después de un tiempo de espera determinado, retransmitirá el mensaje hasta tres veces.

Cuando un radio receptor captura un paquete, verifica si ya ha recibido ese mensaje anteriormente. Si es así, ignora el mensaje; si no lo ha escuchado antes, lo retransmitirá. Por cada mensaje que un radio retransmite, se reduce el "límite de saltos" en uno. Cuando un radio recibe un paquete con un límite de saltos de cero, no retransmitirá el mensaje.

Además, el radio puede almacenar una pequeña cantidad de paquetes (alrededor de 30) en su memoria cuando no está conectado a una aplicación cliente. Si esta memoria se llena, reemplazará los paquetes más antiguos por los nuevos mensajes de texto que lleguen.

Cabe resaltar que Meshtastic no es LoRaWAN, Helium ni TTN (The Things Network). En cambio, utiliza todo el rango de frecuencias designado para la tecnología LoRa según la región. Esta característica otorga a Meshtastic una gran flexibilidad en su operación, ya que los usuarios pueden seleccionar entre múltiples canales para minimizar la interferencia y optimizar la comunicación en sus redes. (MESHTASTIC, 2024)

2.3.3 DISPOSITIVOS MESHTASTIC

El firmware de Meshtastic se puede instalar en una amplia gama de placas de desarrollo. A continuación, en la Tabla 2.2, se presenta una breve comparación del hardware actualmente compatible:

Tabla 2.2 - Tabla comparativo de dispositivos Meshtastic

Dispositivo	LilyGO T-Beam	LilyGO T-Echo	Heltec LoRa v3	WisBlock Meshtastic
Procesador	ESP32	nRF52840	ESP32	nRF52840
Modulo radio	SX1276/SX1262	SX1262	SX1262	SX1262
Características	<ul style="list-style-type: none"> GPS Pantalla OLED WiFi Bluetooth 	<ul style="list-style-type: none"> Pantalla E-Ink Bluetooth 5.0 GPS Batería 850 mAh Sensor BME280 	<ul style="list-style-type: none"> Bluetooth WiFi Pantalla OLED 	<ul style="list-style-type: none"> GPS Pantalla OLED
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Precio accesible Funcionalidad equilibrada 	<ul style="list-style-type: none"> Bajo consumo energético Diseño compacto 	<ul style="list-style-type: none"> Compacto Económico 	<ul style="list-style-type: none"> Alta personalización Escalabilidad IoT avanzado
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> Alto consumo energético 	<ul style="list-style-type: none"> Personalización limitada Sin WiFi Alto costo 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere personalización adicional dependiendo del uso. 	<ul style="list-style-type: none"> Necesita ensamblaje Sin pantalla Sin batería

De todos los dispositivos presentados, se optó por elegir la placa LilyGO T-Beam por su costo y las funcionalidades que ofrece, además que esta placa combina versatilidad y facilidad de uso, permitiendo que sea una herramienta confiable para la comunicación y monitoreo del prototipo a emplear.

2.3.4 HARDWARE ADICIONAL

- Raspberry Pi 4**

Este microordenador será el encargado del procesamiento para el prototipo. La Raspberry Pi 4 que se muestra en la Figura 2.3 ejecutará una serie de scripts dentro de un entorno de Linux y Python, los cuales serán los encargados de procesar datos y coordinar la comunicación entre los dispositivos LoRa.



Figura 2.3 - Raspberry Pi 4 (Raspberry Pi, 2024)

- **Baterías de Litio**

El uso de baterías de litio ofrece una fuente de energía recargable y duradera. En el prototipo, estas baterías permiten mantener operativos los módulos LoRa, asegurando autonomía durante períodos prolongados. Cada módulo será alimentado por una batería de 3.7 V, tal como se observa en la Figura 2.4, dado que el microcontrolador, al trabajar con LoRa, su consumo energético es bajo, lo que permite al sistema estar activo por un tiempo prolongado.



Figura 2.4 - Batería de Litio 3.7 V (IMPORMEL, 2024)

- **Panel Solar**

El uso de paneles solares proporciona una fuente de energía renovable y continua para cargar las baterías de litio, permitiendo que la autonomía del sistema sea prolongada. Su integración en el prototipo permite mantener el funcionamiento del sistema sin depender exclusivamente de fuentes de energía tradicionales sobre todo en entornos rurales y

remotos. Para este caso se emplearán paneles solares de 5V, el cual puede ser apreciado en la Figura 2.5:



Figura 2.5 - Panel Solar 5V (MECHATRONIC, 2024)

CAPITULO 3

3 METODOLOGIA

En el presente capítulo se detalla la metodología empleada para el desarrollo del prototipo de comunicación mediante tecnología LoRa Mesh, orientado al monitoreo de recursos en áreas rurales.

3.1 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

El diagrama de bloques representa de forma general la arquitectura de un sistema de comunicación basado en tecnología LoRa Mesh con N nodos tal como se observa en la Figura 3.1, diseñado para el monitoreo y control eficiente de recursos en áreas remotas. Este sistema consta de tres componentes principales: el sistema de monitoreo, el GW y la red Mesh.

La red Mesh está formada por un conjunto de N nodos interconectados de manera descentralizada, lo que asegura una comunicación robusta. Cada nodo puede comunicarse con otros dentro de su rango, formando una estructura que permite la transmisión eficiente de datos a través de la red. Este diseño asegura que el sistema pueda operar incluso en entornos con limitaciones de infraestructura de telecomunicaciones, optimizando la cobertura y la resiliencia de la comunicación. Como intermediario entre la interfaz de usuario y los datos sensados se encuentra el GW que opera sobre Raspberry Pi 4 la cual tiene como función de controlador principal, gestionando el flujo de datos entre el microprocesador y el sistema de monitoreo.

El sistema de monitoreo se apoya en una base de datos InfluxDB, optimizada para series temporales, que permite gestionar grandes volúmenes de información. La transmisión de datos se realiza mediante un broker MQTT, que actúa como

intermediario entre el GW y el sistema de monitoreo. Finalmente, los datos se presentan en Grafana, que ofrece visualizaciones interactivas para facilitar la interpretación de la información.

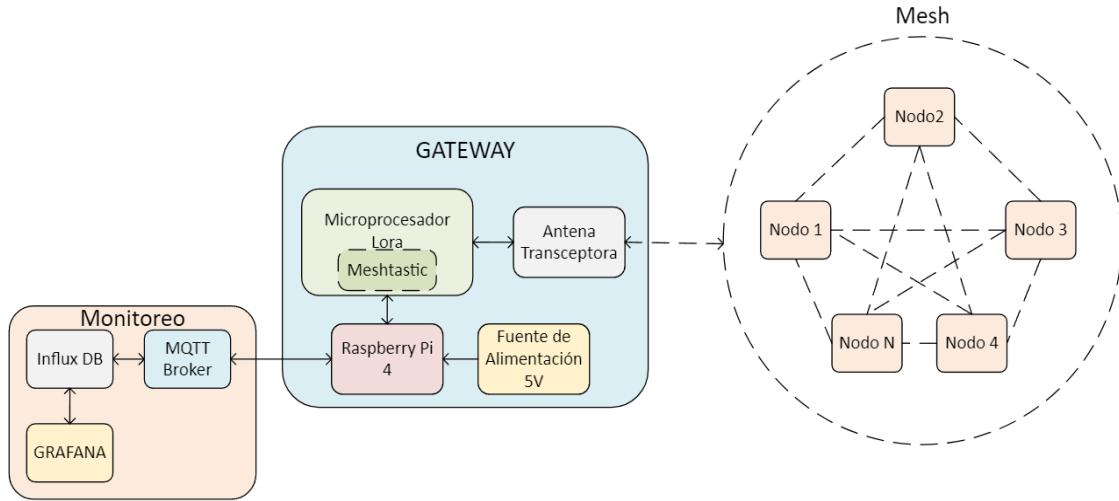


Figura 3.1 - Diagrama de bloques general

Para el desarrollo del proyecto se detalla un diagrama de bloques en el cual se muestra el diseño del prototipo de la Figura 3.2, compuesto por un GW y dos nodos conectados mediante una red LoRa Mesh. El GW gestiona la comunicación con el sistema de monitoreo, mientras que los nodos, alimentados por sistemas energéticos con paneles solares, establecen la red Mesh. Uno de los nodos está en una ubicación con obstrucción y sin línea de vista directa con el GW, y el segundo nodo actuará como intermediario, asegurando la transmisión de datos y demostrando la capacidad del sistema para superar barreras físicas en la comunicación.

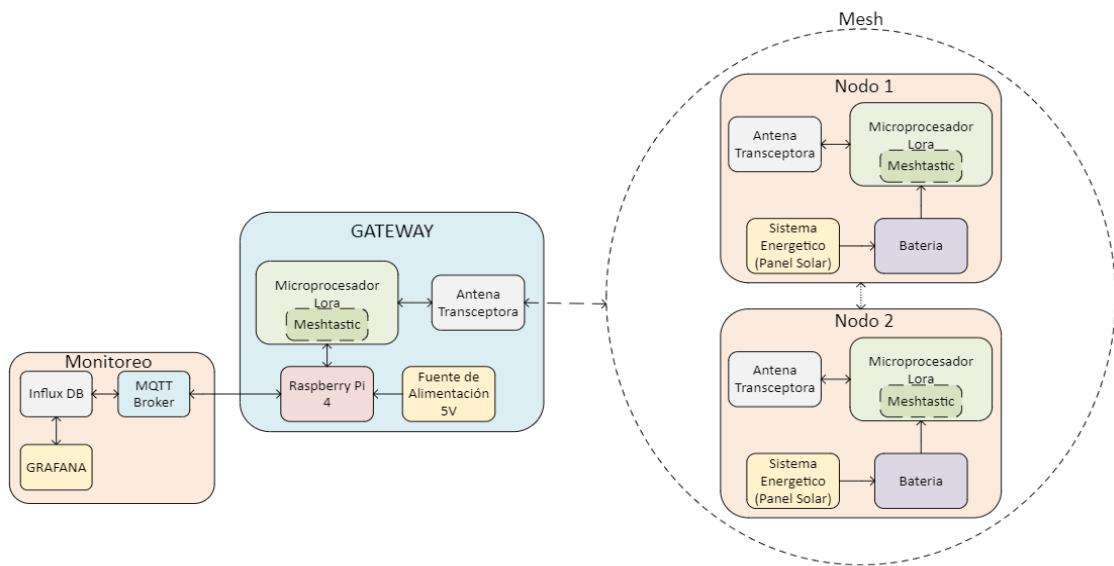


Figura 3.2 - Diagrama de bloques del prototipo

En esta sección se detalla de manera esquemática como están conformado el prototipo del proyecto. En la Figura 3.3 se detalla el prototipo del sistema de comunicación basado en LoRa, el cual incluye un GW y dos nodos diseñados para operar en una red inalámbrica a 915 MHz. El GW está compuesto por un módulo LoRa ESP32 conectado a una Raspberry Pi 4, que realiza el procesamiento de datos y la comunicación serial.

Por otro lado, los nodos 1 y 2 están equipados con módulos LoRa ESP32 que se detalló en la Tabla 2.2 del capítulo anterior, alimentados por baterías recargables a través de paneles solares. Cada nodo tiene un módulo de carga para gestionar la energía y un actuador (buzzer) como dispositivo de salida. La comunicación inalámbrica permite que el Nodo 2, sin línea de vista con el GW, transmita datos a través del Nodo 1, actuando este último como intermediario para mantener la conectividad.

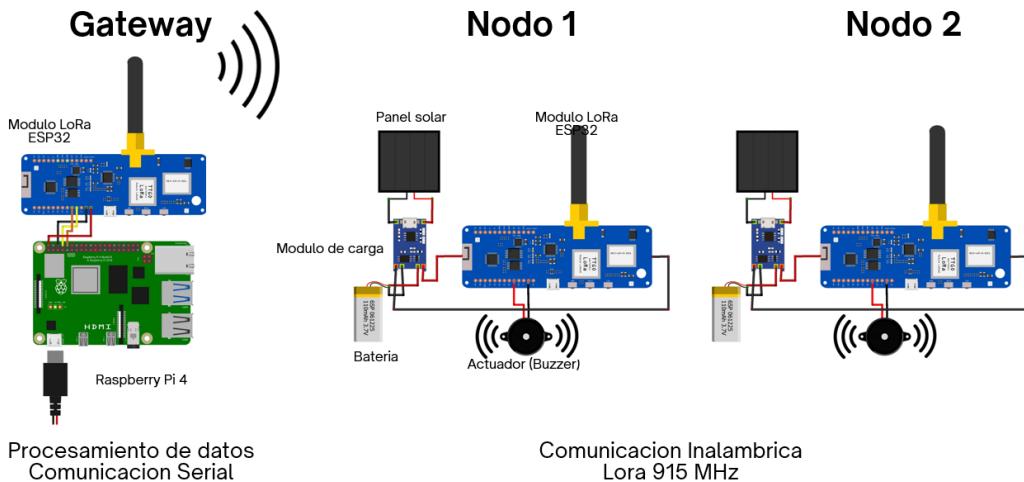


Figura 3.3 - Diseño esquemático del prototipo

3.2 MODELOS EMPÍRICOS DE PÉRDIDA DE TRAYECTORIA DE PROPAGACIÓN

Un modelo de pérdida de trayectoria constituye una expresión matemática que explica la atenuación de la señal al propagarse entre un transmisor y un receptor en un sistema inalámbrico. Estos modelos de pérdida de trayectoria de propagación se elaboran a partir de una combinación de métodos numéricos y aproximaciones empíricas basadas en datos obtenidos mediante experimentos de sondeo, basados en distancia, frecuencia, características del entorno, entre otros. (Rouphael, 2009)

La pérdida por propagación se entiende como la relación entre la potencia transmitida y la recibida, la cual suele expresarse en decibelios. Para el presente proyecto de titulación, se empleará la ecuación en base al análisis de regresión de los mínimos cuadrados, cuya expresión viene dada por la ecuación 3.1:

$$L_p(d) = L_o(d_o) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) \quad (3.1)$$

En donde L_o es la pérdida a 1 m de distancia ($d_o = 1m$) entre el nodo y el transmisor, y n es el exponente de pérdida de propagación. (Arguello Andrade , Ramos, & Del Rosario, 2021).

3.2.1 MODELOS EMPÍRICOS

El resultado del modelo gradiente que se obtenga en el presente trabajo, serán comparado con otro modelo empírico, el cual será el modelo de COST-231 Hana. Adicional, se tomó como referencia al modelo de pérdida en espacio libre (FSL).

- **Modelo de Pérdida en espacio libre (FSL)**

La ecuación del modelo de pérdida en espacio libre se calcula a partir de la ecuación 3.2:

$$L_{FSL} = 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) + 32.45 \quad (3.2)$$

En donde d es la distancia en km, f es la frecuencia en MHz y las unidades de L_{FSL} vienen dados de decibelios [dB].

- **Modelo COST-231 Hata (Modelo Extendido de Hata)**

Este modelo es una versión basada en el modelo de Okumura – Hata, pero en la cual se incluye un factor de corrección, llegando a operar desde 500 MHz hasta 2 GHz, y su factor de corrección depende del tipo de ambiente, abarcando ambientes urbanos, sub-urbanos y rurales. El modelo viene definido por la ecuación 3.3:

$$L_{COST} = 46.3 + 33.9\log_{10}(f) - 13.82\log_{10}(h_b) - ah_r + (44.9 - 6.55\log_{10}(h_b))\log_{10}(d) + cm \quad (3.3)$$

Donde f es la frecuencia medida en MHz, d es la distancia en Km y h_b es la altura de la antena estática medida en metros. Dado que se está trabajando con ambiente sub-urbano y abiertos, el valor de cm es igual a 0 dB. El parámetro h_r viene representado por varias ecuaciones, dependiendo del tipo de ambiente. Para ambientes urbanos viene representado por la ecuación 3.4:

$$ah_r = 3.20 \left(\log_{10}(11.75) \right)^2 - 4.97; f > 400 \text{ MHz} \quad (3.4)$$

Para ambientes abiertos o sub-urbanos, viene representada por la ecuación 3.5:

$$ah_r = (1.1\log_{10}(f) - 0.7)h_m - (1.56\log_{10}(f) - 0.8) \quad (3.5)$$

Donde h_m es la altura de la antena del nodo móvil. (Perez Nelson, Herrera, Uzcátegui, & Bernardo Peña, 2012)

CAPITULO 4

4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos durante las pruebas del prototipo, evaluando su desempeño y estabilidad en términos de cobertura, calidad de señal y latencia. Se analizan los datos recopilados para validar los objetivos planteados y se destacan tanto las fortalezas como las áreas de mejora, haciendo una comparativa con tecnología tradicional. Por último, se modela la pérdida de propagación mediante mediciones de RSSI efectuadas en el Campus de ESPOL- La Prosperina en un escenario cubierto de vegetación y un escenario suburbano para predecir la media de pérdida por trayectoria en función de alturas, distancias y frecuencia. Los resultados obtenidos se evalúan en contraste con un modelo empírico reportado en literatura científica y teórica, a fin de validar su consistencia.

4.1 ESCENARIO Y DISPOSITIVOS

Para el desarrollo de este prototipo, se llevaron a cabo pruebas de conexión y mediciones de potencia en el campus Prosperina de la ESPOL en un escenario suburbano. Este entorno se caracteriza por la presencia de vegetación, densidad de edificaciones moderada y estructuras dispersas, tal como se observa en la Figura 4.1, lo que genera una notable ausencia de línea de vista, pérdida de la potencia recibida entre los dispositivos de la red colocados a 40 cm sobre nivel del suelo.



Figura 4.1 - Escenario de pruebas

Una vez descrito el escenario, para fines prácticos demostrativos, las pruebas iniciales se realizaron utilizando una red de tres dispositivos inalámbricos principales: un GW, encargado de centralizar la comunicación, y dos dispositivos autónomos, identificados como Nodo A y Nodo B, que interactúan entre sí y con el GW para evaluar la eficacia y alcance de la red propuesta en estas condiciones desafiantes. Cabe recalcar que los tres dispositivos utilizan una antena omnidireccional de baja ganancia, con el propósito de simular un escenario controlado para forzar la inestabilidad y bajo alcance de la comunicación previo a implementar el prototipo de red.

El Nodo A se lo coloca en una posición fija relativamente cercana al GW con el propósito de garantizar la comunicación con éste. Una vez que se implemente el prototipo LoRa MESH, este nodo se transforma en un Nodo Intermediario, el cual permite la comunicación multisalto para que llegue al Nodo B. Al Nodo B se lo consideró como el nodo más lejano al GW y se moverá en el escenario para ir evaluando la estabilidad y alcance de la comunicación según la posición.

Se desarrolló un Dashboard en la nube para monitorear en tiempo real la estabilidad de la comunicación de los dos nodos. Esta información es recopilada en el GW y subida a la nube a través de una Raspberry Pi. Adicional se utilizó la app Meshtastic en smartphones como interfaz gráfica de usuario para cada

dispositivo de red con la finalidad de analizar parámetros como RSSI, coordenadas y envío de data.

4.2 COBERTURA Y ALCANCE

Como referencia se configuró inicialmente la red con la tecnología de LoRa convencional, es decir cada nodo se comunica con el GW independientemente. Luego se realizó una validación inicial del alcance directo entre el GW y el Nodo B. El objetivo de esta prueba fue identificar el punto exacto donde se pierde la conexión entre ambos dispositivos. En la Figura 4.2 se muestra la ubicación donde el GW y el Nodo B dejaron de comunicarse, cuyas coordenadas se detallan en la Tabla 4.1.

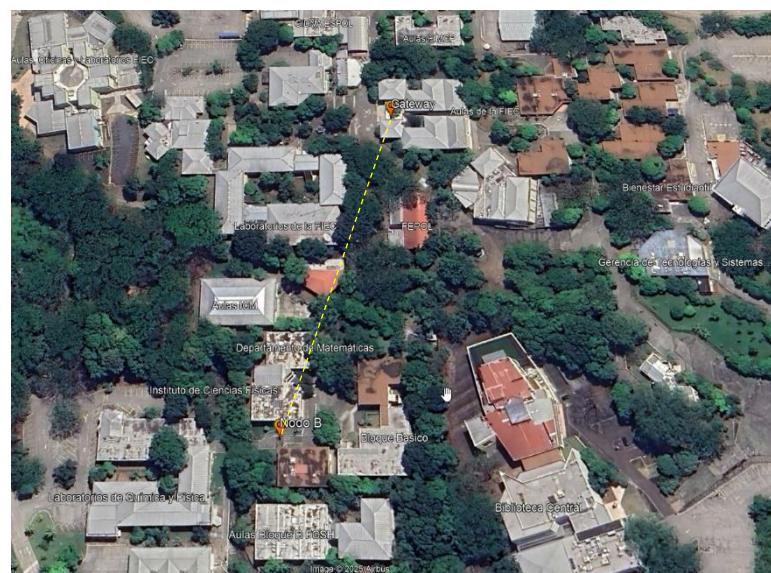


Figura 4.2 - Posición inicial GW y Nodo B

Tabla 4.1 - Localización de GW y nodo B

	Latitud	Longitud
GW	-2.145403°	-79.966186°
Nodo B	-2.146740°	-79.967182°

Por lo tanto, se procedió a alejar el Nodo B del GW hasta identificar el punto en el que se pierde la conexión. Este evento fue monitoreado en tiempo real a través de un Dashboard de Grafana, como se muestra en la Figura 4.3. En el Dashboard, la conexión activa se representa con un indicador de color verde, mientras que la

pérdida de comunicación se visualiza mediante un indicador de color rojo, facilitando así la interpretación de los resultados.

La distancia máxima alcanzada entre estos dos dispositivos fue de 187 metros. Cabe recalcar que, entre esta separación de ambos equipos, existe obstrucciones tales como vegetación, edificaciones, desniveles, nula línea de vista y adicional que se emplea antenas de baja ganancia.

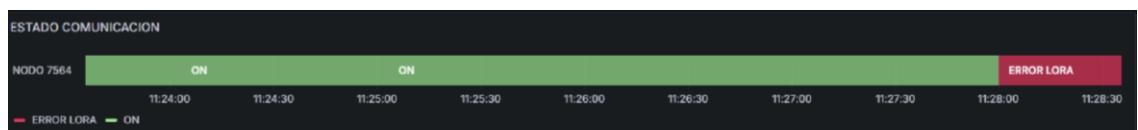


Figura 4.3 - Estado de la comunicación LoRa Convencional

Utilizando el aplicativo Meshtastic, se monitoreó en tiempo real la comunicación LoRa enviada desde el GW hacia el Nodo B, identificado con el ID 7564. En la Figura 4.4 se muestra la ubicación GPS registrada por el módulo ESP32 LilyGo T-Beam (Node B) durante la prueba inicial, de esta forma se determinó el valor referencial usando la Tecnología LoRa convencional.

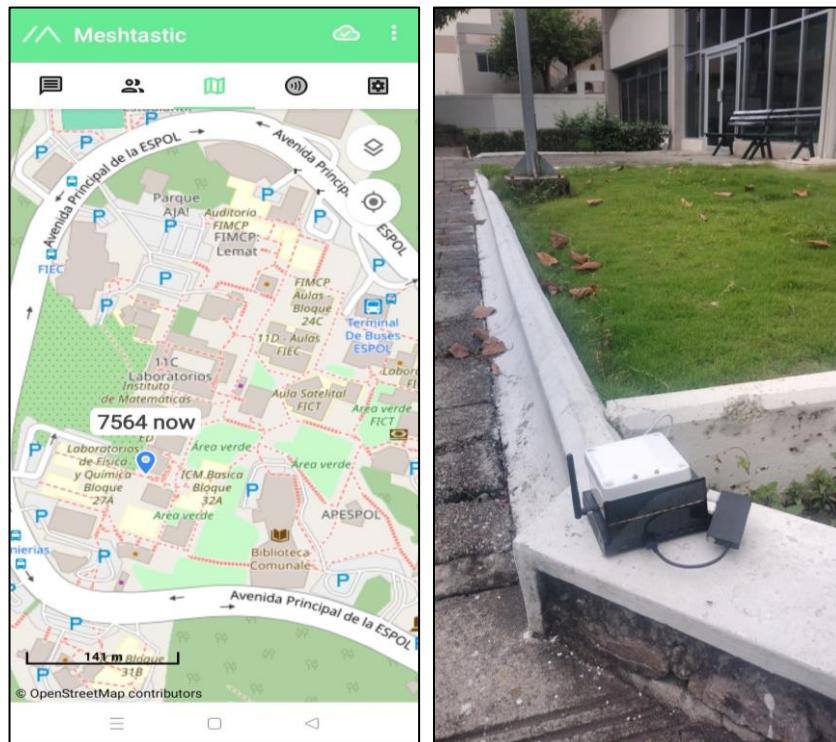


Figura 4.4 - Posición inicial GPS del Nodo B empleando la app Meshtastic

Una vez identificado el punto donde se pierde la comunicación entre el Nodo B y el GW, se procedió a configurar la red LoRa en una configuración malla, por lo tanto, el Nodo A se convirtió en un nodo intermediario. Este nodo desempeñó el papel de mediador, permitiendo restablecer la comunicación entre el Nodo B y el GW al actuar como un enlace entre ambos dispositivos. La ubicación de los dispositivos de la red LoRa, se ve detallada en la Figura 4.5, observando el GW y los nodos A y B, cuyas coordenadas se encuentran detalladas en la Tabla 4.2:

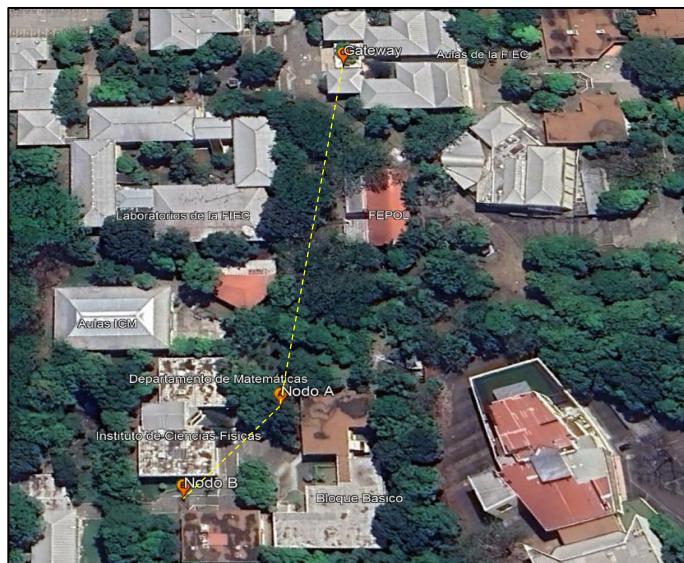


Figura 4.5 - Posición Inicial GW y Nodo B

Tabla 4.2 - Localización de GW y nodos A y B

	Latitud	Longitud
GW	-2.145403°	-79.966186°
Nodo A	-2.146545°	-79.966816°
Nodo B	-2.146740°	-79.967182°

Como resultado al activar el nodo intermediario (Nodo A), se logró establecer la conexión entre el GW y el Nodo B, permitiendo la transferencia de datos de manera eficiente a través de los nodos. En la Figura 4.6 se puede observar como la comunicación se reestableció al momento de activar el nodo A.

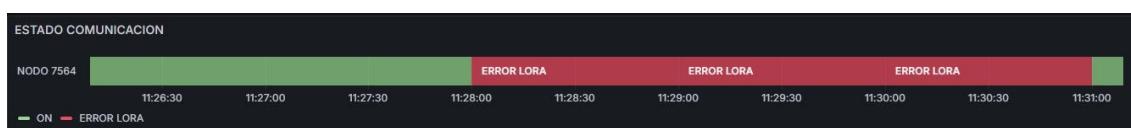


Figura 4.6 - Estado de la comunicación LoRa empleando Nodo A como Intermediario

Una vez que se ha determinado el funcionamiento del nodo A como intermediario, y que efectivamente se logró restablecer la transmisión de data entre en el GW y nodo B, se procedió a realizar una nueva prueba de alcance con el nodo B, por lo que se procedió a alejar mucho más el nodo B, esta vez con respecto al nodo A. Se obtuvo un mayor alcance traspasando varias edificaciones de varias facultades, tal como se observa en la Figura 4.7, con un alcance de 238 m entre el nodo B y el nodo A, cuyas posiciones se encuentran detalladas en la Tabla 4.3.

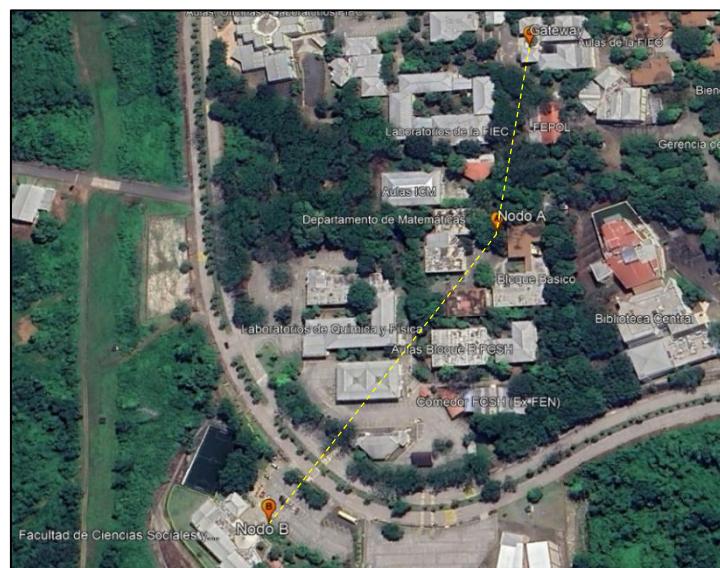


Figura 4.7 - Nueva posición del Nodo B

Tabla 4.3 - Localización de GW y nodos A y B

	Latitud	Longitud
GW	-2.145403°	-79.966186°
Nodo A	-2.146545°	-79.966816°
Nodo B	-2.147753°	-79.968589°

En la Figura 4.8 se muestra la nueva posición del Nodo B usando la app Meshtastic. En este escenario, el Nodo A actúa como un intermediario asegurando una comunicación estable y confiable entre ambos dispositivos.

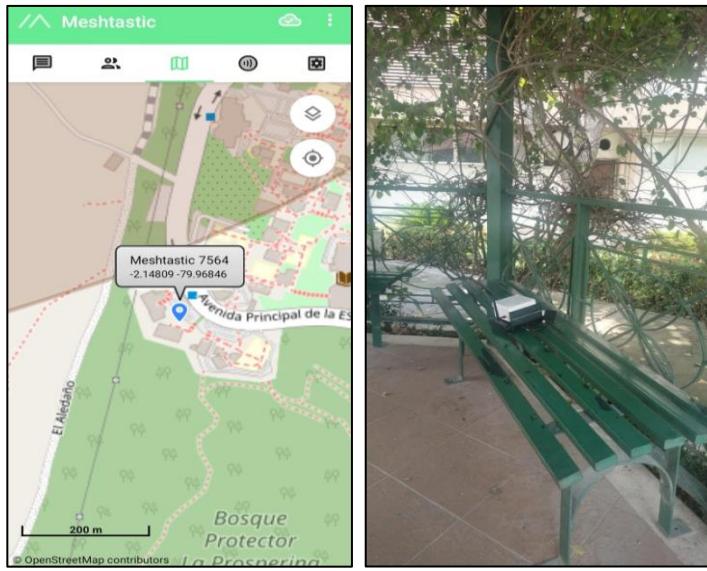


Figura 4.8 - Nueva posición GPS del nodo B empleando la app Meshtastic

Mientras se desplazaba el Nodo B desde su posición inicial hasta su nueva posición, la comunicación se mantuvo en todo momento, sin interrupciones tal como se muestra en la Figura 4.9. Esto evidencia que el sistema es capaz de extender su alcance de manera efectiva, demostrando su robustez y capacidad para operar en distancias mayores.

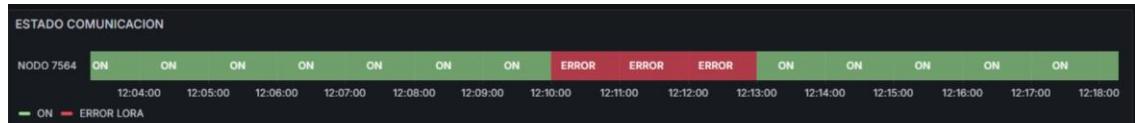


Figura 4.9 - Estado de comunicación LoRa del nodo B empleando nodo A como Intermediario

4.3 FIABILIDAD DE LA CONEXIÓN

En esta sección se presentan resultados de las pruebas de latencia realizadas en el sistema. La latencia es un parámetro fundamental en los sistemas de comunicación, ya que determina el tiempo necesario para que un mensaje viaje desde su punto de origen hasta su destino y se reciba una respuesta. Para esta prueba se realizó envíos de ping desde el GW hacia el nodo B, con la finalidad de calcular el tiempo en que el sistema demora en responder. El tiempo calculado es llevado a un Dashboard de Grafana, el cual se puede observar en la Figura 4.10:



Figura 4.10 - Latencia del sistema – GW a Nodo B

La latencia promedio registrada en la Figura 4.10 es de 3.14 ms, como lo indica el medidor, lo cual representa un buen desempeño en términos de tiempo de respuesta, adecuado para sistemas LoRa donde se requiere minimizar la latencia para garantizar una comunicación eficiente.

El análisis de la latencia correspondiente al Nodo B muestra un comportamiento mayormente estable, con un valor promedio de 3.14 ms. La mayor parte del tiempo, los valores de latencia se mantienen dentro del rango de 3 ms a 3.5 ms, lo que indica una comunicación eficiente y consistente. Sin embargo, se observan eventos puntuales en donde la latencia disminuye, llegando a valores cercanos a 1 ms, esto podría deberse a condiciones del entorno. A pesar de estas fluctuaciones, la estabilidad general del enlace es adecuada para aplicaciones que requieren baja latencia y alta disponibilidad.

4.4 COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS

Como producto de los análisis de resultados del presente proyecto, se ha resumido en una tabla comparativa para evaluar el desempeño de una tecnología sobre la otra tal como se muestra en la Tabla 4.4. Y finalmente resaltar la ventajas y desafíos en la sección de discusión.

Tabla 4.4 - Evaluación Técnica y Comparativa de Redes LoRa

Característica	LoRa Convencional (Punto a Punto)	LoRa Mesh
Alcance máximo	Limitado por obstrucciones, antenas de baja ganancia	Extendido gracias a saltos intermedios

Resiliencia	Baja, pérdida directa de enlace genera falla	Alta, puede redirigir la comunicación a través de otros nodos
Tolerancia a fallos	Nula, si un nodo clave falla, la red se rompe	Alta, la red se reorganiza usando otros caminos
Latencia promedio desde el Gw al punto más lejano	N/A al perder conexión	3.14 ms, adecuada para aplicaciones de monitoreo a una distancia de 46.79 m.
Calidad de señal (RSSI)	Atenuada rápidamente por obstáculos	Mejor conservada gracias al uso de saltos intermedios
Escalabilidad	Limitada, cada nodo depende del gateway	Alta, se pueden agregar nodos para expandir la red
Adaptabilidad al entorno	Baja, sensible a cambios del entorno	Alta, puede adaptarse a cambios físicos y dinámicos en el entorno
Complejidad de configuración	Baja, fácil de implementar	Moderada/alta
Complejidad de implementación	Baja, plug-and-play básico	Alta, demanda conocimientos en topología mesh y configuraciones
Costo de despliegue	Alto costo en infraestructura para cubrir toda la zona deseada	Moderadamente mayor, pero más eficiente al cubrir grandes áreas
Curva de aprendizaje	Baja, fácil de entender y operar	Moderada/alta, requiere aprendizaje sobre redes mesh y su dinámica
Compatibilidad entre fabricantes	Alta, estandarizado entre módulos LoRa compatibles	Puede ser limitada, no todos los fabricantes soportan implementaciones mesh iguales
Flexibilidad de despliegue	Baja, necesita posicionamiento optimizado para línea directa	Alta, permite colocar nodos estratégicos para sortear obstáculos
Aplicación recomendada	Enlaces simples, distancias cortas, monitoreo básico	Redes distribuidas, monitoreo en tiempo real, ambientes extensos y con obstáculos

4.5 EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SEÑAL RSSI EN LA RED LORA

En esta sección se analiza el nivel de señal recibido, representado por el indicador RSSI para evaluar la calidad y el alcance de la red LoRa. El RSSI permite determinar la intensidad con la que una señal llega al receptor, lo que ayuda a identificar posibles pérdidas de señal, interferencias o limitaciones en la cobertura. Se realizó un despliegue de red LoRa basada en dos equipos (Gateway y nodo), cuya distribución se detalla en la Figura 4.11 y tomando como referencia el trabajo “Comparación de Modelos Empíricos de pérdida LPWAN por Propagación en el campus Prosperina de la ESPOL: Resultados derivados de un estudio empírico” (Arguello Andrade , Ramos, & Del Rosario, 2021)

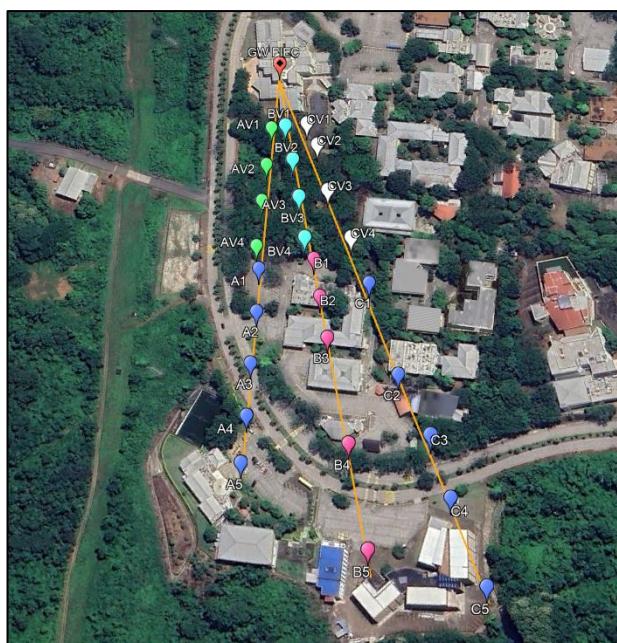


Figura 4.11 - Distribución de nodos en campus Prosperina

El gateway fue colocado de forma estática en la parte alta de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC), cuya ubicación geográfica viene referencia con $2^{\circ} 8'41.2''S$ de latitud y $79^{\circ}58'3.8''O$ de longitud, colocado a una altura de 20 m con respecto al suelo.

El otro nodo fue empleado de forma móvil, desplazándose a través de los puntos establecidos en la Figura 4.11, estando dentro del área de cobertura del GW, tomando data en ambientes cubiertos por vegetación densa, por edificaciones y

en espacios abiertos. La elevación en la que se obtuvo los datos con el nodo fue de 0.5 m sobre el nivel del suelo.

Para cada punto trazado, se empleó herramientas como “Google Earth”, “Map Marker” para establecer la correcta ubicación del nodo para la toma de datos. Las mediciones se realizaron dentro de la frecuencia de 915 MHz, en el cual el GW transmitía a una frecuencia central de 906.875 MHz con un ancho de banda de 10 KHz. Para las ganancias de los equipos, el GW cuenta con una antena de ganancia de 5dBi y para el nodo móvil cuenta con una ganancia de 2dBi. Para este análisis, se tomaron 27 puntos de mediciones, en la cual se consideran 9 por cada rayo, en la cual se agrupan en zona con vegetación (circulo verde) y sin vegetación, como se muestra en la Figura 4.12:

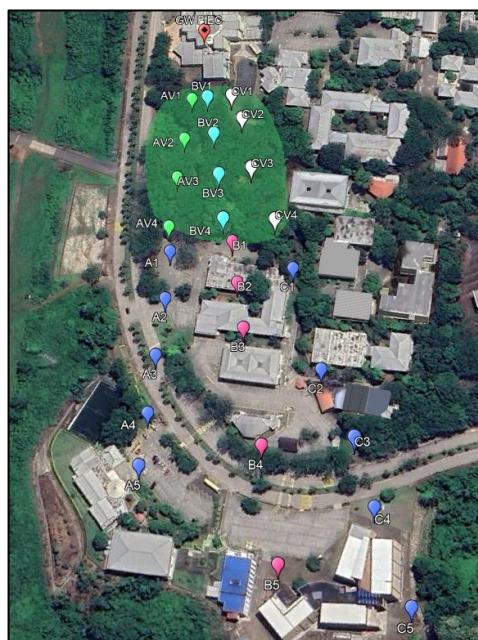


Figura 4.12 - Distribución de puntos con y sin vegetación

La recolección de datos de RSSI se realizó utilizando el módulo ESP32 LilyGo T-Beam, el cual, en conjunto con la aplicación móvil Meshtastic, permitió visualizar y registrar los valores obtenidos, tal como se observa en la Figura 4.13:

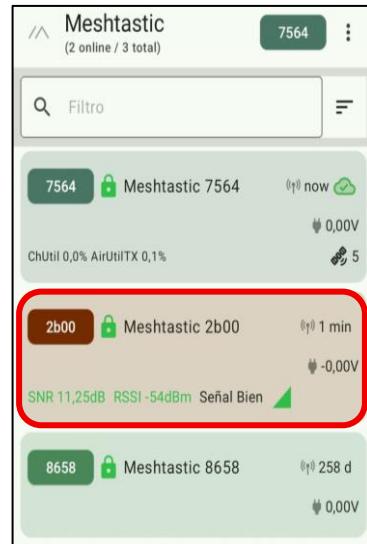


Figura 4.13 - Visualización de RSSI a través del aplicativo móvil

Finalizada la toma de data en cada uno de los puntos, lo que se obtiene como resultado del muestreo es un archivo .db el cual alberga la información, como el tramo empleado, el nombre del equipo, RSSI, frecuencia, entre otros, tal como se muestra en la Figura 4.14:

Unnamed: 0	publishedAt	ubicado	modelo_disp	dispositivo	gtw_rx	rssi_down	snr	bateria_V	frequency	bandwidth
Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter
1	2025-08-18 11:12:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	7	3.48	906875000	10000
2	2025-08-18 11:17:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	7	3.48	906875000	10000
3	2025-08-18 11:22:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-71	7	3.48	906875000	10000
4	2025-08-18 11:27:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
5	2025-08-18 11:32:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	7	3.48	906875000	10000
6	2025-08-18 11:37:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	7	3.48	906875000	10000
7	2025-08-18 11:42:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	7	3.48	906875000	10000
8	2025-08-18 11:47:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
9	2025-08-18 11:52:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
10	2025-08-18 11:57:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	6	3.48	906875000	10000
11	2025-08-18 12:02:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	6	3.48	906875000	10000
12	2025-08-18 12:07:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	6	3.48	906875000	10000
13	2025-08-18 12:12:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	7	3.48	906875000	10000
14	2025-08-18 12:17:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-71	6	3.48	906875000	10000
15	2025-08-18 12:22:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	7	3.48	906875000	10000
16	2025-08-18 12:27:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
17	2025-08-18 12:32:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
18	2025-08-18 12:37:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-71	6	3.48	906875000	10000
19	2025-08-18 12:42:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
20	2025-08-18 12:47:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
21	2025-08-18 12:52:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	6	3.48	906875000	10000
22	2025-08-18 12:57:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	7	3.48	906875000	10000
23	2025-08-18 13:02:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
24	2025-08-18 13:07:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
25	2025-08-18 13:12:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-71	6	3.48	906875000	10000
26	2025-08-18 13:17:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	7	3.48	906875000	10000
27	2025-08-18 13:22:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
28	2025-08-18 13:27:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	6	3.48	906875000	10000
29	2025-08-18 13:32:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	6	3.48	906875000	10000
30	2025-08-18 13:37:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	7	3.48	906875000	10000
31	2025-08-18 13:42:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-71	6	3.48	906875000	10000

Figura 4.14 - Archivo data base visualizado empleado DB BROWSER

Empleando el software DB Browser, se procede a exportar la data a un formato .csv, el cual facilita su extracción de datos en los scripts de Python, tal como se observa en la Figura 4.15:

A	publishedAt	ubicado	modelo_disp	dispositivo	gtw_rx	rssi_down	snr	bateria_V	frequency	bandwidth
1	2025-08-18 11:12:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	7	3.48	906875000	10000
2	2025-08-18 11:17:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	7	3.48	906875000	10000
3	2025-08-18 11:22:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-71	7	3.48	906875000	10000
4	2025-08-18 11:27:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
5	2025-08-18 11:32:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	7	3.48	906875000	10000
6	2025-08-18 11:37:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	7	3.48	906875000	10000
7	2025-08-18 11:42:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	7	3.48	906875000	10000
8	2025-08-18 11:47:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
9	2025-08-18 11:52:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	6	3.48	906875000	10000
10	2025-08-18 11:57:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	6	3.48	906875000	10000
11	2025-08-18 12:02:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	6	3.48	906875000	10000
12	2025-08-18 12:07:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	6	3.48	906875000	10000
13	2025-08-18 12:12:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-72	7	3.48	906875000	10000
14	2025-08-18 12:17:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-71	6	3.48	906875000	10000
15	2025-08-18 12:22:43	RAYO_C	ESPTBEAM	CV1	Gw	-70	7	3.48	906875000	10000

Figura 4.15 - Archivo csv con data de cada nodo

Con los archivos en formato CSV que se han generado, pasan a ser procesados posteriormente con un algoritmo en Python, que permitirá realizar el análisis y tratamiento de la información para obtener resultados como promedios de RSSI, cálculo de pérdidas y otros parámetros relevantes.

Como primer extracto de información, se procedió a obtener valores promedios de cada punto, detallados en la Tabla 4.5, en donde se alberga el RSSI Promedio y las distancias desde el GW hasta cada punto:

Tabla 4.5 - Resumen de distancias y RSSI Promedio

DATA DESDE EL GW HASTA EL NODO				
	DATA	RAYO A	RAYO B	RAYO C
V1	Distancia [m]	60.24	59.96	61.51
	RSSI AV [dBm]	-80.67	-76.41	-71.73
V2	Distancia [m]	94.26	92.56	84.53
	RSSI AV [dBm]	-96.5	-84.23	-63.73
V3	Distancia [m]	128.95	126.92	125.33
	RSSI AV [dBm]	-101.48	-92.37	-82.44
V4	Distancia [m]	168.5	162.37	171.23
	RSSI AV [dBm]	-89.9	-101.01	-92.14
Nodo 1	Distancia [m]	187.87	181.10	211.77
	RSSI AV [dBm]	-93.33	-104.94	-94.63
Nodo 2	Distancia [m]	223.34	213.52	288.64
	RSSI AV [dBm]	-95.64	-105.7	-95.88
Nodo 3	Distancia [m]	265.9	247.14	344.48
	RSSI AV [dBm]	-99.89	-109.5	-101.6
Nodo 4	Distancia [m]	308.83	332.43	392.31
	RSSI AV [dBm]	-103.61	-116.22	-104.79
Nodo 5	Distancia [m]	344.78	413.07	459.98
	RSSI AV [dBm]	-108.18	-121.5	-106.15

La Tabla 4.5 evidencia que, a mayor distancia entre el Gateway y los nodos, el nivel de potencia recibida (RSSI) disminuye progresivamente, lo que confirma el comportamiento esperado en la propagación inalámbrica. Se observa que el Rayo C presenta valores de RSSI relativamente mejores en la mayoría de las mediciones, mientras que el Rayo A alcanza los niveles más atenuados en distancias largas.

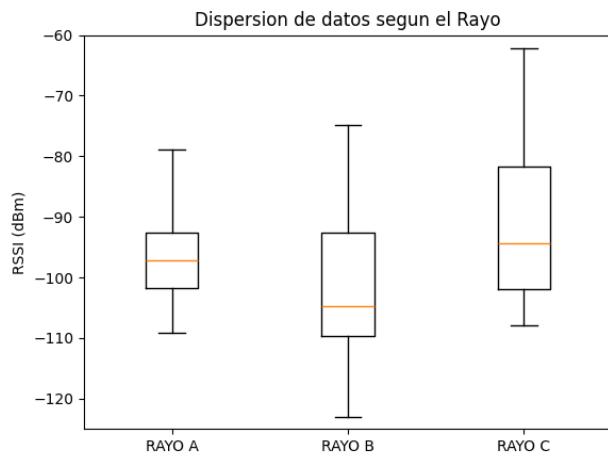


Figura 4.16 - Diagrama de caja del RSSI

En la Figura 4.16 se observa el diagrama de caja, con la dispersión del RSSI en los tres rayos evaluados, donde se observa que el Rayo C presenta los mejores niveles de señal con una mediana cercana a -90 dBm y valores máximos por encima de -70 dBm, lo que evidencia condiciones favorables de propagación. El Rayo A mantiene una mediana alrededor de -95 dBm con menor dispersión, indicando estabilidad, aunque con señal más atenuada, mientras que el Rayo B registra la peor mediana cercana a -105 dBm y la mayor variabilidad, con valores que alcanzan hasta -120 dBm, lo que refleja enlaces débiles y menos confiables en este trayecto. Con la data del RSSI, la gráfica de regresión lineal es representada en la Figura 4.17 en escala logarítmica:

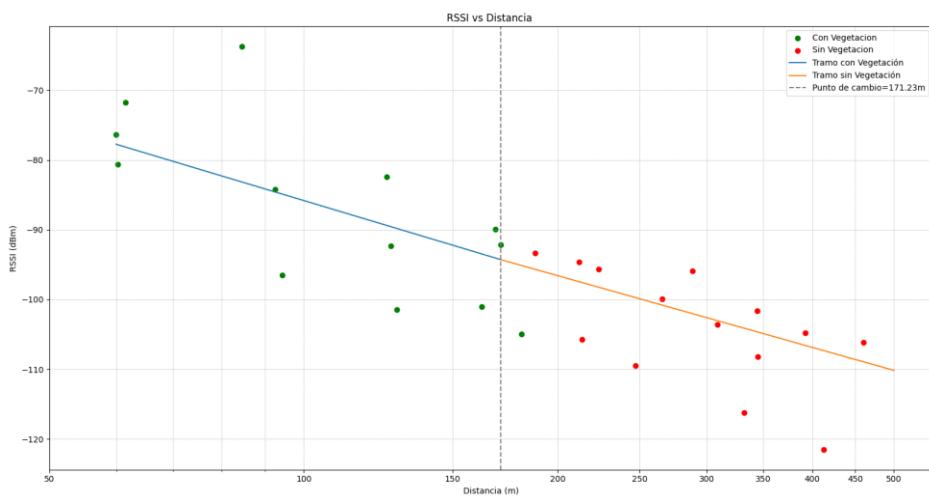


Figura 4.17 - Regresión lineal de las mediciones del RSSI

En la Figura 4.17 se observa cada punto medido dentro del campus ESPOL, en donde se observan dos tramos, el cual hace referencia a los dos tipos de ambientes: con vegetación y sin vegetación, por lo que como resultado se

obtendrá un modelo de pendientes múltiples. Basados en estos resultados medidos, el valor de pendiente o gradiente para una zona con vegetación viene dada por $\alpha_1 = 4.60$ y para una zona sin vegetación se tiene un gradiente de $\alpha_2 = 3.74$.

Teniendo estos datos, la expresión de pérdida de propagación viene representada en la siguiente ecuación 4.1:

$$L_p(d) = L_o + \begin{cases} 10\alpha_1 \log_{10}(d); & d < d_{lim} \\ 10\alpha_2 \log_{10}(d); & d > d_{lim} \end{cases} \quad (4.1)$$

Donde d_{lim} es la distancia en metros, donde se pasa de un ambiente a otro, cuyo valor de es $d_{lim} = 171.23\text{ m}$.

En la Figura 4.18 se observa gráficamente el modelo de múltiples gradientes, comparado con el modelo de Cost-231 Hata y el modelo de FSP:

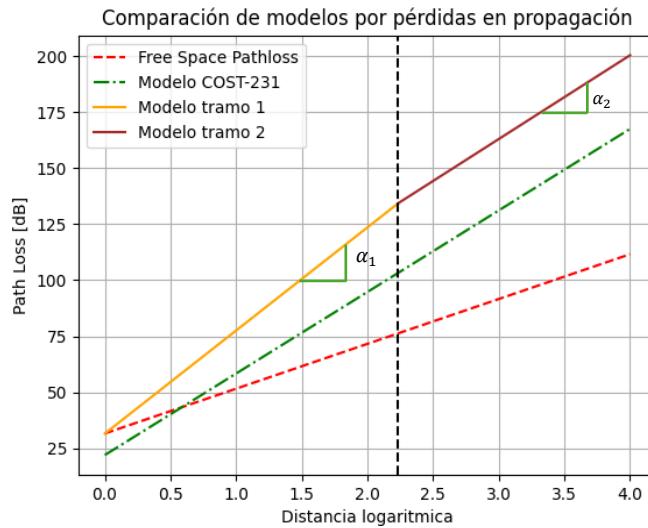


Figura 4.18 - Comparación de los modelos de pérdidas de propagación

El modelo de espacio libre (FSP) representa un escenario ideal, en el que la atenuación se incrementa de manera logarítmica con la distancia y sin considerar obstáculos. Por otra parte, el modelo COST-231 incorpora condiciones típicas de entornos abiertos y/o suburbanos, por lo que predice mayores pérdidas que el espacio libre, manteniendo una pendiente de crecimiento intermedia y constante. En contraste, los modelos por tramos muestran un comportamiento empírico más cercano a las mediciones reales. Durante el primer tramo, la pendiente (α_1) es bastante pronunciada, lo que indica que la señal experimenta un debilitamiento

rápido a distancias cortas, esto debido a la presencia de obstrucciones que, para el caso, es producto de la densa vegetación donde se realizaron las mediciones.

A partir del punto de cambio, marcado por la línea vertical, el segundo tramo presenta una pendiente menor (α_2), lo que refleja un comportamiento de propagación más estable y cercano al modelo COST-231. Esto evidencia que la pérdida de señal no sigue un único exponente de atenuación en todo el rango de distancias, sino que depende de la zona de propagación y de las condiciones específicas que afectan el enlace.

4.6 DISCUSIÓN

Luego de realizar las pruebas en campo, se verificaron de forma práctica ciertas características de las tecnologías LoRa punto a punto y LoRa Mesh. En primer lugar, se constató que la distancia máxima alcanzada usando LoRa convencional fue de 182 m, mientras que con LoRa Mesh se logró extender el alcance hasta 237 m concluyendo que efectivamente con la tecnología Mesh se tiene un mayor alcance. Además, se midió un delay promedio de 3.14 ms entre el gateway y el nodo final en la red Mesh, confirmando que los tiempos de respuesta son adecuados para aplicaciones de monitoreo en tiempo real.

Otro hallazgo importante fue la adaptabilidad de LoRa Mesh: durante las pruebas, incluso al introducir varios obstáculos físicos entre los nodos, la red mantuvo la comunicación, reorganizando las rutas y sorteando las barreras, lo que no fue posible con el enlace punto a punto concluyendo que la tecnología LoRa Mesh tiene una alta adaptabilidad. Por otra parte, también se identificó que la curva de aprendizaje para implementar LoRa Mesh es ligeramente más compleja a la de LoRa convencional, ya que se requiere una planificación cuidadosa de la topología y las rutas de comunicación para evitar redundancias que puedan comprometer la eficiencia y estabilidad de la red. Además, al ser una tecnología que aún se encuentra en fase de estudio y desarrollo, existen pocas fuentes de información consolidadas

Cabe recalcar que para la implementación de la red LoRa mesh, se requiere de dispositivos que sean compatibles para el firmware de Meshtastic, por lo cual no todos los dispositivos que operen en LoRa convencional puedan migrar a esta nueva tecnología. Esto implicaría costos adicionales por compra nueva de equipos.

Llevándolo al campo aplicativo de una camaronera rodeada de manglares y elevaciones del terreno, en la cual se quiere abarcar en cobertura a 20 piscinas dentro de un radio de 2,4 km, al utilizar LoRa convencional, se requiere de la instalación de mayor infraestructura de telecomunicaciones y mantenimiento, lo cual aumenta los costos de implementación al contrario de la tecnología LoRa mesh que con nodos intermediarios se puede cubrir la misma cobertura.

Con respecto a los modelos por tramos, ofrecen una representación más realista de la propagación en el entorno de estudio, en comparación con los modelos teóricos. La diferencia entre α_1 y α_2 demuestra que el fenómeno de pérdida de trayectoria no es uniforme, y que para el diseño de sistemas de comunicación es necesario emplear modelos ajustados a las condiciones reales, evitando sobreestimar o subestimar la cobertura del enlace.

En resumen, los resultados obtenidos validan que LoRa Mesh ofrece claras ventajas en alcance, resiliencia y adaptabilidad frente a LoRa convencional, aunque implica desafíos adicionales en términos de configuración y compatibilidad de equipos, y migración de equipos a esta nueva tecnología. Esta información es clave para elegir la tecnología adecuada según el contexto y las necesidades de cada aplicación.

CAPITULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La implementación de la red LoRa Mesh con un nodo intermediario (Nodo A) permitió superar las limitaciones de cobertura de la red LoRa convencional. Al configurar el Nodo A como intermediario, se logró extender al doble el alcance de la comunicación, alcanzando una distancia de 238 metros asumiendo el escenario planteado, lo que demuestra que la red Mesh tiene la capacidad de operar eficazmente en entornos con obstáculos y sin línea de vista.
- Las pruebas mostraron que el uso de la tecnología LoRa Mesh mejoró significativamente la conectividad entre el Nodo B y el Gateway. Esto fue posible gracias a la capacidad de la red Mesh para crear enlaces multisalto, lo cual aumentó la flexibilidad y resiliencia de la comunicación.
- El análisis de las mediciones de RSSI reveló que los obstáculos, como vegetación, edificaciones y desniveles, tuvieron un impacto directo en la calidad de la señal. Sin embargo, a pesar de la atenuación de la señal, la red LoRa Mesh logró mantener una comunicación estable, lo que subraya su capacidad para adaptarse a las condiciones difíciles del entorno.
- La latencia promedio de 3.14 ms demuestra un buen rendimiento en términos de tiempo de respuesta. Esta latencia es adecuada para aplicaciones que requieren una comunicación eficiente y confiable. La estabilidad de la latencia y la calidad de la señal en general hacen de LoRa Mesh una opción viable para sistemas que demandan alta disponibilidad. Los resultados obtenidos sugieren que la red LoRa Mesh es una solución viable para la expansión de la cobertura en áreas rurales y remotas. Al ser una tecnología económica y flexible, tiene el potencial de ser implementada en diversos sectores, como la

agricultura, acuicultura, minería y floricultura, para mejorar el monitoreo y control de recursos.

- Los modelos empíricos, como Okumura-Hata y COST-231, ofrecen una buena aproximación en escenarios urbanos y suburbanos, pero presentan limitaciones al aplicarse directamente en entornos específicos como el analizado. Donde el modelo basado en múltiples gradientes, obtenido a partir de los valores de RSSI, permite una mayor adaptación al entorno real, mostrando un mejor ajuste respecto a los datos medidos en campo.
- La metodología de análisis con múltiples gradientes constituye una alternativa válida para generar modelos ajustados a condiciones particulares, mejorando la predicción de cobertura en escenarios donde los modelos empíricos tradicionales no resultan suficientemente representativos.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para una mejor validación de la red mesh, se recomendaría para futuras investigaciones, usar por lo menos mas 3 de dispositivos que operen en lora mesh.
- Para un modelo de propagación más exhaustivo, se recomendaría aumentar las mediciones, con distintos horarios, diversos climas, con la finalidad de reducir varianzas y sesgos.
- Realizar mediciones variando parámetros como la altura de las antenas (tanto del GW como del nodo móvil), para determinar una altura óptima para futuros casos de estudio o aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

- Arguello Andrade , G., Ramos, B., & Del Rosario, E. (2021). LPWAN Empirical Propagation Path Loss Models comparison at Prosperina campus in ESPOL: Results based on an empirical study. *Revista Tecnologica - ESPOL*. Guayaquil, Ecuador: 33(2), 12-24. <https://doi.org/10.37815/rte.v33n2.824>.
- AWS. (2020). ¿Qué es LoRaWAN? Obtenido de https://docs.aws.amazon.com/es_es/iot-wireless/latest/developerguide/what-is-lorawan.html
- EBYTE. (18 de 12 de 2023). *Análisis en profundidad de la arquitectura de red LoRa*. Obtenido de <https://www.es-ebyte.com/news/502>
- EBYTE. (08 de 05 de 2024). *Comparison of LoRa, LoRa MESH and LoRaWAN*. Obtenido de <https://www.cdebyte.com/news/587>
- Huang, Y. (12 de 03 de 2020). ¿Cuál es la tecnología detrás de la frecuencia LoRa? Obtenido de <https://www.mokosmart.com/es/lora-frequency/>
- IMPORMEL. (2024). *Bateria Litio 3.7 V 300mah*. Obtenido de <https://impormel.com/producto/bateria-litio-37-v-300mah-402040-auricular-gps-bluetooth/>
- MECHATRONIC. (2024). *Panel Solar Electrónico 5V 0.18W*. Obtenido de <https://www.mechatronicstore.cl/panel-solar-electronico-5v-0-18w/>
- MESHTASTIC. (2024). *Introduction MESHTASTIC*. Obtenido de <https://meshtastic.org/docs/introduction/>
- Perez Nelson, G., Herrera , J., Uzcátegui, J., & Bernardo Peña, J. (2012). *Modelo de propagación en las ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia) para redes wlan, operando en 2.4 ghz, en ambientes exteriores*.
- Raspberry Pi. (2024). *Raspberry Pi 4*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- Rouphael, T. J. (2009). *RF and Digital Signal Processing for Software-Defined Radio - A Multi-Standard Multi-Mode Approach*. ISBN 978-0-7506-8210-7.
- VENCO. (25 de 07 de 2024). *Decodificando la Tecnología LoRa: Diferencias entre LoRaWAN, LoRa P2P y LoRa Mesh*. Obtenido de <https://www.vencoel.com/decodificando-la-tecnologia-lora-diferencias-entre-lorawan-lora-p2p-y-lora-mesh/>

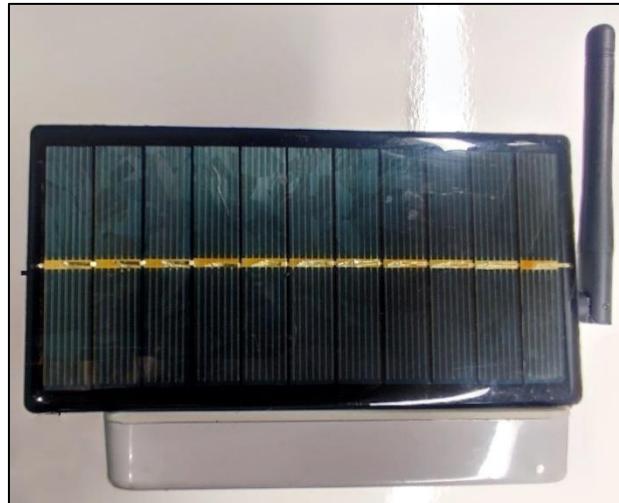
APÉNDICES



Apéndice 1 – Antena de GW 5 dBi



Apéndice 2 – Pruebas con nodo



Apéndice 3 – Nodo móvil



Apéndice 4 – Gw: Raspberry Pi 4 + ESP LILYGO T-BEAM