ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 – Número 48 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Diseño, implementación y validación funcional de una arquitectura de monitoreo subacuático de corto alcance basada en LoRa

Design, implementation, and functional validation of a short-range LoRa-based underwater monitoring architecture

Diego Arbey Montezuma Rosero[1]
Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez[1]
Jaime Roberto Michilena Calderón[1]
Luis Edilberto Suárez Zambrano[1]

[1] **Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Av. 17 de Julio 5-21 y General José María Córdova, Ibarra 100105, Ecuador.**

Recibido: 26 mayo 2026. Revisado: 26 junio 2026. Aceptado: 31 julio 2026. Publicado: 04 agosto 2026.
Autor de correspondencia: Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez

Cómo citar: D. A. Montezuma Rosero, F. G. Cuzme Rodríguez, J. R. Michilena Calderón, and L. E. Suárez Zambrano, "Diseño, implementación y validación funcional de una arquitectura de monitoreo subacuático de corto alcance basada en LoRa", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 2, no. 48, ago. 2026, art. no. 4509, doi: 10.24054/rcta.v2i48.4509

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

El monitoreo ambiental en ecosistemas acuáticos requiere sistemas de comunicación capaces de operar bajo las condiciones particulares del medio subacuático. En este trabajo se presenta el diseño, implementación y validación funcional de un sistema de monitoreo subacuático de corto alcance basado en la tecnología LoRa para ambientes de agua dulce. La arquitectura desarrollada integra un nodo sensor sumergido para la adquisición de variables ambientales, una boya de comunicaciones ubicada en superficie y una plataforma web para la visualización de la información en tiempo real. La comunicación entre el nodo sensor y la boya se realiza mediante un enlace LoRa en la banda ISM de 915 MHz bajo una configuración underwater-to-overwater (UW2OW), mientras que la transmisión hacia la nube se efectúa mediante Wi-Fi a 2.4 GHz. La validación funcional se realizó en un entorno controlado (piscina) y en ambientes naturales (lagunas de agua dulce), evaluando el comportamiento operativo del sistema bajo diferentes profundidades y distancias de separación entre el nodo y la boya. Los resultados muestran que la distancia máxima con recepción detectable dependió de la profundidad y del escenario evaluado, con valores comprendidos entre 1.2 y 13 m. No obstante, la pérdida de paquetes aumentó considerablemente al aproximarse a estos límites, por lo que se establecieron distancias operativas de referencia más conservadoras. Asimismo, se identifican limitaciones operativas asociadas con la profundidad, la pérdida de paquetes, el retardo de transmisión y la sensibilidad efectiva del sistema, aspectos que deben considerarse durante el despliegue de este tipo de soluciones. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad funcional de la arquitectura propuesta para aplicaciones de monitoreo ambiental de baja dinámica y proporcionan una base experimental para futuras optimizaciones del sistema de comunicación y de los mecanismos de despliegue en ambientes acuáticos.

Palabras clave: comunicación subacuática, LoRa, monitoreo ambiental, redes de sensores inalámbricos, telemetría.

Abstract:

Environmental monitoring in aquatic ecosystems requires communication systems capable of operating under the particular conditions of underwater environments. This work presents the design, implementation, and functional validation of a short-range underwater monitoring system based on LoRa technology for freshwater environments. The developed architecture integrates a submerged sensor node for environmental data acquisition, a communication buoy located at the water surface, and a web platform for real-time data visualization. Communication between the sensor node and the buoy is performed through a LoRa link operating in the 915 MHz ISM band under an underwater-to-overwater (UW2OW) configuration, while data transmission to the cloud is carried out through a 2.4 GHz Wi-Fi connection. Functional validation was conducted in a controlled environment consisting of a swimming pool and in natural freshwater environments represented by two lagoons, considering different node depths and horizontal separation distances. The maximum distance with detectable reception depended on the node depth and the test environment, ranging from 1.2 to 13 m. However, packet loss increased considerably near these limits; therefore, more conservative operational reference distances were established. Operational limitations related to node depth, packet loss, transmission delay, and effective receiver sensitivity were also identified. The results demonstrate the functional feasibility of the proposed architecture for low-dynamic environmental monitoring applications and provide an experimental basis for future improvements to the communication system and deployment mechanisms in aquatic environments.

Keywords: underwater communication, LoRa, environmental monitoring, wireless sensor networks, telemetry.

INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones subacuáticas han experimentado un desarrollo significativo durante los últimos años [1]. No obstante, su implementación continúa representando un desafío debido a las condiciones de propagación del medio, las cuales generan limitaciones relacionadas con el ancho de banda, la velocidad de propagación, la tasa de transferencia de datos, la alimentación energética de los dispositivos y la complejidad del despliegue de infraestructura [2]. Para afrontar estas restricciones, las comunicaciones subacuáticas se han desarrollado principalmente mediante enfoques acústicos, ópticos y electromagnéticos. La comunicación acústica constituye uno de los enfoques más empleados en entornos subacuáticos debido a la capacidad de las ondas sonoras para propagarse a grandes distancias en el agua. Sin embargo, su funcionamiento puede verse limitado por el ruido ambiental, la latencia, el consumo energético y las variaciones del medio [3]. Por otra parte, las comunicaciones ópticas permiten altas tasas de transferencia, pero requieren condiciones favorables de alineación y visibilidad. La absorción, la dispersión y la turbidez del agua reducen considerablemente su alcance [4].

El tercer enfoque corresponde a la comunicación electromagnética mediante radiofrecuencia, en la cual se centra este trabajo. Las ondas electromagnéticas presentan ventajas asociadas con su baja latencia y la posibilidad de emplear dispositivos compactos de comunicación; sin embargo, experimentan una elevada atenuación al propagarse en medios acuáticos, especialmente cuando aumentan la frecuencia de operación, la conductividad del agua y la profundidad del dispositivo [5]. En consecuencia, su aplicación se orienta principalmente hacia enlaces subacuáticos de corto alcance. La tecnología LoRa utiliza una modulación de espectro ensanchado por chirp, denominada Chirp Spread Spectrum (CSS) [6], y fue desarrollada para comunicaciones inalámbricas de largo alcance y bajo consumo energético [7]. Su elevada sensibilidad de recepción y la robustez de su modulación permiten considerar su aplicación en enlaces subacuáticos de corto alcance. No obstante, su desempeño en estos entornos depende de las características del medio acuático, la profundidad, la frecuencia de operación, la configuración de radio y la implementación física de las antenas.

El presente trabajo propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo subacuático de corto alcance basado en tecnología LoRa para ambientes de agua dulce. La arquitectura integra un nodo sensor sumergido encargado de adquirir variables ambientales, una boya de comunicaciones ubicada en superficie para recibir y retransmitir la información, y una plataforma web para almacenar y visualizar los datos. El estudio se orienta hacia la validación funcional de esta arquitectura completa en escenarios controlados y naturales, considerando las limitaciones operativas observadas durante su despliegue[8].

En el marco de esta investigación se identificaron trabajos previos en los que se realizaron pruebas experimentales con nodos de comunicación ubicados en entornos acuáticos, uno de ellos plantea el uso de la frecuencia 433 MHz mediante el uso de módulos de transmisión y recepción RF TWS-433, donde se emplean 2 nodos ubicados sobre la superficie (OW2OW) del agua y que consigue una distancia máxima de propagación de la señal de hasta 9m[5]. Otro de los estudios utiliza frecuencias más altas para evaluar la transmisión de datos en un entorno subacuático, con una profundidad de transmisor y receptor de 0.15 m, que permite la transferencia de datos de hasta 0.16 m en una banda de frecuencia de 2.4 GHz[3]. Sin dejar atrás tecnologías como Bluetooth que operan en la misma banda de frecuencia, se ha utilizado en un estudio generado mediante un ambiente de pruebas en una pecera, tanto para agua dulce como para agua salada, con el uso de 2 nodos separados a pocos centímetros (UW2OW), alcanzando una distancia de propagación de hasta 0.19m[4].

En cuanto al uso de la tecnología LoRa, existe un estudio en el lago Dishui en Shanghái, mediante el uso de la frecuencia 433 MHz utilizando parámetros similares de Spreading Factor y ancho de banda, evaluando 3 modos transmisor sumergido y receptor sumergido (UW2UW), transmisor sumergido y receptor en la superficie del agua (UW2OW) y transmisor en la superficie y receptor sumergido (OW2UW), dando como resultado que los enlaces que tienen un nodo sumergido y otro en superficie son los que mejor se desempeñan[9]. Por otro lado, también se han realizado estudios mediante el diseño de una antena para la comunicación LoRa en frecuencias de 868MHz, donde se alcanzó 0.6m de distancia cuando los nodos se encuentran sumergidos en el agua[10].

En una investigación posterior, Pozzebon et al. evaluaron transmisiones LoRaWAN desde el agua hacia la superficie mediante pruebas de laboratorio y de campo en agua salina. Los resultados mostraron que la recepción puede mantenerse cuando el transmisor se encuentra a poca profundidad, aunque la confiabilidad disminuye considerablemente al aproximarse a los límites de sensibilidad del receptor. Este estudio confirma la importancia de diferenciar entre recepción detectable y operación confiable en aplicaciones acuáticas[11].

Aunque los trabajos previos han demostrado la posibilidad de utilizar radiofrecuencia y tecnología LoRa para comunicaciones subacuáticas de corto alcance, la mayoría de las investigaciones se han concentrado en el análisis del comportamiento del enlace físico o en la evaluación aislada de módulos de comunicación. En contraste, son escasos los estudios que presentan una arquitectura integrada para monitoreo ambiental que combine un nodo sensor subacuático, una boya de comunicaciones LoRa–Wi-Fi y una plataforma de supervisión remota validada mediante pruebas experimentales en escenarios reales de agua dulce. Este vacío motiva el desarrollo del sistema presentado en este trabajo.

En este contexto, el aporte principal de esta investigación consiste en el diseño, implementación y validación funcional de una arquitectura de monitoreo subacuático de corto alcance basada en LoRa. Las contribuciones específicas comprenden: i) la implementación de un nodo sensor sumergible para la adquisición de variables ambientales; ii) el desarrollo de una boya que integra comunicaciones LoRa y Wi-Fi para la retransmisión de datos hacia la nube; iii) la integración de una plataforma web para almacenamiento y visualización de información; y iv) la validación funcional del sistema en escenarios controlados y naturales, identificando limitaciones operativas asociadas con la profundidad, la pérdida de paquetes, el retardo y la sensibilidad efectiva del prototipo. El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 describe la arquitectura propuesta, los materiales utilizados y la metodología experimental empleada para el diseño, implementación y validación del sistema, así como el modelo de simulación utilizado como referencia. La Sección 3 presenta los resultados experimentales obtenidos en los diferentes escenarios de evaluación. La Sección 4 discute los resultados y los compara con investigaciones relacionadas, analizando las principales limitaciones y alcances de la propuesta. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones y las líneas de trabajo futuro.

METODOLOGÍA

Diseño

El sistema se implementó mediante dos placas Heltec Wi-Fi LoRa 32 V3, que integran un microcontrolador ESP32-S3 y comunicaciones LoRa, Wi-Fi y Bluetooth. Una placa se utilizó en el nodo sensor y la segunda en la boya de comunicaciones. El nodo sensor adquiere las variables de pH y turbidez y transmite la información mediante LoRa a 915 MHz hacia la boya ubicada en la superficie. Posteriormente, la boya retransmite los datos mediante Wi-Fi hacia Firebase para su almacenamiento y visualización mediante una plataforma web.

La arquitectura está compuesta por tres elementos: i) un nodo sensor sumergido a la profundidad definida para cada ensayo; ii) una boya de comunicaciones que recibe los paquetes bajo una configuración UW2OW; y iii) una plataforma web para almacenamiento y visualización remota. La comunicación LoRa se realiza mediante un enlace punto a punto entre las dos placas Heltec, mientras que la conexión Wi-Fi se utiliza exclusivamente entre la boya y la plataforma en la nube.

La placa Heltec Wi-Fi LoRa 32 V3 fue seleccionada porque integra el transceptor SX1262 y el microcontrolador ESP32-S3 en un único dispositivo, admite una potencia de transmisión de hasta 21 dBm y puede programarse mediante el entorno Arduino IDE. Sus principales características se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos técnicos de placa Heltec Wi-Fi LoRa 32 V3

	Especificación
Microcontrolador	ESP32
Chip LoRa	SX1262
Consumo de energía	<10 µA
Frecuencia de operación	863–928 MHz / 470–510 MHz
Potencia máxima	21 ± 1 dBm
Sensibilidad máxima	−137 dBm
Tecnologías integradas	Bluetooth, Wi-Fi, LoRa
Temperatura de operación	−20 °C a 70 °C
Voltaje de operación	3.7 V

Fuente: plataforma Heltec [12] y Semtech [20]

Los parámetros con los que se ha configurado el envío de la señal LoRa se han dispuesto en base al alcance y robustez de la señal en entornos hostiles, ya que su configuración impacta directamente en la propagación de esta. Aspectos como la velocidad de transmisión y la tasa de transferencia de datos están ligados a configuraciones como el Spreading Factor, el cual en su mayor configuración SF12, permite que la señal sea más robusta en cuanto a las interferencias, así como el aumento del alcance de esta, mejorando la sensibilidad en la recepción de datos. De igual forma otro aspecto como el Coding Rate, permite abarcar más bits de redundancia para la corrección de errores, ideal para entornos con altos índices de pérdida. También el uso de valores de ancho de banda bajos como 125 kHz permiten un mayor alcance de la señal sacrificando la cantidad de datos.

Los parámetros de comunicación con los que se ha trabajado son: La frecuencia, potencia de transmisión, ancho de banda, factor de expansión de la señal, tasa de codificación y longitud de preámbulo, todos ellos dispuestos en una configuración enfocada en un mayor alcance de la señal y mejor robustez de esta, para lo cual se presenta la Tabla 2 con las configuraciones respectivas.

Tabla 2: Parámetros configurados para la transmisión

	Configuración
Frecuencia	915 MHz
Potencia	21 dBm
Ancho de banda	125 kHz
Spreading Factor	SF12
Coding Rate	4/8

	Configuración
Tamaño de preámbulo	12 símbolos

Fuente: elaboración propia

Arquitectura

Teniendo en cuenta los parámetros con los que se ha configurado la placa Heltec Wi-Fi 32 V3, se da paso a plantear un sistema que permita el monitoreo de un ambiente subacuático mediante la implementación de los 2 nodos ya mencionados, utilizando LoRa para la comunicación en el entorno subacuático y Wi-Fi para la transmisión de datos hacia la base de datos Firebase y que estos se almacenen en y se visualicen en una plataforma web en tiempo real.

El proceso inicia con el nodo sensor, el cual se sumerge en el agua a una profundidad x, este se encuentra equipado con sensores que capturan variables ambientales como el pH y la turbidez del agua. Este nodo procesa la información en tiempo real y la transmite utilizando la banda de 915 MHz hacia una boya de comunicaciones en la superficie el agua, la cual contiene una antena de recepción configurada a la misma frecuencia. Dado que la transmisión de señales electromagnéticas en medios acuáticos presenta una alta atenuación, la boya actúa como un repetidor cercano que recibe la señal LoRa que proviene desde el nodo sumergido y la retransmite mediante un enlace Wi-Fi (2.4 GHz). Una vez que la boya de comunicaciones recibe los datos del nodo sensor, utiliza esta antena Wi-Fi integrada en el módulo Heltec LoRa Wi-Fi 32 V3 para conectarse directamente a internet. A través de esta conexión, la boya envía los datos a Firebase en tiempo real.

Un usuario que monitoree este enlace puede visualizar estos datos a través de una interfaz web, que se conecta a la base de datos Firebase para recuperar la información y mostrarla en gráficos que permitan interpretarla. De esta manera, se logra un monitoreo continuo de las condiciones del agua. En la Fig. 1 se muestra la arquitectura del sistema.

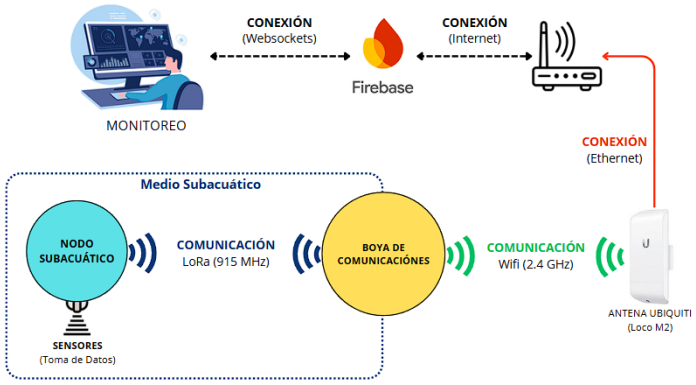

Fig. 1. *Arquitectura del sistema.*
Fuente: elaboración propia.

Funcionalidad del sistema

El proceso completo del funcionamiento del sistema se presente en la Fig. 2, donde se evidencia la interacción entre los diferentes apartados de este, con el fin de cumplir el objetivo de monitoreo de variables ambientales mediante el uso de la comunicación LoRa.

El sistema ejecuta una etapa inicial tanto en el nodo sensor como en la boya de comunicación. Aquí, se configuran los parámetros de comunicación, se enciende el hardware y se ejecutan los procesos necesarios para el arranque del sistema. Cuando el sistema se ha iniciado en ambos dispositivos, el nodo sensor realiza la lectura de los datos provenientes de los sensores en contacto con el agua. Dichos datos, se almacenan en la memoria flash de la placa Heltec Wi-Fi 32 V3 con el uso de variables, luego se genera un paquete de datos estructurado donde se contiene toda la información en una cadena de texto.

Antes de transmitir esta cadena de datos, si el sistema se inicia por primera vez, este realizará una comprobación para verificar si la boya se encuentra disponible para la recepción de paquetes. Si el receptor responde positivamente, se inicia el proceso de transmisión (el nodo sensor verifica que la boya se encuentre en línea cada cierto tiempo, con el objetivo de no enviar paquetes innecesariamente). Siempre que un paquete es transmitido, se ejecuta una función que libera el módulo de comunicación LoRa para la siguiente transmisión y se enciende un LED indicando que el paquete se ha enviado.

En cuanto a la boya de comunicaciones, luego del inicio del sistema, se genera una conexión a la red Wi-Fi. Una vez establecida la conexión, se enviará una petición a un servidor NTP para sincronizar la hora actual. Posteriormente, la Boya realiza una conexión hacia la base de datos (Firebase) y el sistema quedará a la espera de la llegada de paquetes a través del módulo LoRa. Cuando un paquete llega al módulo de comunicaciones LoRa, el LED indicador enciende y dicho paquete se almacena en forma de cadena de texto en la memoria Flash. Luego, extrae los valores individualmente y los almacena en variables

separadas, al mismo tiempo que los muestra en la pantalla OLED del dispositivo Heltec Wi-Fi LoRa 32 V3.

Finalmente, los datos se envían a Firebase tanto para su almacenamiento de historial de datos como para la actualización en tiempo real. Completado este proceso, el sistema entra en modo de espera para recibir nuevos datos. En cuanto a la interfaz de usuario, al estar basada en una página web, se realiza una petición a Firebase para obtener los valores actualizados. Estos se interpretan visualmente a través de gráficos históricos y también se pueden visualizar en tiempo real conforme van llegando desde el sistema (ver Fig. 2).

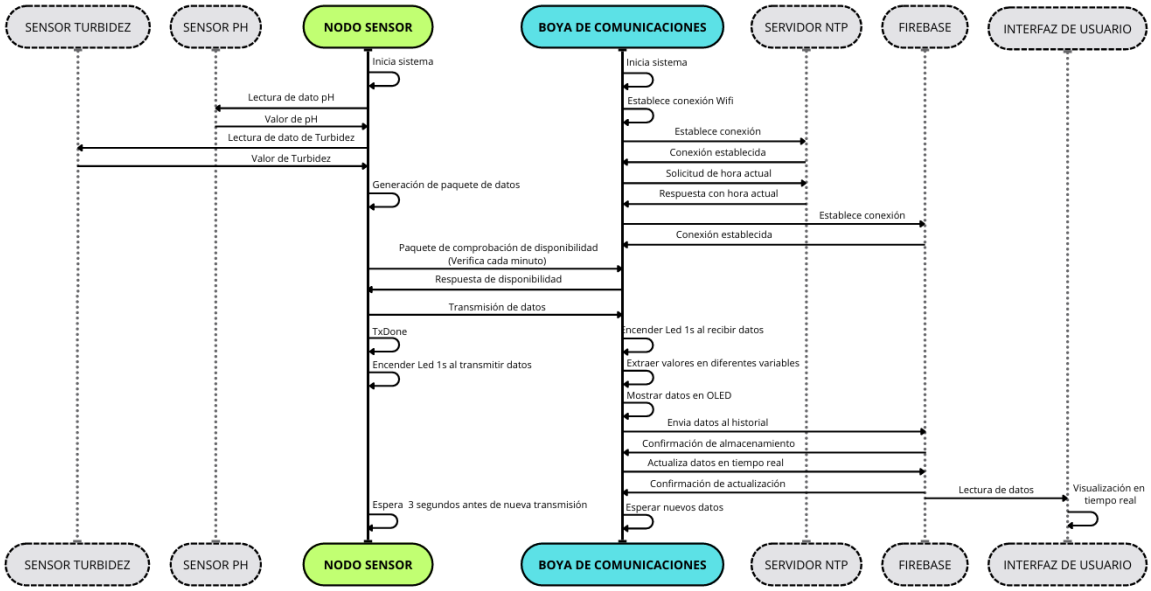

Fig. 2. *Diagrama de secuencia del sistema.*
Fuente: elaboración propia.

Diseño de nodo sensor

El nodo sensor constituye el componente más expuesto del sistema, debido a que debe operar sumergido a una determinada profundidad; por ello, sus elementos electrónicos requieren una protección hermética. Como se muestra en la Fig. 3, el nodo integra sensores de pH y turbidez, módulos de acondicionamiento de señal, una placa Heltec Wi-Fi LoRa 32 V3 y una antena LoRa conectada mediante la interfaz U.FL. La placa recibe, procesa y transmite los datos adquiridos por los sensores a través de los pines del ESP32. El sistema es alimentado por una batería de 3.7 V y utiliza un convertidor de 3.7 a 5 V para suministrar el voltaje requerido por los sensores.

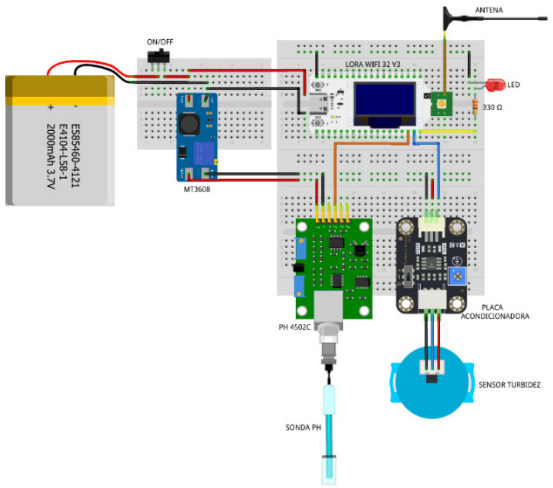

Fig. 3. *Diagrama de conexiones de módulos electrónicos (Nodo Sensor).*
Fuente: elaboración propia.

Los componentes electrónicos del nodo sensor se alojan en una carcasa hermética diseñada en 3D para protegerlos frente a filtraciones durante las pruebas subacuáticas. La estructura esférica se divide en una sección superior y una inferior, unidas

mediante una rosca intermedia que permite acceder al interior y facilita el montaje y mantenimiento del sistema.

La sección superior incorpora un compartimento para la batería de polímero de litio, una base para la fijación de la PCB, un mango externo para sujetar y recuperar el nodo mediante cuerdas, y aberturas protegidas para el indicador LED y la antena LoRa. Estos elementos fueron diseñados para mantener la estanqueidad del conjunto y proteger tanto los componentes electrónicos como las conexiones expuestas al medio acuático, estas características se pueden apreciar en l Fig. 4.

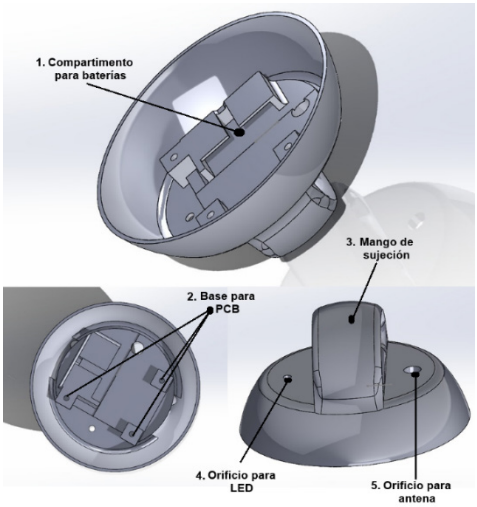

Fig. 4. *Diseño de cubierta superior (Nodo Sensor).*
Fuente: elaboración propia.

La cubierta inferior de la esfera, mostrada en la Fig. 5, está destinada a la integración de los sensores y al control de la inmersión del nodo. Esta sección incorpora argollas y cavidades para añadir peso, una rosca de unión con la cubierta superior y un cilindro protector central. Además, incluye orificios roscados para la instalación segura de los sensores de pH y turbidez, manteniendo la protección mecánica y el sellado del conjunto.



Fig. 5. *Diseño de cubierta inferior (Nodo Sensor).*
Fuente: elaboración propia.

Diseño de Boya de Comunicaciones

El esquema electrónico de la boya de comunicaciones se centra en el módulo Heltec Wi-Fi LoRa 32 V3. En este caso, la conexión es más sencilla, dicha placa está alimentada por una batería de 3.7 V. La placa integrada LoRa se encarga de recibir los datos mediante la antena LoRa que trabaja a 915 MHz y los retransmite hacia Firebase mediante su módulo Wi-Fi integrado en el microcontrolador ESP32 (ver Fig. 6).

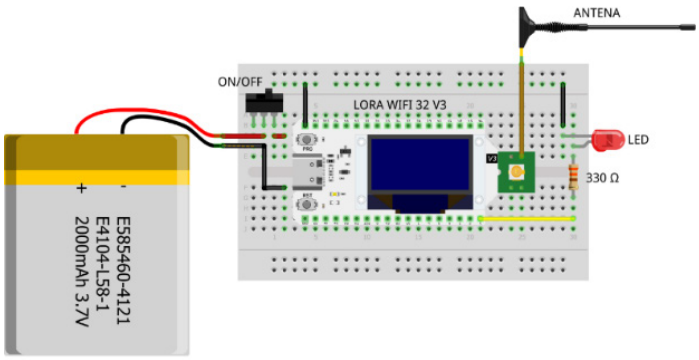

Fig. 6. *Diagrama de conexiones de módulos electrónicos (boya de comunicaciones).*
Fuente: elaboración propia.

Diseño de plataforma web

La plataforma de visualización de los datos se ha levantado con el uso de Firebase, puesto que facilita la sincronización en tiempo real entre los dispositivos que se conectan a la plataforma, esta lo hace almacenando los datos en formato JSON, ya que es una base de datos NoSQL (no estructurada)[13]. La base de datos utilizada contiene 8 ramas, cada una con información dentro de variables almacenadas, aquí se definen 2 tipos de datos (historial y realtime), en la Fig. 7 se visualiza la estructura general.

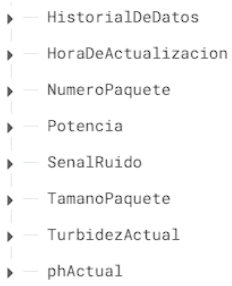

Fig. 7. *Árbol de datos en Firebase.*
Fuente: elaboración propia.

Se establece una rama denominada “HistorialDeDatos”, donde la información que llega desde la boya de comunicaciones se almacena a modo de un registro histórico, estos se almacenan en base a un “Timestamp” que contiene una estructura con todos los datos recolectados, lo cual permite posteriormente generar gráficas históricas de los mismos (ver Fig. 8-a). Por otro lado, los datos que se actualizan en tiempo real se almacenan a modo de variables, estos cambian automáticamente cuando la información se carga en la plataforma desde la boya (ver Fig. 8-b).

La interfaz de usuario se planteó en base a el desarrollo de una página web utilizando los lenguajes de programación como HTML, CSS y JavaScript, esta plataforma se encarga de tomar los 2 tipos de datos que se han almacenado en Firebase (historial y realtime), en la Fig. 9 se muestran los datos a modo de tarjetas generadas en la Web, donde se carga en tiempo real la información tal como se va actualizando en Firebase.

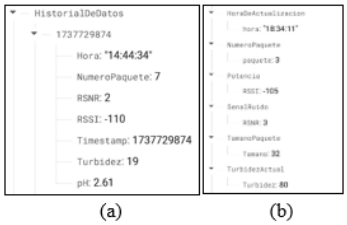

Fig. 8. *Historial de datos (a) y datos en tiempo real (b) capturados desde Firebase.*
Fuente: elaboración propia.



Fig. 9. *Tarjetas de presentación de datos en tiempo real.*
Fuente: elaboración propia.

Otra de las formas de presentar la información en la Web es mediante gráficas históricas, que permiten visualizar como los datos van evolucionando en el tiempo, para ello se utiliza el árbol generado mediante la rama "HistorialDeDatos" en Firebase, tal como se muestra en la Fig 10.

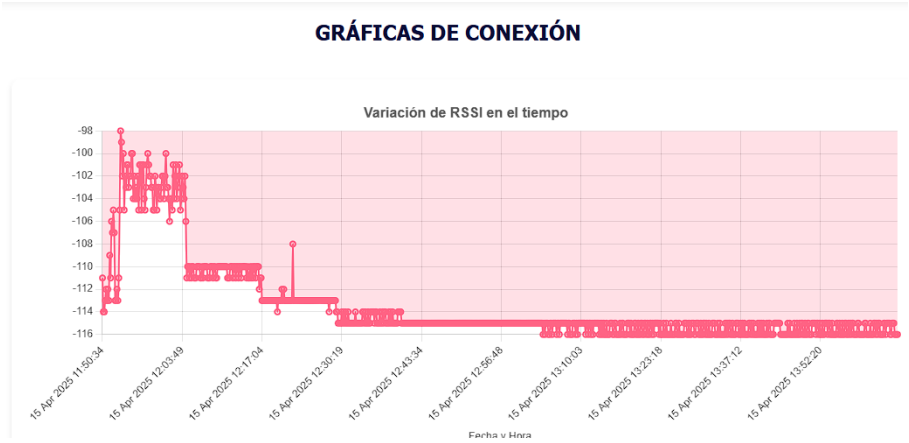

Fig. 10. *Gráfica de presentación de historial de datos.*
Fuente: elaboración propia.

Implementación

Nodo sensor

La construcción del nodo sensor, que alberga los elementos electrónicos y los sensores, se ha realizado mediante el diseño impreso en 3D especificado anteriormente. Este cuenta con una estructura hermética para proteger los componentes en el entorno acuático. El diseño incluye cuatro aberturas: dos para la salida de los sensores en contacto directo con el agua, una para la antena LoRa y otra para un indicador LED de funcionamiento. Su estructura ya implementada tanto interna y externa se muestra en la Fig. 11.

La construcción de la boya de comunicaciones, que alberga los elementos electrónicos, se realiza sobre un material flotante, en este caso, poliestireno. La antena LoRa se mantiene en contacto con la superficie del agua, además, se utiliza la antena de 2.4 GHz del módulo para establecer la conexión vía Wi-Fi hacia Internet. El diseño de la boya se muestra en la Fig. 12. Cabe destacar que se ha utilizado una caja hermética de electricidad para exteriores que cumple con una normativa IP65, de protección contra el polvo y el agua proyectada[14].

Boya de Comunicaciones



Fig. 11. *Nodo Sensor, parte interna (a) y externa (b).*
Fuente: elaboración propia.

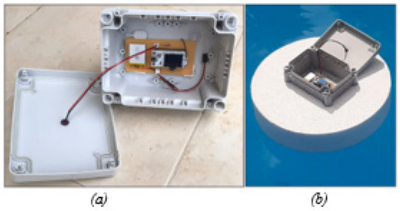

Fig. 12. *Boya de comunicaciones, parte interna (a) y externa (b).*
Fuente: elaboración propia.

Protocolo experimental

Las pruebas se organizaron considerando el escenario de evaluación, la profundidad del nodo sensor y la distancia horizontal entre el nodo sumergido y la boya de comunicaciones. Para cada combinación de escenario, profundidad y distancia se realizó dos pruebas independientes, en cada una se transmitieron 50 paquetes, con un intervalo de 10 s y una carga útil de 60 bytes. Durante todas las pruebas se mantuvo constante la configuración LoRa: frecuencia de 915 MHz, potencia de transmisión de 21 dBm, ancho de banda de 125 kHz, SF12, CR 4/8 y preámbulo de 12 símbolos.

Para cada paquete correctamente recibido se almacenaron el identificador de paquete, RSSI, SNR, tamaño de la carga útil y las marcas temporales utilizadas para calcular el retardo. El retardo reportado corresponde a la transferencia de datos entre nodo y boya, se calculó como la diferencia entre la hora con el que se marca el paquete al momento de transmitirlo desde el módulo LoRa del nodo sensor y la hora con el que se marca el paquete al momento de ser capturado por la boya. Antes de iniciar cada prueba, los relojes utilizados por el nodo sensor y la boya fueron sincronizados mediante el uso del servidor NTP tal como se presentó en la Fig. 2. La pérdida de paquetes se obtuvo mediante la ecuación presentada en(1).

$$PER = \frac{N_{tx} - N_{rx}}{N_{tx}} \quad (1)$$

Donde, N_{tx} corresponde al número de paquetes transmitidos y N_{rx} al número de paquetes correctamente recibidos. Para RSSI, SNR y retardo se calcularon la media y la desviación estándar de los paquetes recibidos en cada condición experimental. Para interpretar los resultados se diferenciaron dos conceptos.

Se definió como distancia operativa de referencia la mayor separación en la que el porcentaje de pérdida de paquetes fue igual o inferior al 50 %. Este umbral se adoptó únicamente como un criterio interno para comparar las condiciones de operación del prototipo y no implica una comunicación completamente confiable. La distancia máxima con recepción detectable corresponde, en cambio, a la mayor separación en la que se recibió al menos un paquete, aunque el enlace presentara pérdidas elevadas.

Simulación MATLAB

La simulación presentada en esta investigación tiene un carácter referencial y fue utilizada para estimar la tendencia esperada de propagación del enlace electromagnético bajo condiciones ideales. Debido a la complejidad del medio subacuático, el modelo no considera completamente fenómenos como la orientación de las antenas, el encapsulado de los dispositivos, la interfaz agua–aire ni las variaciones locales de las propiedades fisicoquímicas del agua. En consecuencia, los resultados simulados se emplean únicamente como una referencia para contrastar el comportamiento observado experimentalmente.

Uno de los parámetros utilizados es conductividad del medio, la cual se establece entre 300 a 1500 µS/cm en entornos de agua dulce [15]. Para la simulación se empleó una conductividad de 560 µS/cm, tomando como referencia el valor reportado para la laguna de Yahuarcocha [16]. También se utilizó una permitividad relativa del agua de 80 [17], una permitividad del vacío de $8.85x10^{-12}$ F/m y un ancho de banda de 125 kHz (ver Fig.13). Debido a que estos parámetros no representan toda la variabilidad espacial y temporal de los escenarios naturales, los resultados del modelo se utilizan únicamente como referencia teórica y no como una predicción exacta del alcance del sistema.

Dado que el agua absorbe las ondas electromagnéticas debido a la conductividad eléctrica (σ) del medio, se establece una

ecuación que permite modelar dicha absorción para lo cual se emplea un coeficiente de atenuación (α), que se mide en neperes por metro (Np/m). La ecuación representada en(2), permite calcular dicho coeficiente de atenuación en medios con pérdidas elevadas[18]. Aquí se consideran valores como la frecuencia angular (2πf), la permitividad del medio (ε), la conductividad eléctrica del medio (σ) y la frecuencia de operación(f).

```
% Parámetros físicos
f = 915e6; % Frecuencia en Hz (915 MHz)
d = [0.1, 1:0.5:15]; %distancia
c = 3e8; % Velocidad de la luz en m/s
Pt_dBm = 21; % Potencia de transmisión en dBm
Pt = 10^((Pt_dBm - 30)/10); % Conv. dBm a Watts
epsilon_r = 80; % Permitividad relativa
sigma = 560e-6; % Conductividad para agua dulce
epsilon_0 = 8.85e-12; % Permitividad del vacío
omega = 2 * pi * f; % Frecuencia angular
```

Fig. 13. *Variables de datos para simulación.*
Fuente: elaboración propia.

$$\alpha = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon_r}{2}\left(\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}\right)^2}-1\right)} \tag{2}$$

Otro de los parámetros importantes que se han tomado en cuenta en el entorno simulado es el cálculo del SNR a diferentes distancias, para lo cual se utiliza la ecuación representada en(3), que presenta la fórmula general para obtener la potencia del ruido térmico en un sistema de comunicaciones[18]. La ecuación emplea valores como la figura del ruido del sistema (NF), la constante de Boltzmann (k), la temperatura equivalente al ruido (T) y el ancho de banda (B).

$$N_0 = (NF)kTB \tag{3}$$

Entornos de prueba

La validación funcional se realizó en tres escenarios acuáticos. El primer escenario correspondió a una piscina de 12 m de longitud y 6.5 m de ancho. Para la comparación presentada en la Tabla 3, la antena del nodo sensor se ubicó a una profundidad de 0.8 m respecto de la antena de la boya, mientras que la distancia horizontal se incrementó progresivamente desde 1 m hasta perder la recepción de paquetes. La distancia horizontal se midió sobre la superficie del agua entre la proyección vertical de la ubicación del nodo y la posición de la boya, como se muestra en la Fig. 14.

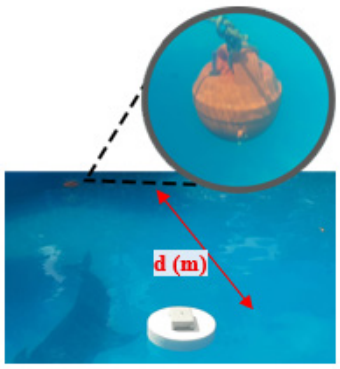

Fig. 14. *Entorno de pruebas en piscina.*
Fuente: elaboración propia.

El segundo escenario correspondió a la laguna de Yahuarcocha, ubicada en Ibarra, provincia de Imbabura. Este cuerpo de agua fue seleccionado por sus condiciones de turbidez y por el valor referencial de conductividad reportado en[16]. Las pruebas mantuvieron la configuración UW2OW y el procedimiento de medición horizontal utilizado en la piscina, evaluando profundidades de 0.25, 0.5 y 0.8 m, como se muestra en la Fig. 15.



Fig. 15. *Entorno de pruebas en la Laguna de Yahuarcocha.*
Fuente: elaboración propia.

El tercer escenario correspondió a la laguna de San Pablo, ubicada en la provincia de Imbabura, cerca de la ciudad de Otavalo, Ecuador. Este escenario fue seleccionado por presentar condiciones visuales de turbidez diferentes de las observadas en Yahuarcocha. Las pruebas se realizaron con la misma configuración UW2OW, las mismas profundidades y el mismo procedimiento de medición horizontal utilizado en los escenarios anteriores, como se muestra en la Fig. 16.



(a) (b)

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Los resultados se presentan en tres apartados. En primer lugar, se muestran los resultados del modelo referencial implementado en MATLAB. Posteriormente, se presentan las mediciones obtenidas durante la validación funcional del sistema en la piscina y en las lagunas de Yahuarcocha y San Pablo. Finalmente, se verifica el almacenamiento y la visualización de los datos ambientales mediante Firebase y la plataforma web. La simulación y las mediciones experimentales se analizan como elementos complementarios, sin considerar que el modelo teórico reproduzca exactamente las condiciones de los escenarios naturales.

Resultados de simulación

Los valores estimados de potencia recibida y relación señal–ruido en función de la distancia se presentan en la Fig. 17. Para la configuración SF12 y BW de 125 kHz se utilizó como referencia una sensibilidad nominal de −137 dBm[20]. Este valor corresponde al desempeño teórico del transceptor bajo condiciones controladas y no representa directamente la sensibilidad efectiva del prototipo completo en los escenarios experimentales.

En este análisis, las distancias evaluadas van desde los 0.1m, que corresponde a la profundidad de la antena ubicada en la boya de comunicaciones, hasta los 15 m de separación entre ambos nodos. Bajo los parámetros asumidos en la simulación, la potencia estimada cruza el umbral nominal aproximadamente a los 12.5 m (ver Fig 17-a). Por tanto, esta distancia representa únicamente una referencia teórica del modelo. No debe interpretarse como el alcance práctico garantizado del sistema, debido a que la simulación no incorpora completamente las pérdidas ocasionadas por la antena, el encapsulado, la interfaz agua–aire, la orientación, el ruido ambiental y la variabilidad del medio acuático.

La relación señal–ruido simulado disminuye con la distancia hasta aproximarse a −20 dB (ver Fig. 17-b). Este valor se emplea como referencia para interpretar la degradación del enlace; sin embargo, la recepción práctica depende de la acción conjunta de RSSI, SNR, pérdida de paquetes y condiciones físicas del sistema. En consecuencia, la simulación permite observar una

tendencia, pero la distancia operativa debe determinarse a partir de las pruebas funcionales.

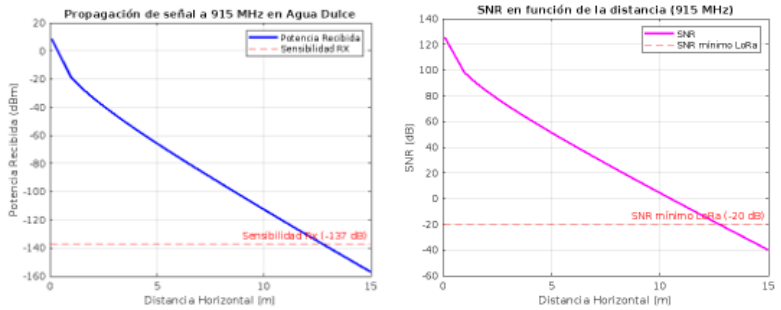

Fig. 17. *Gráficas de propagación de señal a 915 MHz. Gráfica de potencia de señal recibida (a) y gráfica de relación señal ruido (b). Fuente: elaboración propia.*

Resultados de entorno de pruebas

Para la validación funcional del sistema se mantuvo una configuración fija de SF12, BW de 125 kHz y CR 4/8. SF12 fue seleccionado por su elevada sensibilidad nominal [20] y por su orientación hacia enlaces robustos de baja tasa de transferencia. En este artículo no se realiza una comparación experimental entre diferentes valores de Spreading Factor, debido a que el objetivo consiste en verificar el funcionamiento de la arquitectura completa bajo una configuración constante. Las distancias se midieron horizontalmente sobre la superficie del agua desde la proyección de la ubicación del nodo sumergido hasta la posición de la boya.

La Tabla 3 resume las métricas obtenidas durante la validación funcional del sistema a una profundidad de 0.8 m en la piscina y en las lagunas de San Pablo y Yahuarcocha. Para cada escenario se presentan la distancia máxima con recepción detectable, la distancia operativa de referencia, el número de paquetes transmitidos y recibidos, la pérdida de paquetes, RSSI, SNR y retardo.

Tabla 3: Pruebas de conexión con una profundidad de 0.8 m en los 3 entornos

	Piscina	L. SP	L. YAH
Distancia máxima medida con recepción detectable	11.4 m	4.5 m	1.2 m
Distancia operativa de referencia	10 m	3.5 m	0.8 m
Paquetes transmitidos a distancia máxima N_{tx}	100	100	100
Paquetes recibidos a distancia máxima N_{rx}	16	16	3
Pérdida de paquetes a distancia máxima	84%	84%	97%
Pérdida de paquetes en distancia operativa de referencia	30%	50%	40%
RSSI medio ± desviación estándar a distancia máxima	−116 ± 0.5 dBm	−116 ± 0.45 dBm	−116 ± 0.38 dBm
SNR medio ± desviación estándar a distancia máxima	−20 ± 1.33 dB	−18 ± 2.27 dB	−18 ± 0.6 dB
Retardo medio ± desviación estándar a máxima distancia	5942 ± 532 ms	6237 ± 598 ms	5650 ± 504 ms

Fuente: elaboración propia

A una profundidad de 0.8 m, la mayor distancia con recepción detectable fue de 11.4 m en la piscina, 4.5 m en San Pablo y 1.2 m en Yahuarcocha. No obstante, en los tres escenarios la pérdida de paquetes aumentó considerablemente cerca de estas distancias. Por esta razón, los valores máximos representan condiciones marginales de recepción y no distancias de funcionamiento confiable. Las distancias operativas referenciales fueron menores y se establecieron de acuerdo con el criterio definido en la metodología

La Tabla 4 presenta las métricas registradas a una profundidad de 0.5 m en las lagunas de San Pablo y Yahuarcocha. Los resultados se interpretan diferenciando la recepción marginal observada en la distancia máxima y la operación del sistema en la distancia de referencia.

Tabla 4: Pruebas de conexión con una profundidad de 0.5 m en las lagunas de San Pablo y Yahuarcocha

	L. SP	L. YAH
Distancia máxima medida con recepción detectable	7 m	4 m
Distancia operativa de referencia	5.5 m	3.5 m
Paquetes transmitidos a distancia máxima N_{tx}	100	100
Paquetes recibidos a distancia máxima N_{rx}	36	15
Pérdida de paquetes a distancia máxima	64%	85%
Pérdida de paquetes en distancia operativa de referencia	42%	46%
RSSI medio ± desviación estándar a distancia máxima	−116 ± 0.52 dBm	−116 ± 0.58 dBm
SNR medio ± desviación estándar a distancia máxima	−17 ± 1.68 dB	−22 ± 2.65 dB
Retardo medio ± desviación estándar a máxima distancia	6310 ± 505 ms	5398 ± 493 ms

Fuente: elaboración propia

A una profundidad de 0.5 m se obtuvo recepción detectable hasta 7 m en San Pablo y 4 m en Yahuarcocha. Los valores de

SNR cercanos o inferiores a −20 dB estuvieron asociados con una condición marginal del enlace y con porcentajes elevados de pérdida. En consecuencia, la recepción ocasional de paquetes no se interpretó como una comunicación continua o estable.

La Tabla 5 resume las métricas obtenidas a una profundidad de 0.25 m en las lagunas de San Pablo y Yahuarcocha. Esta profundidad presentó las mayores distancias con recepción detectable entre los escenarios naturales; sin embargo, la confiabilidad del enlace disminuyó al aproximarse a dichas distancias.

Tabla 5: Pruebas de conexión con una profundidad de 0.25 m en las lagunas de San Pablo y Yahuarcocha

	L. SP	L. YAH
Distancia máxima medida con recepción detectable	13 m	8.5 m
Distancia operativa de referencia	12 m	7.5 m
Paquetes transmitidos a distancia máxima N_{tx}	100	100
Paquetes recibidos a distancia máxima N_{rx}	27	2
Pérdida de paquetes a distancia máxima	73%	98%
Pérdida de paquetes en distancia operativa de referencia	47%	36%
RSSI medio ± desviación estándar a distancia máxima	−116 ± 0.4 dBm	−116 ± 0.5 dBm
SNR medio ± desviación estándar a distancia máxima	−18 ± 2.5 dB	−23 ± 1.5 dB
Retardo medio ± desviación estándar a máxima distancia	6403 ± 792 ms	5592 ± 485 ms

Fuente: elaboración propia

A una profundidad de 0.25 m se registraron las mayores distancias con recepción detectable en los escenarios naturales: 13 m en San Pablo y 8.5 m en Yahuarcocha. Sin embargo, las pérdidas de 73% y 98%, respectivamente, muestran que estas distancias corresponden al límite de recepción del sistema. Las distancias operativas referenciales se redujeron a 12 m y 7.5 m bajo el criterio de estabilidad definido para la aplicación.

En las condiciones evaluadas, la reducción de la profundidad estuvo acompañada por un incremento de la distancia con recepción detectable. No obstante, las diferencias entre los escenarios no pueden atribuirse exclusivamente a la turbidez, debido a que también pueden intervenir la conductividad, la orientación de las antenas, el movimiento del agua, el encapsulado y el ruido ambiental. Los retardos medios se encontraron entre aproximadamente 5 y 6.4 s, por lo que su efecto se analiza en la Sección 4.

Las medias y desviaciones estándar se calcularon únicamente a partir de los paquetes correctamente recibidos. En las condiciones con un número reducido de paquetes recibidos, estos valores se presentan con carácter descriptivo y no permiten realizar inferencias estadísticas sobre el comportamiento general del enlace.

Validación del almacenamiento y la visualización de datos

Los datos adquiridos por los sensores fueron transmitidos hacia la boya y posteriormente almacenados en Firebase para su visualización mediante la plataforma web. La Fig. 18 presenta la evolución temporal de los valores de pH (Fig.18-a) y turbidez (Fig. 18-b) registrados durante las pruebas. Estas gráficas se utilizan para verificar la continuidad del flujo de información entre el nodo sensor, la boya, la base de datos y la interfaz de usuario.



Fig. 18. *Gráfica de datos de sensor de pH en el tiempo (a) y gráfica de datos de sensor de turbidez en el tiempo(b).*
Fuente: elaboración propia.

La plataforma web permitió verificar la recepción, almacenamiento y visualización de los datos enviados por el sistema. En la Fig. 19 se muestran, mediante tarjetas, los valores de RSSI, SNR, número de paquete, retardo, tamaño de la carga útil, nivel de batería y marca temporal de la última actualización. Esta validación confirma la integración funcional entre el nodo sensor, la boya, Firebase y la interfaz web.



Fig. 19. *Datos en tiempo real obtenidos desde la plataforma Web a través de Firebase. Fuente: elaboración propia.*

Tabla 6: Comparativa de pruebas realizadas entre este y otros trabajos relacionados

	Sistema propuesto	**Pruebas a 433 MHz [5]**	**Pruebas a 2.4 GHz [3]**	**Pruebas a 2.4 GHz [4]**
Entorno de pruebas	Piscina y 2 tipos de laguna	Piscina	Piscina	Pecera
Tecnología empleada	LoRa	TWS-433	Wi-Fi	Wi-Fi y Bluetooth
Método de medición	UW2OW (Nodo Sumergido y Nodo en superficie)	OW2OW (Ambos nodos en la superficie)	UW2UW (Ambos nodos sumergidos)	UW2OW (Nodo sumergido en pecera y Nodo en la superficie)
Profundidad evaluada	0.25, 0.5 y 0.8 m	Superficial	15 cm	Superficial (15cm)
Distancia máxima con recepción detectable	11.4 m (Piscina) 13 m (L. San Pablo) 8.5 m (L. Yahuarcocha)	9 m	16 cm	19 cm (Wi-Fi) 18 cm (Bluetooth)
Umbral empírico de RSSI observado	−116 dBm	−116 dBm	No presenta	−89 dBm
Otros factores evaluados	SNR, Retardo, Pérdida de paquetes e integración con plataforma web	Atenuación Espacio Libre	RTT Paquetes recibidos	Condiciones de agua salada

Fuente: elaboración propia

DISCUSIÓN

La validación realizada permitió comprobar la integración funcional del nodo sensor, la boya LoRa–Wi-Fi, Firebase y la plataforma web en los tres escenarios evaluados. El sistema recibió y visualizó información ambiental desde un nodo sumergido; sin embargo, el alcance y la continuidad de la recepción variaron según la profundidad y el escenario. Por ello, los resultados deben interpretarse como una validación operativa del prototipo y no como un modelo generalizable del canal subacuático.

La distancia aproximada de 12.5 m obtenida mediante MATLAB fue similar al orden de magnitud de algunas distancias máximas registradas experimentalmente. No obstante, esta proximidad no constituye una validación exacta del modelo. La simulación utiliza condiciones simplificadas y parámetros referenciales, mientras que las mediciones incorporan pérdidas adicionales por encapsulado, antenas, orientación, interfaz agua–aire y variabilidad ambiental. En consecuencia, el modelo se utiliza únicamente para contrastar la tendencia general de atenuación.

La diferencia entre la sensibilidad nominal de −137 dBm y el valor cercano a −116 dBm observado antes de la pérdida práctica del enlace responde a que ambas cantidades representan condiciones diferentes. El primer valor corresponde a la sensibilidad nominal del transceptor para SF12 y BW de 125 kHz bajo condiciones controladas. El segundo representa un umbral empírico del prototipo completo en los escenarios evaluados. Las pérdidas introducidas por el encapsulado, la antena, la adaptación de impedancia, la orientación, el contacto con el agua y la interfaz agua–aire reducen el margen disponible. Por esta razón, −116 dBm no se plantea como un umbral universal de LoRa, sino como un valor observado para la implementación desarrollada.

Los valores de SNR inferiores o cercanos a −20 dB deben interpretarse como condiciones marginales de recepción. La robustez de la modulación y la corrección de errores pueden permitir la recepción ocasional de paquetes en estas condiciones, pero los elevados porcentajes de pérdida evidencian que el enlace no permanece estable. En consecuencia, la recepción de uno o varios paquetes en el límite no es suficiente para considerar confiable una determinada distancia.

Los retardos medios, comprendidos aproximadamente entre 5 y 6.4 s, corresponden al intervalo medido entre la transmisión del paquete en el nodo sensor y su recepción en la boya de comunicaciones. Estos valores están relacionados principalmente con la configuración LoRa seleccionada para aumentar la robustez del enlace. El uso de SF12 incrementa la duración de cada símbolo y, en consecuencia, el tiempo de aire del paquete. Adicionalmente, el Coding Rate 4/8, el ancho de banda de 125 kHz, el preámbulo de 12 símbolos, el tamaño de la carga útil y el procesamiento realizado por los dispositivos contribuyen al retardo total. Estos tiempos pueden ser aceptables para el monitoreo periódico de variables ambientales de evolución lenta,

como pH y turbidez, pero limitan la utilización del sistema en aplicaciones de control en tiempo real.

Las pérdidas superiores al 60 % registradas cerca de las distancias máximas muestran la necesidad de diferenciar entre distancia con recepción detectable y distancia operativa. Las distancias máximas representan el límite en el cual todavía se recibió información, mientras que las distancias operativas constituyen condiciones más conservadoras para el despliegue. Para aplicaciones futuras podrían incorporarse almacenamiento local, retransmisiones, confirmación de recepción y redundancia temporal; sin embargo, estos mecanismos no fueron evaluados en el presente estudio.

Los trabajos relacionados muestran que el alcance de las comunicaciones electromagnéticas subacuáticas depende de la frecuencia, la configuración del enlace, la profundidad y el medio de prueba (ver Tabla 6). La propuesta presentada se diferencia principalmente por integrar un nodo sensor, una boya LoRa–Wi-Fi, almacenamiento en la nube y una plataforma web dentro de una arquitectura funcional. Las comparaciones de distancia deben interpretarse con precaución, debido a que los estudios utilizan antenas, frecuencias, geometrías y condiciones acuáticas diferentes.

Entre las limitaciones del estudio se encuentran el empleo de una única configuración LoRa durante la validación reportada, la ausencia de una caracterización electromagnética completa de las antenas dentro del encapsulado, la utilización de parámetros fisicoquímicos referenciales en la simulación y la variabilidad no controlada de los escenarios naturales. En consecuencia, los resultados son válidos para el prototipo y las condiciones evaluadas, pero no deben extrapolarse directamente a otros cuerpos de agua.

CONCLUSIONES

El trabajo permitió diseñar, implementar y validar funcionalmente una arquitectura de monitoreo subacuático de corto alcance compuesta por un nodo sensor sumergido, una boya de comunicaciones LoRa–Wi-Fi, una base de datos en la nube y una plataforma web. El prototipo adquirió, transmitió, almacenó y visualizó información ambiental en escenarios controlados y naturales de agua dulce.

La validación mostró que la profundidad y las condiciones de cada escenario afectan la distancia con recepción detectable y la continuidad del enlace. Las distancias máximas no representan necesariamente una operación confiable, debido a los elevados porcentajes de pérdida registrados cerca del límite. Por ello, el despliegue debe realizarse utilizando distancias operativas conservadoras y considerando que el umbral efectivo del sistema puede diferir de la sensibilidad nominal del transceptor.

La configuración utilizada genera retardos de varios segundos, por lo que la arquitectura resulta apropiada para monitoreo periódico de variables ambientales de baja dinámica, pero no para control en tiempo real. Como trabajo futuro se plantea optimizar el encapsulado y las antenas, incorporar almacenamiento local y mecanismos de retransmisión, y evaluar estrategias de comunicación para ampliar la cobertura. Estas alternativas deberán validarse experimentalmente antes de afirmar su factibilidad.

REFERENCIAS

[1] S. Ruiz and M. Muñoz, “Análisis de propagación de las comunicaciones ópticas subacuáticas.,” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Jul. 2022, doi: 10.47187/perspectivas.5.2.200.

[2] F. Cuzme Rodríguez, A. Velasco Suárez, M. Domínguez Limaico, L. Suárez Zambrano, H. Farinango Endara, and M. Mediavilla Valverde, “Application for the Study of Underwater Wireless Sensor Networks: Case Study,” *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 619 LNNS, pp. 124–136, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-25942-5_11.

[3] C. S. Sendra, “‘Comunicaciones inalámbricas subacuáticas a 2,4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia’ TRABAJO FINAL DE GRADO,” Universidad Politecnica de Valencia, Jan. 2011, Accessed: Aug. 04, 2024. [Online]. Available: https://riunet.upv.es/handle/10251/14605

[4] R. A. Arias, “Caracterización de sistemas de comunicación RF y ópticos en aplicaciones submarinas,” Universidad Politécnica de Catalunya BarcelonaTech, Jul. 2022, Accessed: Aug. 04, 2024. [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/handle/2117/372768

[5] M. Delgado, S. Chango, and Benavidez. Mateo, “Uso de la banda de 433MHz para comunicaciones subacuáticas en ambientes controlados,” *Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE)*, vol. 14, no. 2, pp. 1–6, Mar. 2024, doi: 10.24133/MASKAY.V14I2.3176.

[6] D. A. Jiménez Ballart, “Estudio de la cobertura de la modulación LoRa en la banda de 915[Mhz] en un ambiente urbano,” Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2018. Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168163

[7] H. M. Calero, “Red sensores multiservicio LPWAN LoRa, LoRaWAN, TTN y MQTT,” Universitat Oberta de Catalunya, Jan. 2023, Accessed: Aug. 04, 2024. [Online]. Available: https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/147334/6/caleroherruzo20TFM0123memoria.pdf

[8] F. Cuzme-Rodríguez, P. Otero, M. Á. Luque-Nieto, M. Domínguez-Limaico, and H. Farinango-Endara, “Underwater Wireless Sensor Networks and Cryptographic Applications,” *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1648 CCIS, pp. 46–58, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-18272-3_4.

[9] K. Lin, T. Hao, W. Zheng, and W. He, “Analysis of lora link quality for underwater wireless sensor networks: A semi-empirical study,” Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC, vol. 2019-December, pp. 120–122, Dec. 2019, doi: 10.1109/

APMC46564.2019.9038666.

[10] A. Dala and T. Arslan, "Design, Implementation, and Measurement Procedure of Underwater and Water Surface Antenna for LoRa Communication," *Sensors 2021*, Vol. 21, Page 1337, vol. 21, no. 4, p. 1337, Feb. 2021, doi: 10.3390/S21041337.

[11] A. Pozzebon, I. Cappelli, F. Campagnaro, R. Francescon, and M. Zorzi, "LoRaWAN Transmissions in Salt Water for Superficial Marine Sensor Networking: Laboratory and Field Tests," *Sensors*, vol. 23, no. 10, Art. no. 4726, 2023, doi: 10.3390/s23104726.

[12] Heltec, "HTIT-WB32LA_V3 LoRa Node Development Kit," *Heltec Automation*, vol. 1.1, Sep. 2022, Accessed: Apr. 12, 2024. [Online]. Available: https://heltec.org

[13] Firebase, "Firebase Realtime Database," Firebase. Accessed: Apr. 06, 2025. [Online]. Available: https://firebase.google.com/docs/database?hl=es-419

[14] M. Serrano, "¿Qué es la protección IP65? ¿En qué se diferencia con IP67? - IkolCrane," IkoCrane. Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: https://www.ikolcrane.com/aprender/que-es-la-proteccion-ip65

[15] S. J. Carrasquero, J. C. Marín, C. Muñoz, R. Vargas, C. Vargas, and P. Tuviñez, "Parámetros químicos medidos en las aguas de piscinas de los dos... | Download Scientific Diagram," *ResearchGate*, vol. 56, Jan. 2016, Accessed: Mar. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Parametros-quimicos-medidos-en-las-aguas-de-piscinas-de-los-dos-complejos-recreacionales_fig1_325654330

[16] J. Pabón, "Distribución y evaluación de la vegetación macrofítica en el lago de Yahuarcocha, Provincia de Imbabura," Universidad Técnica del Norte, Recursos Naturales Renovables, Dec. 2015, Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6943

[17] S. O. Nelson, "Dielectric Properties of Agricultural Products: Measurements and Applications," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 5, pp. 845–869, 1991, doi: 10.1109/14.99097.

[18] F. T. Ulaby and U. Ravaioli, FUNDAMENTALS OF APPLIED ELECTROMAGNETICS Eighth Edition. Pearson Education, 2023. Accessed: Mar. 22, 2025. [Online]. Available: www.pearsoned.com/permissions/.

[19] E. Navarro, "Desarrollo de un simulador de radar de apertura sintética y propuesta de diseño de radio frecuencia.," Esuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicaciones, 2017. Accessed: Mar. 23, 2025. [Online]. Available: https://oa.upm.es/52922/1/TFG_EDUARDO_NAVARRO_SABARIEGOS.pdf

[20] Semtech, "SX1261/2 Long Range, Low Power, Sub-GHz RF Transceiver," Datasheet. Accessed: Apr. 12, 2024. [Online]. Available: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R000000Un7F/yT.fKdAr9ZAo3cJLc4F2cBdUsMftpT2vsOICP7NmvMo

[21] A. Jaszczyszyn, A. G. Jaszczyszyn, M. Guiguet, and H. D. Ramón, "Comparación de una red LoRaWAN con modelos de propagación en un entorno con vegetación de soja," *Elektron*, vol. 8, no. 2, pp. 101–106, Dec. 2024, doi: 10.37537/rev.elektron.8.2.203.2024.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad CESMAG, Colombia, donde se presentaron los avances iniciales de este trabajo durante el 3.er Congreso SAFARIS TECH INTERNATIONAL 2025. El presente manuscrito amplía dicha versión mediante la implementación completa de la arquitectura, la validación en escenarios acuáticos y la discusión de sus limitaciones operativas. Asimismo, se agradece a la carrera de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Técnica del Norte, Ecuador, por facilitar los espacios de laboratorio para la calibración de los sensores; a Fernando Guerra Goyes, por facilitar la antena Ubiquiti Loco M2; y a Franco Elías Montezuma y Grace Gisel Cuasqui, por su colaboración durante las pruebas experimentales. MATLAB R2025a fue utilizado para implementar el modelo referencial de simulación.

FINANCIACIÓN

Los autores declaran que el desarrollo de este trabajo de investigación no cuenta con ningún tipo de financiación pública o privada, ni tampoco es parte de ningún proyecto económicamente soportado.

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Jaime Michilena-Calderón y Fabián Cuzme-Rodríguez;

Metodología: Jaime Michilena-Calderón y Fabián Cuzme-Rodríguez;

Software: Diego. Montezuma-Rosero;

Validación: Fabián Cuzme-Rodríguez, Jaime Michilena-Calderón y Luis Suárez-Zambrano; Análisis formal: Diego Montezuma-Rosero y Fabián Cuzme-Rodríguez;

Investigación: Diego Montezuma-Rosero; recursos: Jaime Michilena-Calderón y Luis Suárez-Zambrano;

Curación de datos: Fabián Cuzme-Rodríguez;

Redacción—borrador original: Diego A. Montezuma-Rosero;

Redacción—revisión y edición: Fabián Cuzme-Rodríguez, Jaime Michilena-Calderón y Luis Suárez-Zambrano;

Visualización: Diego Montezuma-Rosero;

Supervisión: Jaime Michilena-Calderón;

Administración del proyecto: Jaime Michilena-Calderón;

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Disponibilidad de materiales y datos: datos disponibles en GitHub, https://github.com/ArbeyCr/LoRa_Subacuatico