



Sistema IoT para monitoreo de la calidad del agua en cultivo intensivo de tilapia con Biofloc

IoT system for water-quality monitoring in intensive tilapia culture using Biofloc

García-Castro, Juan Carlos^{1*}

Gálvez-Díaz, Marco Armando¹

Riascos-Armas, Juan Orlando¹

Hernández-Torres, Edwin Augusto¹

Alva-Arévalo, Alberto¹

Acosta-Jacinto, Rubén Eusebio²

Ríos-Julcapoma, Milton²

¹Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática, Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú

²Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido: 02 Mar. 2026 | **Aceptado:** 11 Jul. 2026 | **Publicado:** 20 Jul. 2026

Autor de correspondencia*: jcgarcia@unsm.edu.pe

Cómo citar este artículo: García-Castro, J. C., Gálvez-Díaz, M.A, Riascos-Armas, J.O., Hernández-Torres, E.A., Alva-Arévalo, A., Acosta-Jacinto, R.E. y Ríos-Julcapoma, M. (2026). Sistema IoT para monitoreo de la calidad del agua en cultivo intensivo de tilapia con Biofloc. *Revista Científica de Sistemas e Informática*, 6(2), e1610. <https://doi.org/10.51252/rcsi.v6i2.1610>

RESUMEN

El monitoreo continuo de la calidad del agua es fundamental en sistemas intensivos de tilapia con tecnología biofloc, donde las variaciones fisicoquímicas pueden afectar la estabilidad y el desempeño productivo. En este estudio se implementó y evaluó un sistema basado en Internet de las Cosas (IoT) en la Estación Pesquera Ahuashiyacu, San Martín, Perú, para monitorear periódicamente la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y el ion nitrato. El sistema integró sensores conectados a un nodo IoT con transmisión inalámbrica hacia una plataforma web para almacenar y visualizar los datos. Entre noviembre de 2024 y septiembre de 2025 se registraron más de 22 000 mediciones. La temperatura se mantuvo entre 24 y 27 °C y el oxígeno disuelto entre 4 y 12 mg/L. También se identificaron registros atípicos de pH y un incremento puntual del ion nitrato. Los resultados evidenciaron la viabilidad operativa del sistema y su utilidad para el seguimiento técnico continuo de la calidad del agua.

Palabras clave: acuicultura inteligente; biofloc; internet de las cosas; monitoreo remoto; sensores

ABSTRACT

Continuous water quality monitoring is essential in intensive tilapia farming systems based on biofloc technology, where physicochemical variations can directly affect environmental stability and overall productive performance. In this study, an Internet of Things (IoT)-based system was implemented and evaluated at the Ahuashiyacu Fisheries Station, San Martín, Peru, to periodically monitor temperature, pH, dissolved oxygen, and nitrate ion. The system integrated sensors connected to an IoT node with wireless transmission to a web platform for storing, consulting, and visualizing the collected data. Between November 2024 and September 2025, more than 22,000 measurements were recorded during field operation. Temperature remained between 24 and 27 °C, whereas dissolved oxygen ranged from 4 to 12 mg/L throughout the monitoring period. Atypical pH records and a temporary increase in nitrate ion were also identified in the dataset. The results demonstrated the system's operational feasibility and its usefulness as a technological tool for the continuous technical monitoring and supervision of water quality conditions.

Keywords: smart aquaculture; biofloc; Internet of Things; remote monitoring; sensors



1. INTRODUCCIÓN

La tilapia es una de las especies más cultivadas en la acuicultura mundial debido a su rápido crecimiento, capacidad de adaptación y demanda comercial (Estrada-Godinez et al., 2023). En América Latina, su producción ha experimentado un crecimiento sostenido durante los últimos años (FAO, 2020; Hernandez-Martinez et al., 2025), particularmente mediante sistemas intensivos orientados a incrementar el rendimiento productivo y optimizar el aprovechamiento del agua (Ingle de la Mora, 2003). En este contexto, la calidad del agua constituye un factor determinante para el mantenimiento de condiciones apropiadas de cultivo (Pérez-Somarriba et al., 2025), debido a que variables como la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y los compuestos nitrogenados influyen en el crecimiento, la supervivencia y el desempeño productivo de los peces (Delgado-Santillán et al., 2025; López Acopa et al., 2023).

En los sistemas que emplean tecnología biofloc (BFT) (Landines, 2025), el control de estas variables adquiere especial relevancia por la actividad microbiana asociada con el reciclaje de nutrientes y la estabilidad del medio acuático (González-Reyes et al., 2024; Hernandez-Martinez et al., 2025). Esta tecnología permite mejorar el aprovechamiento de los recursos y reducir el recambio de agua (Bado et al., 2024; Bossier & Ekasari, 2017); sin embargo, su funcionamiento depende del seguimiento permanente de las condiciones fisicoquímicas del cultivo (Gálvez-Cantero et al., 2022; García-Castro & Ascón-Dionisio, 2022). Las variaciones de temperatura, oxígeno disuelto, pH y compuestos nitrogenados, así como la acumulación de materia orgánica y los cambios en la actividad microbiana, pueden alterar la estabilidad del sistema y afectar el desarrollo de la tilapia (Garza-Martínez et al., 2021; (Lee et al., 2017)).

Tradicionalmente, el control de la calidad del agua se realiza mediante mediciones manuales y registros periódicos, lo que limita la identificación oportuna de variaciones críticas y dificulta la disponibilidad continua de información para el seguimiento del cultivo (Medrano et al., 2024; Villaseñor-Reyes et al., 2026). Frente a esta situación, las tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT) constituyen una alternativa para automatizar la adquisición de datos, transmitir las mediciones de manera remota y presentarlas mediante plataformas digitales (Carbajal-Hernández et al., 2017; Encinas et al., 2017). En el contexto peruano, también se han desarrollado iniciativas de monitoreo ambiental mediante IoT en entornos acuícolas de la Amazonía, evidenciando el potencial de estas tecnologías para supervisar parámetros fisicoquímicos en lugares con restricciones de acceso e infraestructura tecnológica (Lino Villarán, 2022).

Aunque existen investigaciones sobre la aplicación de IoT en acuicultura, una parte importante de las propuestas se concentra en la adquisición de variables específicas o en la transmisión de datos dentro de entornos controlados y con infraestructura de comunicación estable (Fuentes Amín & Romero Torres, 2024; Miranda Almendaris et al., 2025). Aún se requieren soluciones orientadas al cultivo intensivo de tilapia con biofloc que integren, dentro de una misma arquitectura, la adquisición multiparamétrica, el procesamiento de las mediciones, la alimentación autónoma, la transmisión inalámbrica, el almacenamiento de los registros y su visualización mediante una plataforma web. Esta necesidad resulta particularmente relevante en contextos amazónicos, donde las limitaciones de conectividad y suministro eléctrico pueden dificultar el seguimiento continuo de las condiciones del agua.

En respuesta a esta necesidad, la presente investigación tuvo como objetivo desarrollar e implementar un sistema IoT para monitorear la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y el ion nitrato en un cultivo intensivo de tilapia con tecnología biofloc. La solución integró un nodo electrónico constituido por una placa LILYGO T-SIM7600G basada en ESP32, instalada sobre una placa de circuito impreso personalizada, sensores comunicados mediante RS485-Modbus RTU, una pantalla de visualización local, un sistema autónomo de alimentación solar y conectividad inalámbrica para transmitir los registros hacia una plataforma web. El sistema informático incorporó un servidor desarrollado con Django, una base de datos MySQL y una interfaz destinada a la consulta de las mediciones recientes, el seguimiento histórico y la

recuperación de la información. De esta manera, se buscó disponer de una solución tecnológica integrada que facilitara el seguimiento de las variables fisicoquímicas y apoyara la supervisión operativa del cultivo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño y alcance del estudio

La investigación fue de tipo aplicada, con un componente de desarrollo e integración tecnológica, orientada al diseño e implementación de una solución IoT para monitorear la calidad del agua en cultivos intensivos de tilapia con tecnología biofloc. El estudio se desarrolló en la Estación Pesquera Ahuashiyacu, ubicada en la región San Martín, Perú, donde el sistema fue instalado y validado funcionalmente en un estanque de geomembrana bajo condiciones reales de operación. El procedimiento se organizó en cinco componentes: arquitectura del sistema, implementación del hardware, implementación del software, integración hardware-software y validación en campo. Esta secuencia permitió construir el prototipo y verificar el flujo de adquisición, transmisión, almacenamiento y visualización de los datos.

2.2 Arquitectura general del sistema IoT

El sistema se organizó en cuatro componentes: nodo IoT de monitoreo, comunicación inalámbrica, servicios de gestión de datos y plataforma web. Esta distribución permitió ordenar el recorrido de la información desde su captura en el estanque hasta su consulta por el usuario.

El nodo integró los sensores de temperatura, pH, oxígeno disuelto e ion nitrato instalados en una estructura flotante. Las lecturas se recibieron mediante RS485-Modbus RTU en una PCB personalizada con la unidad LILYGO T-SIM7600G, un convertidor TTL-RS485, un RTC DS3231 y una pantalla OLED. La alimentación se realizó mediante un panel solar, un controlador de carga y una batería.

Los valores procesados se estructuraron en formato JSON y se enviaron mediante solicitudes HTTP POST. En el servidor, una API implementada en Django verificó la clave de acceso y los campos recibidos antes de almacenar los registros en una base de datos MySQL.

La plataforma web presentó las mediciones recientes, el historial y los gráficos de las variables, la ubicación del estanque y la opción de exportar los registros. La arquitectura implementada y la relación entre sus componentes se muestran en la **Figura 1**.

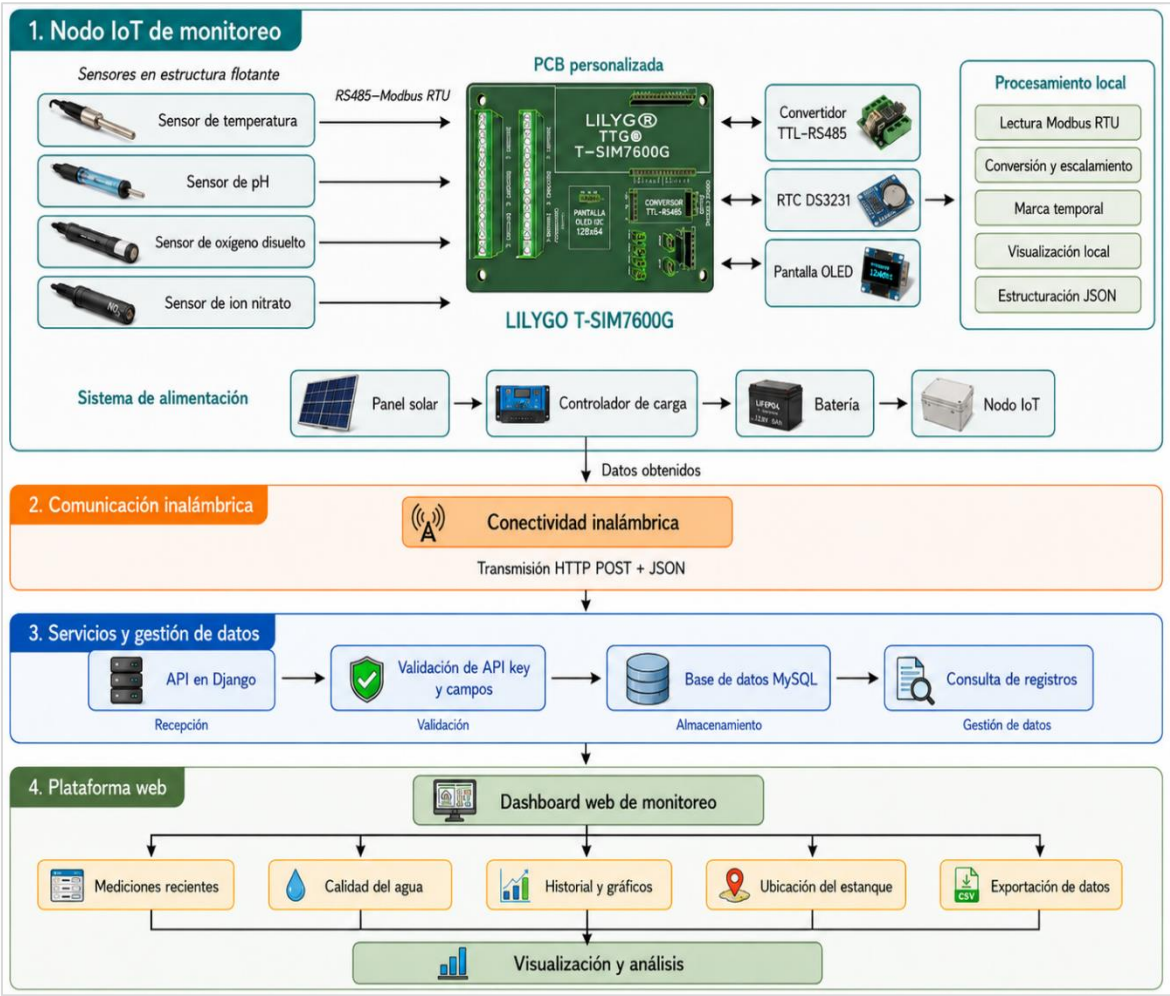


Figura 1. Arquitectura general del sistema IoT

2.3 Diseño e implementación del hardware

2.3.1 Componentes del nodo IoT

El nodo IoT se diseñó sobre una PCB personalizada destinada a integrar la unidad LILYGO T-SIM7600G, las interfaces de comunicación, los módulos auxiliares y las conexiones de alimentación. La placa incorporó un convertidor TTL-RS485 para la comunicación con los sensores mediante Modbus RTU, un reloj de tiempo real DS3231, una pantalla OLED I²C de 128 × 64 píxeles y bornes para la conexión de los dispositivos externos. Los principales componentes considerados en el diseño se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Componentes principales del hardware del sistema IoT

Componente	Descripción	Función en el sistema
Unidad de procesamiento	LILYGO T-SIM7600G	Lectura, procesamiento y transmisión de las mediciones.
PCB personalizada	Placa diseñada para el prototipo	Integración eléctrica y distribución de las conexiones.
Convertidor de comunicación	TTL-RS485	Intercambio de datos con los sensores mediante Modbus RTU.
Reloj de tiempo real	RTC DS3231	Incorporación de la referencia temporal de los registros.
Pantalla local	OLED I ² C 128 × 64	Visualización de las lecturas durante la operación.
Sensores	Temperatura, pH, oxígeno disuelto e ion nitrato	Medición de las variables fisicoquímicas del agua.
Gabinete de protección	Caja superior de control	Alojamiento de la PCB, los módulos y el cableado.

Panel solar	Módulo fotovoltaico	Generación de energía para el sistema.
Controlador de carga	Controlador digital	Regulación de la carga y alimentación del nodo.
Batería	Unidad de almacenamiento energético	Suministro de energía cuando no se disponía de alimentación directa.
Estructura flotante	Bastidor metálico con cuatro flotadores	Soporte y posicionamiento de las sondas dentro del estanque.

2.3.2 Diseño tridimensional del prototipo

A partir de estos componentes se elaboró un diseño tridimensional para definir la disposición general del gabinete superior, la PCB, el sistema de alimentación y la estructura destinada a sostener los sensores. La representación sirvió como referencia para organizar el ensamblaje físico y la ubicación de los elementos principales, como se muestra en la **Figura 2**.

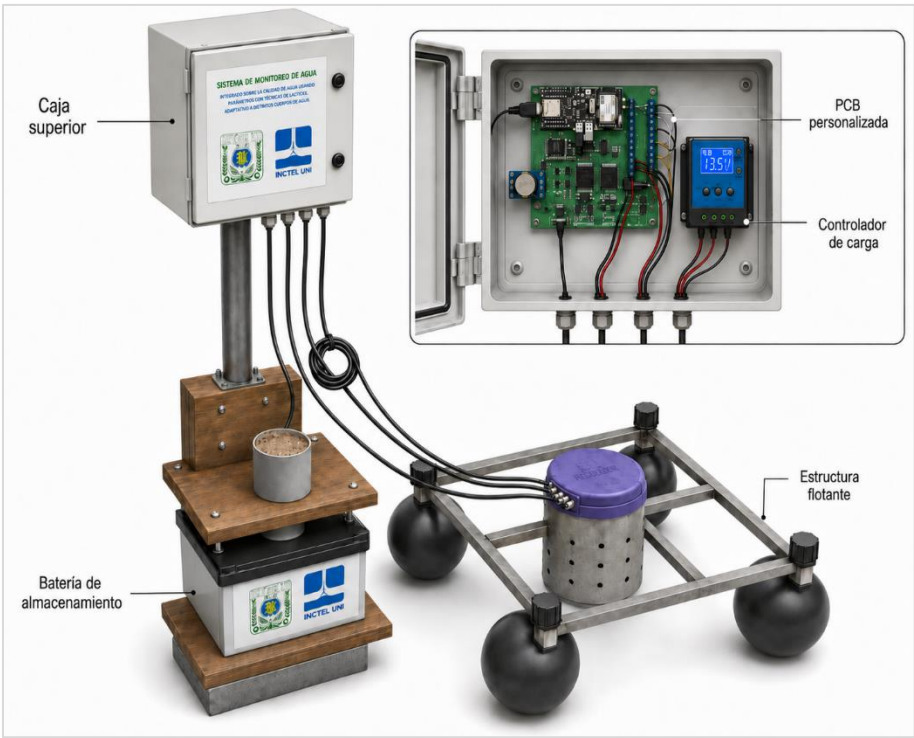


Figura 2. Diseño tridimensional del prototipo físico del sistema IoT

Nota. Representación tridimensional utilizada como guía para el ensamblaje y la disposición general del gabinete, la PCB personalizada, el sistema de alimentación y la estructura flotante.

2.3.3 Simulación funcional de las conexiones

Antes del ensamblaje se representaron también las conexiones funcionales del nodo mediante un entorno de simulación. Debido a que la PCB personalizada y algunos dispositivos del prototipo no se encontraban disponibles en su biblioteca, se emplearon componentes equivalentes: la unidad LILYGO T-SIM7600G fue sustituida por una placa ESP32, el RTC DS3231 por un DS1307 y las señales de pH, oxígeno disuelto e ion nitrato por módulos ajustables; para la temperatura se utilizó un DS18B20. La representación se presenta en la **Figura 3**.

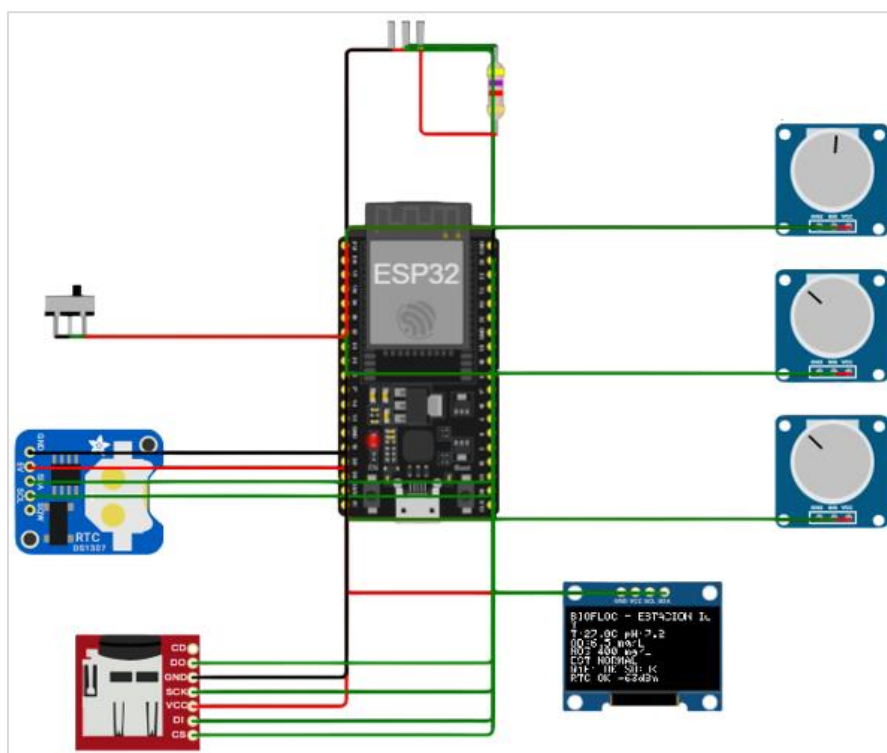


Figura 3. Representación funcional simulada de las conexiones del nodo IoT

Nota. La simulación empleó componentes equivalentes disponibles en el software para representar la lógica general de conexión; por ello, no corresponde al diseño físico exacto de la PCB personalizada.

Durante la simulación se modificaron los valores de las variables para comprobar su lectura y visualización conjunta en la pantalla OLED. La prueba permitió observar la respuesta del nodo ante los cambios introducidos y verificar la correspondencia básica entre las entradas simuladas y los valores mostrados. Las conexiones se simplificaron según las posibilidades del software, por lo que no reprodujeron la interfaz RS485-Modbus RTU utilizada en el prototipo físico.

2.3.4 Ensamblaje e instalación del prototipo

Una vez definidas la disposición y las conexiones, la PCB, el controlador de carga y el cableado se instalaron dentro del gabinete superior fijado a una estructura de soporte. El sistema energético se configuró mediante un panel solar conectado al controlador de carga y a una batería de almacenamiento, debido a la inestabilidad del suministro eléctrico en la Estación Pesquera Ahuashiyacu. Desde el gabinete se extendieron cuatro cables correspondientes a las sondas ubicadas en el estanque.

Los sensores se dispusieron en una estructura flotante formada por un bastidor metálico, cuatro elementos de flotación y un alojamiento cilíndrico central. Los cables ingresaron por el costado de la cubierta y las sondas se distribuyeron en el interior del alojamiento, manteniéndose en contacto con el agua durante el monitoreo. Esta configuración favoreció una posición relativamente estable y permitió retirar las sondas para efectuar actividades de inspección, limpieza y calibración.

2.3.5 Verificación y calibración de los sensores

Como parte de la verificación de los sensores, primero se prepararon las soluciones tampón de pH 4,00, 6,86 y 9,18 utilizadas como valores de referencia (**Figura 4a**) (Encinas et al., 2017; García-Castro & Ascón-Dionisio, 2022). Luego, la sonda se introdujo en cada solución para comprobar su respuesta (**Figura 4b**) y las lecturas obtenidas se contrastaron con las registradas por un medidor portátil (**Figura 4c**). A partir de esta comparación, se realizaron los ajustes correspondientes mediante la interfaz de calibración (**Figura 4d**). Para las demás sondas se efectuaron actividades de inspección y limpieza orientadas a retirar residuos

adheridos que pudieran afectar su funcionamiento durante el monitoreo. El procedimiento aplicado al sensor de pH se presenta en la **Figura 4**.

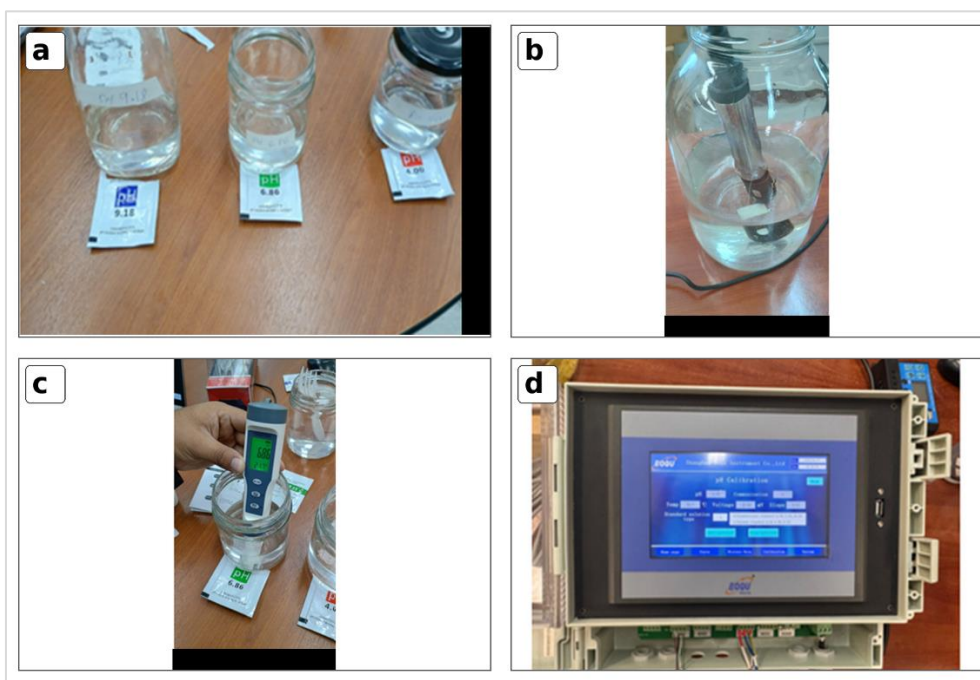


Figura 4. Verificación y calibración del sensor de pH

Nota. El procedimiento comprendió la inmersión de la sonda en soluciones tampón, la comparación de las lecturas con un medidor portátil y el ajuste mediante la interfaz de calibración.

2.4 Diseño e implementación del software

2.4.1 Desarrollo del backend y la API

El componente de software se desarrolló en Python mediante el framework Django, encargado de gestionar la recepción, el procesamiento y la consulta de las mediciones generadas por el sistema. Para el ingreso de los datos se implementó una API con un punto de acceso destinado a recibir solicitudes HTTP POST cuyo contenido se estructuró en formato JSON. Los campos considerados correspondieron a las variables de temperatura, pH, oxígeno disuelto e ion nitrato, junto con la información necesaria para identificar temporalmente cada registro.

La lógica del backend se organizó para interpretar los datos recibidos, comprobar su estructura y gestionar su incorporación al sistema. Esta implementación permitió separar el proceso de recepción de las mediciones de las funciones destinadas a su almacenamiento y presentación en la plataforma web.

2.4.2 Validación y almacenamiento de los datos

Antes de registrar una medición, el servidor verificó la clave de acceso incluida en la solicitud y la presencia de los campos requeridos. Cuando la información cumplía con las condiciones establecidas, los valores eran procesados y almacenados; en caso contrario, la solicitud era rechazada para evitar el ingreso de registros incompletos o no autorizados.

La información se organizó en una base de datos MySQL, en la cual se conservaron los valores correspondientes a las cuatro variables monitoreadas y su referencia temporal. Esta estructura permitió mantener un historial de mediciones y recuperar los registros según las necesidades de consulta de la plataforma. Para las tareas de administración, revisión y mantenimiento de la base de datos se utilizó phpMyAdmin.

2.4.3 Desarrollo de la plataforma web

La plataforma web se diseñó para facilitar la consulta de la información registrada por el sistema IoT. La interfaz presentó las mediciones recientes de temperatura, pH, oxígeno disuelto e ion nitrato, permitiendo al usuario revisar el estado de las variables monitoreadas desde un entorno centralizado.

También se incorporaron funciones para consultar el historial de registros y representar gráficamente el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo. Estas opciones facilitaron la identificación de variaciones entre mediciones y la revisión de la información correspondiente a periodos anteriores. La plataforma incluyó, además, la ubicación del estanque monitoreado y una función para exportar los registros disponibles.

2.4.4 Acceso y consulta de la información

El acceso a la plataforma se realizó mediante un navegador web, lo que permitió consultar las mediciones sin depender de una aplicación instalada localmente. Desde la interfaz, el usuario podía visualizar los valores recientes, revisar el historial, observar las gráficas y descargar la información almacenada para su análisis posterior.

Las funciones implementadas se orientaron a centralizar la información generada durante el monitoreo y facilitar su disponibilidad para el personal encargado del seguimiento técnico. La integración completa entre el nodo de sensores, el servidor, la base de datos y la plataforma web, así como las pruebas efectuadas para comprobar su funcionamiento conjunto, se describen en el apartado 2.5.

2.5 Integración y validación funcional del sistema IoT

2.5.1 Integración del nodo con el servidor web

La integración del sistema se realizó mediante la conexión del nodo IoT con el servidor web desarrollado en Django. Después de adquirir las mediciones de temperatura, pH, oxígeno disuelto e ion nitrato, la unidad de procesamiento organizó los valores para su transmisión mediante comunicación inalámbrica. Los datos se estructuraron en formato JSON y se enviaron al servidor a través de solicitudes HTTP POST.

Al recibir una solicitud, el servidor verificó la clave de acceso y la presencia de los campos requeridos. Los registros aceptados fueron almacenados en la base de datos MySQL y quedaron disponibles para su consulta desde la plataforma web. De esta manera, se estableció un flujo continuo entre la adquisición de las variables, su recepción en el servidor, el almacenamiento y la posterior visualización. Este proceso se representa en la **Figura 5**.

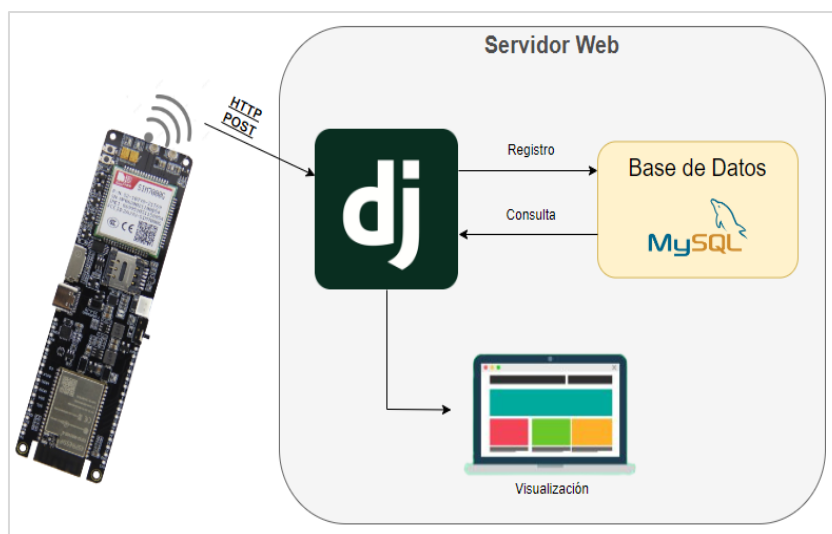


Figura 5. Flujo de integración entre el nodo IoT y el servidor web

Nota. Las mediciones obtenidas por el nodo fueron enviadas mediante solicitudes HTTP POST, procesadas por el servidor desarrollado en Django, almacenadas en MySQL y presentadas en la plataforma web.

2.5.2 Pruebas de integración del sistema

Las pruebas de integración se orientaron a comprobar el funcionamiento conjunto de la estación con sensores, el servidor web, la base de datos y la interfaz de consulta. Para ello, se generaron lecturas desde el nodo y se verificó su envío hacia el punto de acceso configurado en el servidor. Durante este procedimiento se revisó la recepción de las solicitudes, la validación de los datos y la creación de los registros correspondientes en MySQL.

Posteriormente, se comprobó que las mediciones almacenadas pudieran recuperarse y mostrarse en la plataforma. La revisión comprendió la visualización de los valores recientes, la consulta del historial y la representación gráfica de las variables. También se verificó la disponibilidad de la información para su exportación, con el propósito de confirmar que los datos podían ser recuperados para análisis posteriores.

Las pruebas permitieron revisar el recorrido de la información en las siguientes etapas: lectura de los sensores, procesamiento en el nodo, transmisión al servidor, validación de la solicitud, almacenamiento en la base de datos y presentación al usuario. Cuando se identificaron interrupciones o inconsistencias, se revisaron las conexiones, la configuración de comunicación y la estructura de los datos enviados antes de repetir la prueba.

2.5.3 Instalación y validación en campo

Una vez comprobada la comunicación entre los componentes, el sistema se instaló en un estanque de geomembrana con tecnología biofloc de la Estación Pesquera Ahuashiyacu. El gabinete de control y el sistema de alimentación se ubicaron sobre la estructura de soporte, mientras que el conjunto flotante se colocó en el estanque para mantener las sondas en contacto con el agua durante el monitoreo.

La validación funcional se realizó bajo las condiciones reales de operación del módulo acuícola. Durante esta etapa se verificó la adquisición de las cuatro variables, la transmisión de las mediciones, su registro en la base de datos y la disponibilidad de la información en la plataforma web. También se efectuaron revisiones periódicas del estado de las sondas y de las conexiones, debido a que la exposición prolongada al agua y a la materia orgánica podía afectar la estabilidad de las lecturas.

La evaluación se centró en comprobar el funcionamiento integrado del sistema y la continuidad del flujo de datos. Por tanto, correspondió a una validación tecnológica y operativa, y no a una evaluación metrológica de la exactitud de los sensores frente a instrumentos certificados.

2.5.4 Transferencia operativa

Como parte de la puesta en funcionamiento, se explicó al personal vinculado con el proyecto el uso de la plataforma y la consulta remota de las mediciones. La socialización comprendió la revisión de los valores recientes, el acceso al historial, la interpretación de las gráficas y la recuperación de los registros. Esta actividad buscó facilitar la utilización de la información generada para el seguimiento técnico de la calidad del agua.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Implementación física del prototipo IoT

La implementación permitió obtener un prototipo funcional compuesto por el nodo electrónico, el gabinete de protección, el sistema de alimentación y la estructura flotante para las sondas. El conjunto se instaló en el módulo biofloc de la Estación Pesquera Ahuashiyacu, manteniendo los componentes electrónicos resguardados y los sensores en contacto con el agua. La disposición final permitió integrar las cuatro sondas, el sistema fotovoltaico y la unidad de control en una estructura adecuada para su operación en campo. Los principales elementos del prototipo y su instalación se muestran en la **Figura 6**.

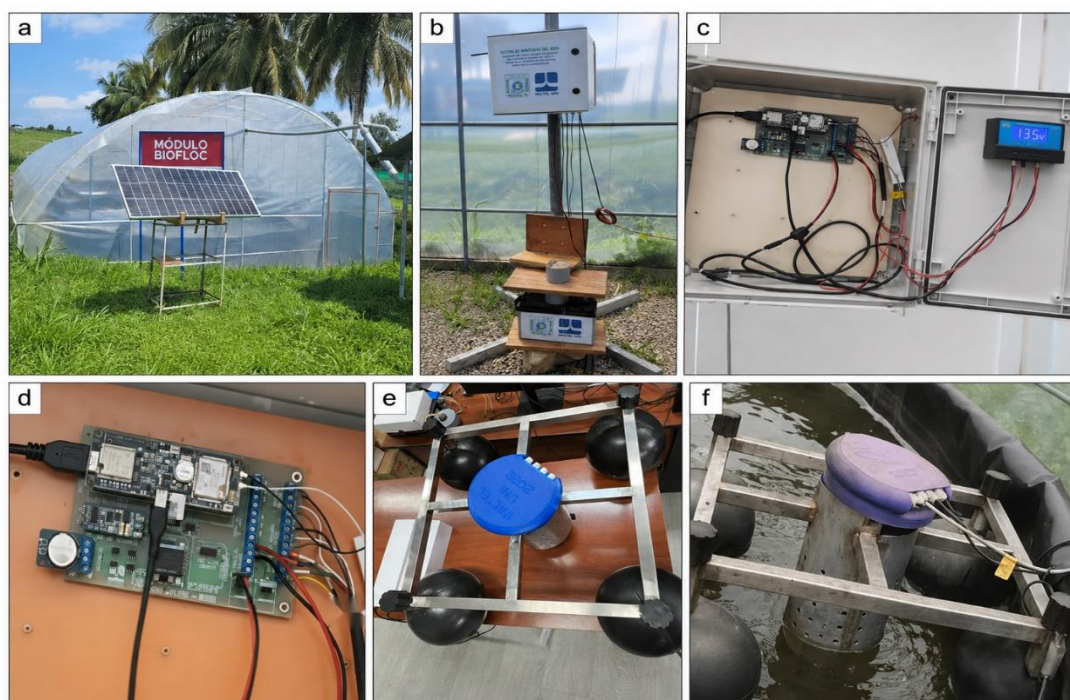


Figura 6. Implementación física del prototipo IoT en el módulo biofloc

Nota. a) Módulo biofloc y sistema de alimentación solar; b) estructura de soporte con el gabinete de control y la batería; c) disposición interna de los componentes electrónicos; d) PCB personalizada; e) estructura flotante ensamblada; f) estructura flotante instalada en el estanque.

3.2 Funcionamiento de la plataforma web

La plataforma web permitió centralizar la información generada por el nodo IoT y ponerla a disposición del usuario mediante una interfaz de consulta. El sistema incluyó un panel de inicio, un módulo de monitoreo de calidad de agua con visualización de registros, indicadores de las variables y ubicación del módulo, y un módulo de reportes para la consulta tabular y descarga de los datos en formato CSV. Las principales vistas implementadas se muestran en la **Figura 7**.

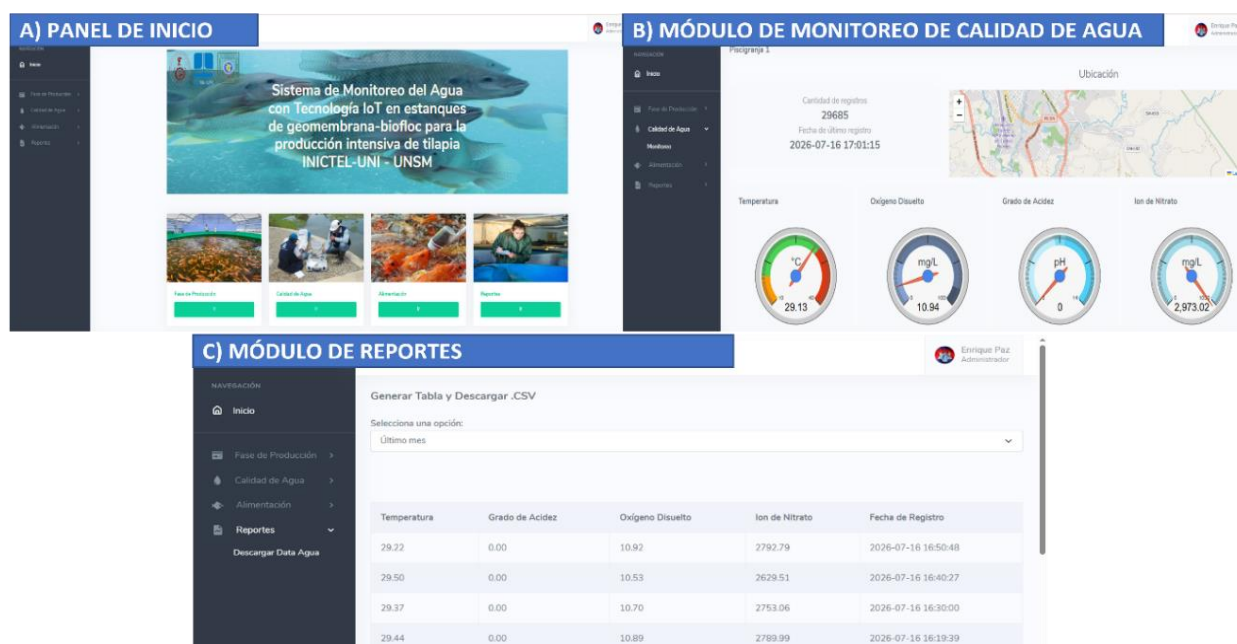


Figura 7. Implementación física del prototipo IoT en el módulo biofloc

Nota. a) Panel de inicio; b) módulo de monitoreo de calidad de agua, con cantidad de registros, fecha del último registro, ubicación e indicadores de temperatura, oxígeno disuelto, grado de acidez e ion nitrato; c) módulo de reportes para consulta tabular y descarga de datos en formato CSV.

3.3 Comportamiento general de las variables fisicoquímicas

La **Tabla 2** resume el comportamiento observado de las variables fisicoquímicas durante el periodo de monitoreo, destacando sus rangos predominantes, los valores extremos y los eventos que requirieron una revisión particular. En general, la temperatura presentó el comportamiento más estable, mientras que el pH, el oxígeno disuelto y el ion nitrato registraron variaciones relevantes durante abril de 2025.

Tabla 2. Resumen de resultados por variable fisicoquímica (rango observado y eventos relevantes)

Parámetro	Rango/Comportamiento	Evento relevante	Consideración
Temperatura (°C)	Predominó 24–27 (estable y adecuado)	No se observaron valores extremos fuera de lo recomendado.	Fue la variable con mayor estabilidad temporal.
pH	Osciló alrededor de 7.5–8.2	Pico anómalo en abril de 2025 (31.88), atribuible a error/calibración.	El registro fue identificado para revisión por posible error de lectura, calibración o procesamiento.
Oxígeno disuelto (mg/L)	Varió entre 4–12; tendencia decreciente hacia abril	Mínimo de 4.78 mg/L en abril; se recomendó reforzar aireación.	La disminución evidenció la necesidad de reforzar el control de la aireación.
Ion nitrato (mg/L)	Se mantuvo <1000 en el periodo	Abril 2025: 990.22 mg/L (cercano al umbral crítico).	El registro se aproximó al límite de referencia considerado y requirió seguimiento.

La temperatura se mantuvo estable durante la mayor parte del periodo, sin cambios abruptos. En contraste, el pH registró un valor de 31.88 en abril de 2025, incompatible con su escala convencional, por lo que fue considerado un dato anómalo posiblemente asociado con errores de calibración, lectura o procesamiento.

El oxígeno disuelto descendió hasta 4.78 mg/L en abril, evidenciando una menor disponibilidad de oxígeno. Esta variación pudo relacionarse con la biomasa, la actividad microbiana y la acumulación de materia orgánica, lo que resalta la importancia de mantener una aireación adecuada.

El ion nitrato alcanzó 990.22 mg/L en abril de 2025. Aunque permaneció por debajo del límite considerado, su proximidad indicó una acumulación relevante de compuestos nitrogenados. En conjunto, abril presentó la mayor variabilidad de las condiciones fisicoquímicas del agua.

3.4 Evolución temporal de las variables fisicoquímicas

La **Figura 8** complementa los resultados anteriores al mostrar la evolución temporal de la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y el ion nitrato durante el periodo analizado. En términos generales, la temperatura presentó variaciones moderadas, mientras que el oxígeno disuelto mostró una disminución entre 2024 y 2025. Por otro lado, el pH y el ion nitrato registraron sus mayores variaciones en abril de 2025, coincidiendo con los eventos relevantes identificados previamente.

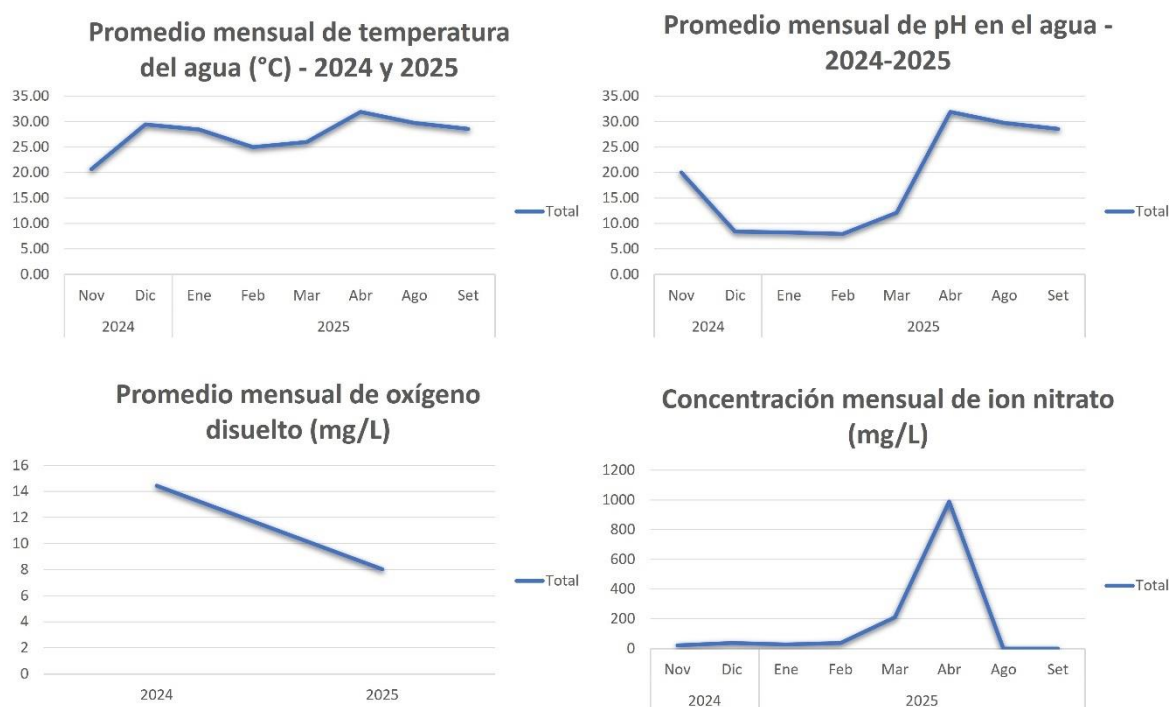


Figura 8. Evolución temporal de las variables fisicoquímicas monitoreadas

3.5 Funcionamiento general del sistema

Durante la operación, el sistema registró la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y el ion nitrato, vinculando cada lectura con su marca temporal y almacenándola para consultas posteriores. La plataforma mostró las mediciones recientes, el historial de registros y la ubicación del estanque, además de permitir la descarga de la información en formato CSV. En conjunto, estos resultados confirmaron el funcionamiento integrado del nodo electrónico, los servicios de gestión de datos y la interfaz web.

3.6 Discusión

La integración del nodo electrónico, los servicios de gestión de datos y la plataforma web permitió disponer de una solución unificada para registrar y consultar las variables fisicoquímicas del cultivo de tilapia con tecnología biofloc. El acceso al historial facilitó la revisión de cambios temporales y la detección de mediciones que requerían comprobación, como el valor anómalo de pH registrado en abril de 2025. Este resultado es consistente con lo señalado por Zhu et al. (2010) y Piamba-Mamian et al. (2020), quienes destacan la utilidad de los sistemas de monitoreo remoto para mejorar la disponibilidad de información sobre la calidad del agua en entornos acuícolas.

La temperatura presentó un comportamiento relativamente estable durante el periodo analizado, mientras que el oxígeno disuelto mostró una tendencia descendente. Esta última variable requiere especial atención en sistemas intensivos, debido a que su concentración puede verse afectada por la biomasa cultivada, la actividad microbiana y la descomposición de materia orgánica. Zhou et al. (2022) resaltan la importancia de vigilar este parámetro para identificar oportunamente condiciones desfavorables, mientras que Quintero Sanchez et al. (2024) señalan que el seguimiento de las variables fisicoquímicas contribuye a mantener la estabilidad de los sistemas biofloc.

El ion nitrato alcanzó su mayor valor en abril de 2025, periodo en el que también se observó una mayor variabilidad en los registros. No obstante, este resultado debe interpretarse con cautela, debido a la diferencia considerable respecto de los demás meses. De igual manera, el valor de pH de 31,88 se encontró fuera de la escala físicamente admisible para esta variable, por lo que se consideró un dato anómalo. Estas mediciones podrían relacionarse con problemas de calibración, acondicionamiento de las sondas,

conversión de la señal o procesamiento de los datos. Su identificación evidencia la necesidad de incorporar reglas automáticas de validación, alertas ante valores fuera de rango y procedimientos periódicos de limpieza y recalibración.

La solución desarrollada facilitó la consulta remota, la revisión histórica y la exportación de los registros, reduciendo la dependencia de anotaciones manuales. Este resultado coincide con las aplicaciones de IoT en acuicultura descritas por Gamarra Moreno et al., (2024). Sin embargo, la evaluación se concentró en la integración funcional del sistema y en el análisis de los datos almacenados, sin medir cuantitativamente aspectos como disponibilidad, pérdida de paquetes, latencia, consumo energético o precisión de los sensores. Por ello, futuras evaluaciones deberían incorporar estas métricas y contrastar las lecturas con instrumentos de referencia después de la calibración, a fin de determinar el desempeño del sistema durante periodos prolongados de operación.

CONCLUSIONES

El sistema IoT desarrollado permitió registrar, procesar, almacenar y visualizar la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y el ion nitrato en un cultivo intensivo de tilapia con tecnología biofloc. Los datos recopilados facilitaron el análisis de las variaciones temporales y la detección de registros atípicos, mostrando la utilidad de la solución como apoyo para el seguimiento de las condiciones fisicoquímicas del agua.

La integración del nodo electrónico, la comunicación inalámbrica, los servicios de gestión de datos y la plataforma web centralizó la consulta de las mediciones recientes, el acceso al historial y la exportación de los registros. De este modo, la solución redujo la dependencia de anotaciones manuales y facilitó la supervisión operativa del módulo acuícola. No obstante, la evaluación realizada comprobó principalmente el funcionamiento integrado del sistema y no su desempeño metrológico.

Como trabajo futuro, se recomienda evaluar la solución durante periodos más prolongados y bajo diferentes condiciones de operación, incorporando métricas de disponibilidad, latencia, pérdida de datos, consumo energético y precisión de los sensores después de su calibración. También sería pertinente implementar alertas automáticas y modelos predictivos que contribuyan a identificar oportunamente variaciones críticas en la calidad del agua.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Estación Pesquera Ahuashiyacu y a la Universidad Nacional de San Martín por las facilidades brindadas para la ejecución de las pruebas en campo, así como al equipo técnico y estudiantil que colaboró en la instalación, validación y puesta en marcha del prototipo. También se reconoce el apoyo institucional de INICTEL-UNI en aspectos de diseño y pruebas.

FINANCIAMIENTO

El proyecto se financió con el apoyo del concurso de proyectos para docentes aprobada con resolución N°611-2022-UNSM/CU-R, y con apoyo de Unidad ejecutora 002-INICTEL-UNI en base al convenio aprobado con resolución N°331-2026-UNSM/CU-R.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la materia del trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Conceptualización: García-Castro, J.C. y Acosta-Jacinto, R.E.; Curación de Datos: Gálvez-Díaz, M.A. y Hernández-Torres, E.A.; Análisis Formal: Riascos-Armas, J.O. y Alva-Arévalo, A.; Adquisición de Fondos: García-Castro, J.C. y Acosta-Jacinto, R.E.; Investigación: García-Castro, J.C. y Acosta-Jacinto, R.E.; Metodología: Rios-Julcapoma, M. y Gálvez-Díaz, M.A.; Administración del Proyecto: García-Castro, J.C. y Acosta-Jacinto, R.E.; Recursos: Gálvez-Díaz, M.A. y Rios-Julcapoma, M.; Desarrollo de Hardware: Acosta-Jacinto, R.E. y Rios-Julcapoma, M.; Desarrollo de Software: Riascos-Armas, J.O. y Acosta-Jacinto, R.E.; Supervisión: García-Castro, J.C. y Acosta-Jacinto, R.E.; Validación: Hernández-Torres, E.A. y Alva-Arévalo, A.; Visualización: Gálvez-Díaz, M.A. y García-Castro, J.C.; Redacción del Borrador Original: Riascos-Armas, J.O.; y Redacción, Revisión y Edición: Acosta-Jacinto, R.E.

REFERENCIAS

- Bado, M., Carneiro, J., & Guerra, I. (2024). Impacto de la tecnología BIOFLOC en el reciclaje de nutrientes, el bienestar animal y la sostenibilidad del ecosistema. *Revista Investigaciones Agropecuarias*, 7(1), 88–98. <https://doi.org/10.48204/j.ia.v7n1.a6548>
- Bossier, P., & Ekasari, J. (2017). Biofloc technology application in aquaculture to support sustainable development goals. *Microbial Biotechnology*, 10(5), 1012–1016. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12836>
- Carbajal-Hernández, J. J., Sánchez-Fernández, L. P., Hernández-Bautista, I., & Hernández-López, J. (2017). Modelo basado en redes neuronales artificiales para la evaluación de la calidad del agua en sistemas de cultivo extensivo de camarón. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(5), 71–89. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-05>
- Delgado-Santillán, L. Y., Trigos, M., Mamani M., G. C., Mendoza, L., & De La Cruz, R. (2025). Water quality and production parameters of gray tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivation in earth pond. *AgroScience Research*, 3(1), 27–38. <https://doi.org/10.17268/agrosci.2025.003>
- Encinas, C., Ruiz, E., Cortez, J., & Espinoza, A. (2017). Design and implementation of a distributed IoT system for the monitoring of water quality in aquaculture. *2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/WTS.2017.7943540>
- Estrada-Godinez, J. A., Rodríguez-Montes de Oca, G. A., Pacheco-Marges, M. del R., & Bañuelos-Vargas, M. I. (2023). Desempeño productivo de hembras de tilapia, *Oreochromis niloticus*, en diferentes métodos de cultivo. *Revista MVZ Córdoba*, 28(3), e3251. <https://doi.org/10.21897/rmvz.3251>
- FAO. (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020* (La sostenibilidad en acción. (ed.); La sosteni). FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
- Fuentes Amín, O. C., & Romero Torres, M. E. (2024). Diseño de un sistema de monitoreo de calidad de agua basado en IoT, aplicado a unidades de producción acuícola. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 19(1), 47–58. <https://doi.org/10.18359/rfcb.7395>
- Gálvez-Cantero, L., Julián-Ricardo, M. C., & Ramos-Sánchez, L. B. (2022). El Biofloc en la acuicultura. *Centro Azúcar*, 49(2), 136–146.
- Gamarra Moreno, A. H., Taipe Castro, J. A., Arellano Vilchez, M. A., Lozano Paulino, Y. D., & Suazo Maldonado, Á. C. (2024). Sistema de monitoreo basado en IoT para la medición de calidad de agua de riego. *Prospectiva Universitaria*, 20(1), 31–39. <https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2023.20.1972>
- García-Castro, J., & Ascón-Dionisio, G. (2022). Sistema automatizado de monitoreo de parámetros físico-químicos en producción de alevines Gamitana (*Colossoma macropomum*). *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 2(1). <https://doi.org/10.51252/raa.v2i1.240>
- Garza-Martínez, M. Á., Alonzo-Rojo, F., Valenzuela-García, A. A., Nava-Camberos, U., Salcido-Gameros, D., Estrada-Arellano, J. R., & Cardoza-Martínez, G. F. (2021). Aptitud territorial para cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) con tecnología biofloc en el estado de Durango, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(3). <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.3049>
- González-Reyes, E., Espinosa-Chaurand, D., Hernández-Almeida, O., Cortés-Sánchez, A., Palomino-

- Hermosillo, A., & Peraza-Gómez, V. (2024). Biofloc en el tratamiento de aguas residuales del cultivo de peces. *Abanico Veterinario*, 15. <https://doi.org/10.21929/abavet2024.18>
- Hernandez-Martinez, I. Y., Salazar Sánchez, M. D. R., & Pereira Flores, L. F. (2025). Eficiencia productiva de la tilapia oreochromis sp criados en estanque de geomembrana con tecnología biofloc y raceways. *BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS*, 23(1), 1–8. <https://doi.org/10.24054/bistua.v23i1.2936>
- Ingle de la Mora, G. (2003). Evaluación de algunos parámetros de calidad del agua en un sistema cerrado de recirculación para la acuicultura, sometido a diferentes cargas de biomasa de peces. *Hidrobiológica*, 13(4), 247–253.
- Landines, M. A. (2025). Tecnología biofloc en la acuicultura: estado de avance, desarrollo y aplicación. *Orinoquia*, 27(1). <https://doi.org/10.22579/20112629.826>
- Lee, C., Kim, S., Lim, S.-J., & Lee, K.-J. (2017). Supplemental effects of biofloc powder on growth performance, innate immunity, and disease resistance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 20(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s41240-017-0059-7>
- Lino Villarán, A. H. (2022). Sistema de monitoreo de ambiente para el control de las condiciones ambientales de las granjas acuícolas de la selva del Perú basado en Internet de las Cosas. *Interfases*, 16(016), 140–167. <https://doi.org/https://doi.org/10.26439/interfases2022.n016.6026>
- López Acopa, N. de J., Antonio Cruz, R. del C., Méndez de los Santos, N., Jesús de la Cruz, K. de M., & Romellón Cerino, M. J. (2023). Evaluación de los parámetros para la calidad del agua en el cultivo de tilapia. *REVISTA IPSUMTEC*, 6(5), 52–59. <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v6i5.212>
- Medrano, K., Hernández, E., Tejada, R., & Moreno, A. (2024). Tecnologías IoT para el monitoreo de la calidad del agua en la acuicultura. *European Public & Social Innovation Review*, 10, 1–16. <https://doi.org/10.31637/epsir-2025-929>
- Miranda Almendaris, R. H., Acebo Vera, A. A., Cevallos Zhunio, J. E., & Mejía Burgos, L. I. (2025). Prototipo de IoT para monitorear los parámetros del agua de un cultivo acuícola. *Investigación, Tecnología e Innovación*, 17(24), 34–45. <https://doi.org/10.53591/iti.v17i24.2539>
- Pérez-Somarriba, E. B., Hernández-Espinoza, K. M., Avendaño-Díaz, M. M., & Hernández-Bautista, M. F. (2025). Uso de agua residual del cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) como una alternativa productiva en el cultivo de maíz (*Zea mays* L). *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 10(20), 2484–2491. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v10i20.21912>
- Piamba-Mamian, T. M., Zambrano, L. E., Montaña Rúales, L. A., & Rojas Gonzales, F. A. (2020). Implementación de un sistema de monitoreo IoT aplicado a una piscicultura de trucha. *Informador Técnico*, 85(1). <https://doi.org/10.23850/22565035.2937>
- Quintero Sanchez, Y. D., Sanchez Portillo, S., Bracho Colina, E., Salazar Sanchez, M. del R., Pereira Florez, L. F., & Hernandez Martinez, I. (2024). Evaluación de la producción de tilapia roja (*oreochromis* sp) criados con tecnología biofloc. *Revista EIA*, 21(42). <https://doi.org/10.24050/reia.v21i42.1761>
- Villaseñor-Reyes, G., Nájera-Alemán, P., Acosta-Pérez, V.-J., Rabling-Olivera, J., González-Vázquez, J., Ubilla-Paredes, K.-P., Bell-Palacios, I.-S., Gómez-de-Anda, F.-R., & Zepeda-Velázquez, A.-P. (2026). Correlación de la calidad del agua y la comunidad parasitaria en *Cyprinus carpio* var. koi en Pachuca de Soto, Hidalgo, México. *Revista Peruana de Investigación Agropecuaria*, 5(1), e145. <https://doi.org/10.56926/repia.v5i1.145>
- Zhou, X., Wang, J., Huang, L., Li, D., & Duan, Q. (2022). Modelling and controlling dissolved oxygen in recirculating aquaculture systems based on mechanism analysis and an adaptive PID controller. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106583. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106583>
- Zhu, X., Li, D., He, D., Wang, J., Ma, D., & Li, F. (2010). A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71, S3–S9. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.10.004>