

**Plataforma web basada en IoT para el monitoreo de la calidad de agua en Unidades de
Producción Acuícola**

Oscar Camilo Fuentes Amín

Asesor

Ing. Mariano Esteban Romero Torres

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI

Maestría en Gestión de Tecnología de Información

2026

Dedicatoria

A las comunidades rurales que tienen un negocio productivo y que diariamente se enfrentan a los desafíos del sector acuícola y que mantienen el esfuerzo para salir adelante.

Agradecimientos

A Dios en su infinita misericordia.

A mi esposa Gina Marcela Reyes Castellar, por su apoyo incondicional, la paciencia y la motivación constante durante cada etapa de este proceso académico.

A mis padres Gloria Esther Amín Paternina y Edwin Manuel Fuentes Miranda y mis hermanos Edwin Nayib Fuentes Amín y Gloria Liliana Fuentes Amín, por la confianza depositada en mi crecimiento profesional y su apoyo incondicional.

Al ingeniero Mariano Esteban Romero Torres, quien me acompañó como guía durante mis estudios.

A mis compañeros de la escuela ECBTI, liderados por la Dra. Morly del Carmen Agámez Geney, quienes me ayudaron a gestionar el proceso de contextualización con los acuicultores.

A los acuicultores de Ciénaga de Oro Córdoba, quienes brindaron sus conocimientos en el tema y estuvieron prestos para aportar información de base para la construcción de una solución ajustada a sus necesidades.

Resumen

El sector acuícola contribuye a la seguridad alimentaria y al desarrollo económico de Córdoba, donde las unidades de producción enfrentan desafíos en el monitoreo de la calidad del agua y la toma de decisiones basada en datos. Se presenta la implementación de una plataforma web basada en IoT para el monitoreo de la calidad del agua, que integra sensores con servicios de procesamiento de datos en la nube en una unidad de producción acuícola (UPA).

Se emplea un enfoque mixto, mediante un análisis cuantitativo del sector acuícola de Ciénaga de Oro para definir métricas de monitoreo de variables y un análisis cualitativo para la recolección de experiencias de un acuicultor en su proceso de negocio. En Google Cloud se implementó un Broker MQTT para recibir medidas de los sensores, Node-RED para la gestión de datos, InfluxDB para el almacenamiento de datos y Grafana para la visualización de datos.

Se evaluó el rendimiento técnico del sistema y la usabilidad y experiencia de usuario; la latencia del dispositivo electrónico en la transmisión de datos a la plataforma web fue de 1.91 s y de extremo a extremo, desde la adquisición de señales hasta la consulta desde dashboard fue de 9.14 s, la disponibilidad de los datos fue del 100 % y el acuicultor completó el 100% de tareas asignadas con el equipo sin necesidad de ayuda, con un tiempo entre 4 y 13.5 segundos por tarea.

La solución propuesta es clave para cerrar la brecha entre la tecnología y su aplicación práctica en contextos locales, aportando una herramienta escalable y orientada al usuario final, respaldando procesos de toma de decisiones. En trabajos futuros se contempla la maduración de una herramienta a nivel comercial, aumentando la muestra de evaluación e incluyendo capacidades analíticas predictivas.

Palabras clave: Acuicultura, Calidad de agua, Almacenamiento de datos, Computación en la nube, Visualización de datos.

Abstract

The aquaculture sector plays a strategic role in food security and regional economic development; however, production units in Córdoba, Colombia, face persistent challenges in water quality monitoring and data-driven decision-making. This paper presents the implementation of a web-based IoT platform for water quality monitoring, integrating a multi-sensor electronic device with cloud-based data processing services in an aquaculture production unit (APU). A mixed-methods research design was adopted.

The quantitative component consisted of a survey administered to 20 aquaculturists in Ciénaga de Oro, Córdoba, to characterize current monitoring practices and define key variable metrics. The qualitative component involved participatory observation of one aquaculturist's production process to elicit contextual requirements and co-design system specifications. On Google Cloud, a Mosquitto MQTT broker was deployed to receive sensor data, Node-RED for data routing and management, InfluxDB for time-series data storage, and Grafana for interactive data visualization.

System performance was evaluated across two dimensions: technical performance and usability. End-to-end latency, from signal acquisition to dashboard query was 9.14 seconds, with sensor-to-platform transmission latency of 1.91 seconds. Data availability reached 100% across all trials. In the usability assessment, the aquaculturist completed 100% of the assigned tasks without assistance, with individual task times ranging from 4 to 13.5 seconds.

The proposed platform bridges the gap between emerging IoT technology and its practical adoption in local aquaculture contexts, offering a scalable, user-centered tool that supports traceability and informed decision-making. Future work envisions the maturation of the

platform into a commercial-grade tool, expanding the evaluation sample and incorporating predictive analytics capabilities.

Keywords: Aquaculture, Cloud computing, Data storage, Data visualization, Water quality.

Contenido

Introducción	13
Planteamiento del Problema	16
Pregunta de Investigación.....	17
Hipótesis	18
Justificación	19
Objetivos.....	21
Objetivo General.....	21
Objetivos Específicos.....	21
Marco Referencial.....	22
Antecedentes	22
Marco Contextual.....	26
Marco Normativo.....	29
Marco Conceptual y Teórico	31
Calidad de Agua.....	31
Variables Fisicoquímicas en Sistemas Acuícolas	32
El pH.....	32
Conductividad Eléctrica del Agua - EC.....	33
Oxígeno Disuelto - OD.....	33
Medición de Parámetros de Calidad de Agua.....	34
Medición de pH.....	34
Medición de Conductividad Eléctrica en Estanques Acuícolas.....	35
Medición de Oxígeno Disuelto en Estanques Acuícolas	35

Modelos y Conceptos de Arquitectura IoT.....	36
Comunicación UART	38
Protocolo de Comunicación MQTT.....	39
Procesamiento de Datos.....	42
Visualización de Datos en Series de Tiempo.....	43
Modelos de Evaluación de Plataformas Tecnológicas.....	45
Metodología	48
Tipo de Investigación.....	48
Enfoque de Investigación.....	48
Diseño de Investigación.....	48
Población y Muestra	49
Fuentes de Información y Métodos.....	49
Fases del Desarrollo.....	50
Fase 1. Análisis del Contexto.....	51
Fase 2. Observación y Recolección de Experiencias.....	53
Fase 3. Co-Diseño.....	54
Fase 4. Desarrollo	55
Fase 5. Evaluación del Sistema.....	67
Resultados.....	68
Identificación de Requerimientos Tecnológicos en el Sector Acuícola de Córdoba.....	68
Aplicación de Encuesta.....	69
Recolección de Experiencias	71
Arquitectura de TI para el Monitoreo y Visualización de Datos	74

Definición del Diseño	74
Desarrollo del Dispositivo Electrónico y la Plataforma Web	76
Descripción de los Servicios Implementados	80
Desempeño de la Plataforma Web	83
Rendimiento Técnico del Sistema	83
Usabilidad e Interacción	87
Discusiones	91
Producción Académica	95
Artículos.....	95
Ponencias	95
Conclusiones	96
Recomendaciones	99
Trabajos futuros	99
Referencias.....	100

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Fuentes de Información</i>	50
Tabla 2 <i>Preguntas de la Encuesta</i>	52
Tabla 3 <i>Latencia en el Proceso de Captura de Datos de Sensores</i>	83
Tabla 4 <i>Tareas Completadas por el Acuicultor</i>	87

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Número de UPA por Departamento</i>	27
Figura 2 <i>Internet de las Cosas para Monitorear la Calidad del Agua Mediante Sensores</i>	37
Figura 3 <i>Conexión de UART y Bus de Datos</i>	38
Figura 4 <i>Estructura de Paquetes MQTT</i>	40
Figura 5 <i>Estrategias de Evaluación para Varios Tipos de Aplicaciones</i>	46
Figura 6 <i>Sensor de Temperatura DS18B20</i>	56
Figura 7 <i>Sensor de Conductividad Eléctrica</i>	57
Figura 8 <i>Sensor de pH</i>	57
Figura 9 <i>Sensor de Oxígeno Disuelto</i>	58
Figura 10 <i>Esquema del Sistema Electrónico</i>	60
Figura 11 <i>Mensaje Publicado al Broker MQTT</i>	62
Figura 12 <i>Flujo de Datos en Node-RED</i>	64
Figura 13 <i>Estructura para Almacenamiento de Datos en InfluxDB</i>	65
Figura 14 <i>Diseño de Panel de Visualización</i>	66
Figura 15 <i>Mediciones por Variable</i>	69
Figura 16 <i>Tiempos que Demandan los Procesos de Medida, Registro y Análisis de Datos</i>	70
Figura 17 <i>Estanques de Producción Acuícola</i>	72
Figura 18 <i>Sondas de Medición de pH, Temperatura y Oxígeno Disuelto</i>	73
Figura 19 <i>Requerimientos Tecnológicos en la Gestión de Datos Acuícolas</i>	74
Figura 20 <i>Diagrama Eléctrico del Dispositivo</i>	75

Figura 21 <i>Arquitectura de TI</i>	76
Figura 22 <i>Desarrollo del Dispositivo Electrónico</i>	77
Figura 23 <i>Medidas en Muestra con Conductividad Eléctrica de 1.41 ms/cm</i>	78
Figura 24 <i>Medidas en Muestra con Conductividad Eléctrica de 12.88 ms/cm</i>	78
Figura 25 <i>Medidas en Muestra con un pH de 4</i>	79
Figura 26 <i>Medidas en Muestra con un pH de 7</i>	79
Figura 27 <i>Medida de Oxígeno Disuelto en Agua Cruda</i>	80
Figura 28 <i>Medida de Temperatura en Agua Cruda</i>	80
Figura 29 <i>Interfaz de Usuario en Grafana</i>	82
Figura 30 <i>Latencia de Consulta de Dato entre Arduino Nano y ESP32</i>	84
Figura 31 <i>Latencia de Envío de Datos a la Plataforma Web</i>	85
Figura 32 <i>Latencia de Respuesta de InfluxDB a Grafana</i>	85
Figura 33 <i>Disponibilidad de los Datos</i>	86

Introducción

El sector de alimentos desempeña un papel estratégico en la seguridad alimentaria global; de los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por las Naciones Unidas, 10 guardan relación directa con los sistemas alimentarios (Organización de las Naciones Unidas, 2015). En Colombia, uno de los sectores que aportan a la seguridad alimentaria y a la economía es el Acuícola, que ha experimentado un crecimiento significativo; Mikkola (2024) señala que la producción pasó de 88.000 toneladas en 2013 a cerca de 180.000 toneladas en 2020. El crecimiento que experimenta la producción de este tipo de alimentos refleja una tendencia muy buena, por ello, se puede considerar a la Acuicultura un sector clave en la seguridad alimentaria (Subasinghe, et al., 2009).

En relación con el impacto económico y social, el desarrollo de actividades de producción de alimentos provenientes de la acuicultura representa una fuente de empleo, especialmente en zonas rurales, ayudando a diversificar la dinámica económica de los municipios del país. García y Fold (2021) analizaron, a través de su investigación, cómo cerca de 1500 pequeños productores, incluyendo 400 organizados en la ONG Acuica, dejaron la producción de coca y empezaron a utilizar la acuicultura como alternativa de negocio, diversificando sus ingresos con otras actividades como la ganadería y la producción lechera.

Analizando el contexto local, Córdoba es un territorio del caribe colombiano que presenta características muy buenas para el desarrollo de la acuicultura, se puede mencionar su posición geográfica, su infraestructura comercial y sus condiciones biofísicas como ventajas competitivas, de manera que, este territorio hace parte de los cuatro departamentos que tienen los mayores porcentajes de aptitud para el cultivo de yamú, bocachico y bagre rayado respecto al área departamental, con el 66,34 % (Ministerio de Agricultura, 2021).

El desarrollo de las actividades económicas de este sector se concentra en unidades productivas conocidas como UPAs, Unidades de Producción Acuícola. Una UPA ejecuta varios procedimientos durante la producción, que van desde la recepción hasta la cosecha y cuyas actividades presentan ciertos desafíos. Los procesos que se desarrollan en el sector acuícola son criticados porque afectan al medio ambiente ya que sus residuos pueden alterar los ecosistemas (Chiquito et al., 2022). Las actividades de las UPAs involucran el uso de reactivos químicos y además requieren de herramientas para controlar los niveles mínimos de calidad de agua para que la producción no se vea afectada, todas estas herramientas demandan una gran cantidad de energía y su uso desmedido podría aumentar el impacto ambiental y disminuir la productividad y competitividad del sector. Estos desafíos se abordan a partir de buenas prácticas que mejoran la gestión de los recursos con el fin de mitigar los efectos directos. Una buena gestión en la producción acuícola requiere de una participación activa y responsable de los productores, principalmente en la toma de decisiones estratégicas, de ahí que los acuicultores deben promover la autorregulación del sector (Subasinghe et al., 2009).

En los procesos de producción acuícola, es esencial el uso de técnicas y métodos para el control de la calidad de agua. Estos métodos consisten en monitorear los niveles de algunas variables en los estanques y a partir de la información adquirida ejecutar acciones de control que regulen los niveles de las mismas variables. Entre los parámetros más importantes que se analizan están la temperatura, pH, oxígeno disuelto, amoníaco, nitratos, sólidos disueltos totales, entre otros. Los métodos convencionales para la medición de estos parámetros, generalmente requieren del análisis de una muestra de agua en equipos de laboratorio, lo que dificulta el control de parámetros por parte de los acuicultores (Amrita & Babiyola, 2018). Gracias al avance de las nuevas tecnologías, se han desarrollado técnicas que se basan en sensores electrónicos que

luego se pueden integrar con herramientas computacionales para un análisis más preciso. El uso de sensores electrónicos para obtener señales relacionadas a los parámetros críticos de calidad de agua, resulta ser de mucha utilidad si se quiere avanzar en una buena gestión de recursos en los procesos productivos del sector acuícola. En este sentido, es preciso que los acuicultores cuenten con herramientas computacionales para llevar la trazabilidad de las variables en los estanques. Si bien es cierto que muchos acuicultores cuentan con sondas para la medición de parámetros, se debe fortalecer el proceso de registro de los datos, de esta forma, la aplicación de IoT sugiere ser una herramienta clave para la acuicultura en los próximos años.

En este trabajo se presenta la implementación de servicios de procesamiento y visualización de datos en la nube, integrados con un sistema de monitoreo de variables de calidad de agua basado en ESP32 y Arduino, capaz de monitorear y gestionar la trazabilidad de parámetros de calidad de agua para su aplicación en una Unidad de Producción Acuícola.

La primera sección del trabajo presenta el planteamiento del problema, la pregunta de investigación, la hipótesis, la justificación y los objetivos del trabajo. Seguidamente se expone el Marco Referencial, que incluye los antecedentes del monitoreo acuícola mediante IoT, el marco contextual del departamento de Córdoba, el marco normativo aplicable y el marco conceptual y teórico que sustenta la solución propuesta. Luego se describe la Metodología, el tipo, enfoque y diseño de la investigación, la población y muestra, las fuentes de información y las cinco fases del desarrollo basadas en la metodología de Diseño Participativo. La cuarta sección presenta los Resultados y Discusiones, en torno a la identificación de requerimientos tecnológicos, la implementación de la arquitectura de TI y la evaluación del desempeño y la usabilidad de la plataforma. Finalmente, se presentan las Conclusiones, las Recomendaciones, los Trabajos futuros y las Referencias bibliográficas.

Planteamiento del Problema

En Colombia, la producción acuícola viene experimentando un aumento considerable, sin embargo, este sector presenta dificultades relacionadas al monitoreo de la calidad de agua durante la producción. En el campo se producen diversas especies de peces y todas están expuestas a la acción de patógenos; aunque algunas son resistentes, si no se garantiza un control de la calidad de agua, los peces disminuyen su resistencia y pueden hacerse susceptibles a la acción de los agentes infecciosos, por lo que pueden presentar signos como morbilidad y mortalidad (FAO, 2020).

Haciendo un análisis más detallado sobre la situación planteada, se pueden identificar algunas causas desfavorables, podría decirse que la más influyente es la dificultad para llevar la trazabilidad de parámetros fisicoquímicos del agua en las Unidades de Producción Acuícola; el productor no siempre cuenta con una adecuada recolección de datos relacionados con los parámetros fisicoquímicos del agua y a esto se suma que, se tienen que llevar a cabo procesos complejos para el registro de los parámetros del agua. No llevar una trazabilidad de los parámetros del agua en este tipo de sistemas, le dificulta al productor tomar decisiones acertadas y en consecuencia se enfrenta al riesgo de pérdidas por mal manejo de su producción.

Algunas de las variables que se relacionan con la calidad de agua son la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto, la turbidez, la conductividad eléctrica, la salinidad y los nitritos y nitratos. La contaminación de los cuerpos de agua con altas concentraciones de nitritos y nitratos, es un problema grave que afecta a la salud de los peces y a la calidad del agua (Wicaksono et al., 2024). Los altos niveles de estos compuestos pueden provocar la muerte de los peces, lo que causa grandes pérdidas económicas para los acuicultores, igualmente, se puede

ver afectada la calidad del agua y provocar la proliferación de algas y otros microorganismos que pueden causar enfermedades en los peces y en los seres humanos que consumen estos productos.

Para abordar esta problemática, es necesario implementar nuevas herramientas y tecnologías que permitan monitorear de manera efectiva las variables en los sistemas de acuicultura. Sin embargo, aunque se vienen desarrollando nuevas herramientas apoyadas de las Tecnologías de Información en sectores como el agro, en los inicios de la revolución industrial 4.0., se crearon muchas herramientas digitales nuevas, impulsadas por el entusiasmo tecnológico y no por las necesidades y realidades de los usuarios potenciales. En consecuencia, se presentó una escasa acogida y muchas soluciones finalmente se abandonaron (Steinke et al., 2022). Una razón importante de estos fracasos ha sido la falta de correspondencia entre las preferencias y capacidades tecnológicas de los productores, sus necesidades de información y las soluciones de TIC propuestas.

La solución que se propone en este trabajo es la implementación de sensores conectados a un sistema de monitoreo ajustado a la medida de un productor, que permita la detección temprana de eventos altamente críticos y la mejora en la toma de decisiones preventivas, sin embargo, estos equipos tal como se consiguen en el mercado no son adaptables para ser tomados como instrumentos de transmisión de datos para su visualización en plataformas web.

Pregunta de Investigación

A partir del análisis de la problemática, se puede hacer la siguiente pregunta de investigación:

¿De qué manera un dispositivo electrónico de monitoreo de calidad de agua, co-diseñado con un acuicultor, puede integrarse con servicios de TI para apoyar la trazabilidad y el análisis de datos en una Unidad productiva del departamento de Córdoba?

Hipótesis

Se propone una plataforma de visualización de datos con dos capas, (hardware y software). El hardware está basado en las plataformas Arduino Nano para la adquisición de señales mediante sensores de pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto y Conductividad Eléctrica, y ESP32 para la gestión de medidas y conexión con aplicaciones en la nube. El software está basado en un Stack de servicios que incluyen un Broker MQTT para recibir los datos de los sensores, InfluxDB para almacenar los datos, Node-RED para gestionar el almacenamiento de los datos que llegan al Broker y Grafana para la visualización de datos.

El Arduino Nano es capaz de capturar señales de los sensores mediante las librerías que aporta el fabricante y de enviarlas mediante su puerto serial UART cada vez que son requeridas por el ESP32. El ESP32 es conectado con una pantalla Nextion para la interacción del usuario, de manera que, cada vez que el usuario quiera ver en pantalla el valor de cualquiera de las variables, el ESP32 será capaz de conectarse mediante su puerto serial UART con Arduino Nano para obtener la respectiva medida. Adicionalmente, el ESP32 cuenta con las capacidades para publicar mensajes mediante el protocolo MQTT, así que su integración con una aplicación web que use el mismo protocolo será realizada sin inconvenientes cada vez que un usuario desee almacenar las medidas que toma.

La implementación de los servicios de Broker MQTT, Node-RED, InfluxDB y Grafana se desplegarán en un contenedor de Docker en una instancia de Google Cloud. El ESP32 publicará las medidas de los sensores en el Broker y Node-RED será el responsable de procesar los datos para almacenarlos en InfluxDB según el formato adecuado. Si los datos publicados por el equipo son almacenados en el formato que InfluxDB, podrán ser consultados por una aplicación como Grafana para la visualización de datos de forma interactiva.

Justificación

Uno de los sectores económicos de gran importancia en Colombia y en el mundo es el de alimentos. Colombia cuenta con una región donde la producción agrícola viene cobrando gran importancia; la región caribe colombiana se encuentra ubicada al norte de Colombia y tiene una extensión de al menos cien mil hectáreas, esta región tiene una extensión que representa el 11,6% del territorio nacional, sus departamentos cuentan con una base económica variada, donde se destacan la agricultura, la ganadería, la minería, la industria, el turismo y el transporte marítimo. Una de las actividades económicas que viene creciendo en esta región es la producción acuícola debido a las ventajas de la posición geográfica, condiciones biofísicas, capacidad científica y técnica, infraestructura comercial, vocación, y capacidad empresarial; el 46% de la oferta de pescado es de origen acuícola. Cuatro departamentos tienen los mayores porcentajes de aptitud para el cultivo de yamú, bocachico y bagre rayado, con respecto al área departamental: Atlántico, con el 67,40 % de su área departamental; Córdoba, con el 66,34 % de su área departamental; Sucre, con el 65,17 %, y Cesar, con el 51,84 % de su área departamental (Ministerio de Agricultura, 2021).

En los últimos años se vienen ejecutando acciones en pro del sector acuícola, muestra de esto son los programas descritos por Ministerio de Agricultura (2021). Con el propósito de fortalecer este sector a partir de soluciones tecnológicas, se proponen herramientas que permitan mejorar aspectos relacionados con la competitividad y productividad de este sector. La integración de un dispositivo electrónico para la adquisición de señales fisicoquímicas del agua con arquitectura de TI para el monitoreo de variables en Unidades de Producción Acuícola permitirá al acuicultor tener mayor certeza en el proceso de producción. Se espera facilitar el registro de variables fisicoquímicas del agua en plataformas web, y así, brindar mayor acceso a

la información en tiempo real, optimizar procesos e impactar de forma positiva sobre el costo de producción. Con el desarrollo de estas tecnologías se espera tener la posibilidad de llegar a ser un sector sostenible, con alta competitividad y con un mejor impacto al medio ambiente y a la economía del departamento de Córdoba.

Objetivos

Objetivo General

Implementar una plataforma web de visualización de datos basada en un equipo electrónico de monitoreo de calidad de agua para su aplicación en procesos productivos del sector acuícola.

Objetivos Específicos

Identificar los requerimientos tecnológicos a partir de un análisis de contexto y de las necesidades de gestión de los parámetros de la calidad del agua en una Unidad de Producción Acuícola.

Integrar servicios de adquisición, procesamiento y visualización de datos para el monitoreo de la calidad del agua en una Unidad de Producción Acuícola.

Evaluar el desempeño y la usabilidad de la plataforma web de visualización de datos a partir de pruebas de laboratorio y escenarios simulados.

Marco Referencial

Antecedentes

A continuación, se muestra una exploración bibliográfica enfocada en los métodos de monitoreo de la calidad de agua, a través de una búsqueda avanzada en bases de datos, esta búsqueda se centra en temáticas como “Aquaculture production”, que es el tema de interés, “Water quality”, que incluye investigaciones que tratan la calidad de agua y “Sensor” para especificar los métodos que usan sensores. Se complementan algunas temáticas relacionadas al uso de nuevas tecnologías en el campo del Internet de las Cosas aplicadas al monitoreo de la calidad de agua, incluyendo temáticas relacionadas a las plataformas ESP32, Arduino, protocolo MQTT y herramientas de visualización de datos.

Para la medición de la calidad de agua en Unidades de Producción Acuícola se aplican distintos métodos, unos pueden ser más precisos que otros, algunos requieren del uso de recursos adicionales y otros se basan en equipos de laboratorio más especializados. En este sentido, los acuicultores, de acuerdo a sus necesidades o la facilidad económica, pueden optar por algún método en particular para obtener medidas de la calidad de agua durante la producción. A continuación, se describen trabajos de investigación que han aportado al proceso de la medición de parámetros críticos relacionados a la calidad de agua. Algunos investigadores sugieren la importancia de integrar sensores de pH, conductividad eléctrica (EC) y oxígeno disuelto (OD) con sistemas inalámbricos y automatizados, ya que estos sistemas pueden monitorear y controlar de manera efectiva la calidad del agua en las Unidades de Producción Acuícola.

Los autores Lin et al., (2021), en su investigación titulada "*Sistema inalámbrico multisensor IoT para monitoreo de calidad de agua en acuicultura de agua dulce*", plantearon como objetivo un sistema inalámbrico multisensor mediante la integración de sensores de

temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD) y conductividad eléctrica (EC) con un módulo Wi-Fi ESP32 para el monitoreo de la calidad del agua en sistemas de acuicultura de agua dulce. La investigación integró sensores críticos con una plataforma Wi-Fi ESP32, transmitiendo las medidas y salinidad estimada a través de una red Wi-Fi local hacia la plataforma IoT ThingSpeak, donde los datos fueron visualizados mediante un sistema de monitoreo basado en web y la aplicación ThingView. A través de procesos de precalibración, medición in situ y postcalibración, los resultados sugieren que el sistema IoT inalámbrico multisensor propuesto presenta una precisión confiable para el monitoreo de la calidad del agua en acuicultura de agua dulce, validando la efectividad de la integración de sensores automatizados con sistemas inalámbricos para el control de parámetros críticos en unidades de producción acuícola. El trabajo de Lin permite fundamentar el uso de ESP32, integrado con sensores servicios de visualización en la nube.

Cho et al., (2024), desarrollaron una investigación titulada "*Automated Drift Compensation System for Electrical Conductivity and pH Probes in Hydroponic Systems*", cuyo objetivo general fue diseñar y evaluar dos tipos de sistemas automatizados basados en la normalización de uno y dos puntos, con el fin de monitorear con precisión los cambios en los valores de pH y conductividad eléctrica (EC) en soluciones hidropónicas y optimizar la gestión de los sensores. La metodología incluyó la implementación de sistemas automatizados capaces de detectar y compensar las desviaciones de las sondas de pH y EC mediante mediciones automatizadas con soluciones de normalización. Se evaluó la efectividad del sistema en escenarios de hidroponía abierta y cerrada, comparándolo con el método estándar de laboratorio. El estudio demostró que tanto la estrategia de normalización de un punto como la de dos puntos mejoraron significativamente la precisión y exactitud de las mediciones de EC y pH. Esto se

reflejó en una reducción de los errores cuadráticos medios (RMSE) y una mejor gestión y mantenimiento de los sensores, promoviendo el uso eficiente de los nutrientes en sistemas hidropónicos. Este trabajo hace énfasis en el tratamiento estadístico aplicado a sensores para asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos en plataformas IoT.

Sulaiman et al., (2024) presentaron un trabajo titulado *"Enhancing Electrical Conductivity and pH Sensor Measurements in Precision Hydroponics: Comparative Analysis of Six Data Processing Methods"*, cuyo objetivo fue diseñar e implementar un sistema de monitoreo en tiempo real capaz de medir y registrar parámetros de la calidad del agua como temperatura, oxígeno disuelto, pH y turbidez, utilizando tecnología IoT para mejorar la productividad y la sostenibilidad de las actividades acuícolas. La metodología consistió en la integración de sensores con una plataforma de microcontrolador y módulos de comunicación inalámbrica. Los datos se procesaron y enviaron a una interfaz web y aplicación móvil, permitiendo la consulta remota y la generación de alertas automáticas ante la detección de valores fuera de los rangos óptimos. El sistema desarrollado logró una monitorización precisa y continua de los parámetros críticos del agua, mejorando la capacidad de respuesta y toma de decisiones por parte de los operadores acuícolas. Además, se verificó la confiabilidad y facilidad de uso de la solución IoT propuesta.

Yamuna et al., (2023) presentaron un trabajo titulado *"IWQMA: Intelligent Water Quality Management in Aquaculture using IoT Technology"*, un sistema inteligente para la gestión de la calidad del agua en acuicultura que permite el monitoreo en tiempo real y soporte a la toma de decisiones para el bienestar de las especies acuáticas. El trabajo se desarrolló utilizando un módulo de sensores basados en Arduino para medir parámetros como temperatura, pH, concentración de nitratos y amonio, sólidos suspendidos totales y presencia de malos olores,

cuyos datos se envían a un procesador central para su análisis y preprocesamiento automatizado. Además, incluye algoritmos de aprendizaje automático para predecir la evolución de parámetros críticos de calidad de agua, integrados a un esquema de transmisión de datos en la nube y monitoreo remoto mediante tecnología GSM. Con el trabajo se logró demostrar que el sistema realiza predicciones confiables de parámetros como pH y concentración de amonio, de manera que se pueden mantener entornos óptimos para el crecimiento y la salud de los peces cultivados. Los resultados sugieren que la combinación de IoT con modelos de machine learning aumenta la capacidad de respuesta ante cambios en la calidad del agua, reduce riesgos de mortalidad y apoya prácticas de acuicultura más sostenibles.

Kanagachidambaresan (2025) presentó el trabajo “*Water Quality Monitoring and Advisory Systems Using Real-Time Sensors and GPTs for Precision Brackishwater Aquaculture*”, donde propuso diseñar un sistema inteligente de monitoreo y asesoría que garantice una calidad de agua adecuada para la acuicultura de agua salobre mediante sensores en tiempo real y analítica predictiva basada en IA. El propósito central fue reemplazar los métodos manuales por una plataforma IoT capaz de vigilar continuamente parámetros críticos y anticipar fluctuaciones que puedan poner en riesgo la salud de los peces. El trabajo se hizo siguiendo una arquitectura IoT con una red de sensores basada en Arduino que mide variables como pH, OD y potencial óxido-reducción ORP, almacenando los datos en la nube para su posterior análisis. Sobre estas series temporales se implementó un modelo de redes neuronales que captura patrones de datos secuenciales, con el fin de predecir tendencias de pH, DO y ORP, complementado con otros análisis estadísticos. Con el trabajo se logró una precisión del 94.2% en la predicción de tendencias de calidad de agua lo que indica una alta capacidad explicativa sobre la variabilidad observada. Este trabajo aporta una herramienta para detectar de forma temprana desviaciones en

los parámetros, reducir el riesgo de mortalidad de peces y respaldar decisiones más informadas sobre manejo de estanques, demostrando la importancia de integrar sensores en tiempo real con modelos de aprendizaje profundo y GPTs como soporte de asesoría para elevar la sostenibilidad y eficiencia de la acuicultura de agua salobre.

Los antecedentes demuestran que el monitoreo de parámetros fisicoquímicos asociados a la calidad del agua, impactan de forma positiva en los procesos productivos. Para llevar estas tecnologías a un nivel de maduración adecuado, es preciso que los acuicultores cuenten con plataformas de visualización de datos escalables y de fácil conexión con dispositivos IoT, que además incluya procesos de gestión de medidas para identificar y analizar patrones de interés que permitan una mejor toma de decisiones.

Marco Contextual

Córdoba, uno de los departamentos del caribe colombiano, se encuentra ubicado al noroeste del territorio nacional limitando con el mar Caribe, tiene 23.980 km² y se divide en seis subregiones ambientales, Alto Sinú, Sinú Medio, Bajo Sinú, Sabana, San Jorge y Zona Costanera. En estas subregiones predominan tres zonas climáticas, bosque seco tropical, transición entre bosque seco y húmedo tropical, y bosque húmedo tropical. La temperatura media oscila entre 22,7 °C y 32,2 °C, con una humedad relativa anual promedio del 84% (Mestra et al., 2020).

El departamento de Córdoba presenta características que lo hacen apto para el desarrollo del sector acuícola, esto gracias a su posición geográfica, su infraestructura comercial y sus condiciones biofísicas. Es uno de los cuatro departamentos que tienen más porcentaje de aptitud para el cultivo de yamú, bocachico y bagre rayado respecto al área departamental, con el 66,34 % (Ministerio de Agricultura, 2021).

La producción acuícola en el departamento de Córdoba, al igual que otros sistemas agropecuarios de la región Caribe, está basada en pequeñas Unidades de Producción Acuícola, que usan tecnologías tradicionales y de bajo costo. Estos sistemas suelen ser extensivos o semi-intensivos, presentan una limitada mecanización y poca adopción de tecnologías avanzadas, lo que restringe la productividad y competitividad (Mestra et al., 2020). Con base en los datos del Ministerio de Agricultura (Dirección de Cadenas Pecuarias, Pesqueras y Acuícolas, 2021), el departamento de Córdoba se perfila como un territorio con alto potencial para el desarrollo de actividades acuícolas, al concentrar aproximadamente el 12 % de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) del país, lo que evidencia una amplia base productiva y organizativa en el sector rural, ver Figura 1.

Figura 1

Número de UPA por Departamento

Departamento	Cantidad de UPA ¹	Participación % UPA	Producción 2019 (t) ²	Participación % Prod.
Huila	2.273	6%	60.456	37%
Meta	1.457	4%	18.750	11%
Tolima	2.441	7%	16.185	10%
Antioquia	4.531	12%	6.725	4%
Cundinamarca	3.543	10%	5.583	3%
Córdoba	4.214	12%	5.520	3%
Valle del Cauca	678	2%	4.318	3%
Boyacá	1.693	5%	4.150	3%
Casanare	1.180	3%	3.951	2%
Atlántico	71	0%	3.753	2%
Caldas	1.001	3%	3.699	2%
Sucre	518	1%	3.306	2%
Bolívar	64	0%	3.182	2%
Caqueta	664	2%	3.172	2%
Cesar	393	1%	3.040	2%
Nariño	137	0%	2.904	2%
Cauca	1.201	3%	2.686	2%
Santander	3.453	10%	2.304	1%
Chocó	230	1%	2.095	1%
La Guajira	31	0%	1.901	1%
Arauca	874	2%	1.892	1%
Magdalena	53	0%	1.624	1%
Putumayo	2.891	8%	1.412	1%
Risaralda	597	2%	1.356	1%
Norte de Santander	1.074	3%	999	1%
Quindío	250	1%	192	0%
Vaupés	0	0%	117	0%
Guaviare	684	2%	96	0%
Amazonas	72	0%	75	0%
Vichada	0	0%	1	0%
Guainía	0	0%	0	0%
*ASAPYSC	0	0%	0	0%
Total	36.268	100%	165.444	100%

Nota. Tomado de *ACUICULTURA EN COLOMBIA Cadena de la Acuicultura* por Dirección de Cadenas Pecuarias, Pesqueras y Acuícolas, 2021, p. 9.

Aunque su participación en la producción total registrada para 2019 fue del orden del 3 %, este desbalance entre número de UPA y volumen producido sugiere la existencia de márgenes significativos de mejora en productividad, tecnificación y eficiencia, más que una limitación estructural del territorio. Adicionalmente, Córdoba cuenta con condiciones naturales favorables, como disponibilidad hídrica, clima cálido y vocación productiva agropecuaria, que pueden ser aprovechadas mediante la implementación de sistemas acuícolas sostenibles, innovación tecnológica y esquemas asociativos. En este contexto, el departamento representa un escenario estratégico para inversiones, proyectos de fortalecimiento productivo y transferencia tecnológica, orientados a incrementar el rendimiento acuícola y generar valor agregado en el sector.

La AUNAP manifiesta que: “entre 2012 y 2021, la producción acuícola aumentó el 116,16%, pasando de 89.064 toneladas a 192.521 toneladas de productos como Tilapia, Trucha, Cachama y Camarón, entre otras especies”, lo cual indica que la acuicultura presenta un gran impacto socioeconómico, aportando alrededor de 57.756 empleos directos y 173.269 indirectos. Con este panorama, la acuicultura junto con el sector pesquero aportan el 0,2% del Producto Interno Bruto (PIB) y el 3,3% del PIB agropecuario (Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca, 2022).

El departamento de Córdoba posee condiciones geográficas, climáticas y biofísicas que favorecen ampliamente el desarrollo de este sector económico, esto se ve reflejado en una alta aptitud para el cultivo de algunas especies. Sin embargo, los procesos en las unidades productivas enfrentan importantes desafíos relacionados con la sostenibilidad, debido a la contaminación de fuentes hídricas, el uso de insumos químicos y la limitada adopción tecnológica. Para asegurar la competitividad y mitigar los impactos ambientales, es esencial que

el crecimiento del sector se oriente bajo políticas y principios de desarrollo sostenible, garantizando la conservación de los recursos naturales del departamento.

Marco Normativo

Los procesos del sector acuícola en ocasiones son críticos por su impacto ambiental, ya que sus residuos pueden alterar los ecosistemas (Chiquito et al., 2022). Las actividades de las unidades productivas incluyen el uso de reactivos químicos y de herramientas de control de calidad de agua que demandan una gran cantidad de energía, poniendo en riesgo el impacto ambiental, la productividad y la competitividad del sector. La acuicultura en Córdoba se enfrenta a diversos retos ambientales asociados a la calidad del agua, especialmente por la contaminación de canales de riego con plaguicidas organoclorados y organofosforados, que superan los límites permitidos para el consumo humano y pueden afectar tanto la salud pública como los ecosistemas acuáticos (Palomo et al., 2017). El desarrollo de este sector en el departamento debe alinearse con los principios de sostenibilidad ambiental, los cuales son promovidos por políticas como la Ley 99 de 1993 y la Agenda 2030, que buscan proteger los recursos naturales y asegurar el uso sostenible del capital natural (Romero et al., 2020). La ley enfatiza el desarrollo sostenible, protección de biodiversidad, precaución ambiental y uso sostenible de recursos, alineados directamente con ODS 13 (acción por el clima), 14 (vida submarina), 15 (vida de ecosistemas terrestres) y 7 (energía asequible y no contaminante).

El desarrollo de una plataforma de visualización de datos aplicada a las actividades productivas del sector acuícola en Córdoba le permitirá a los productores tomar decisiones acertadas, optimizar recursos y así promover un uso sostenible de los recursos hídricos alineándose a la Ley 99 de 1993. Este desarrollo además requiere de actividades de

caracterización del sector, con el fin de documentar los procesos actuales y los requerimientos tecnológicos, por lo que es preciso analizar la protección de datos.

El desarrollo de una plataforma de visualización de datos para el monitoreo de parámetros de calidad de agua en acuicultura debe garantizar, en primer lugar, el respeto por los derechos a la intimidad, al buen nombre y al habeas data de los titulares de la información, asegurando que puedan conocer, actualizar y rectificar los datos que se almacenen sobre ellos en las bases de datos vinculadas al sistema, conforme a los artículos 15 y 20 de la Constitución Política de Colombia. En coherencia con la Ley 1581 de 2012 (Silva et al., 2019), el tratamiento de datos personales en esta plataforma debe someterse a los principios de legalidad, finalidad, libertad, veracidad, seguridad y confidencialidad, lo que implica definir claramente para qué se recolectan los datos, obtener autorización previa, expresa e informada de los usuarios cuando la información sea de carácter personal, mantener la información completa, exacta y actualizada, e implementar medidas técnicas y organizativas que eviten accesos, usos o divulgaciones no autorizadas. Asimismo, los responsables y encargados del tratamiento en la plataforma deben adoptar políticas internas y protocolos de manejo de información, canales para atender solicitudes de consulta o rectificación de datos, y mecanismos de seguridad acordes con los riesgos asociados al monitoreo y almacenamiento continuo de datos de calidad de agua y de los usuarios vinculados al sistema, cumpliendo con los deberes previstos por la normativa de protección de datos personales aplicable a todas las plataformas tecnológicas que operen en Colombia.

Marco Conceptual y Teórico

El monitoreo de la calidad del agua se ha consolidado como un pilar fundamental en el desarrollo de la acuicultura moderna, este es un proceso que apunta a la gestión sostenible de las Unidades de Producción Acuícola. La integración de plataformas IoT con redes de sensores y sistemas de visualización en tiempo real, responde a la necesidad de monitorear variables críticas y productivas que influyen directamente sobre los procesos fisiológicos y el bienestar de los peces, así como en la sostenibilidad del sector. A continuación, se aborda una teoría que se sustenta en los conceptos ambientales, tecnológicos y metodológicos, articulando desde los fundamentos de la calidad del agua hasta los sistemas ciberfísicos aplicados al monitoreo acuícola. Con esto, se establece la base teórica que soporta el diseño, implementación y evaluación de soluciones IoT orientadas a optimizar la eficiencia, sostenibilidad y trazabilidad en el sector acuícola del departamento de Córdoba.

Calidad de Agua

La gestión de la calidad del agua es básica para cualquier proyecto orientado a la producción acuícola de forma eficiente y sostenible. Es así como el análisis de los principales parámetros fisicoquímicos y su monitoreo permite identificar los factores ambientales que inciden en la productividad y bienestar de las especies cultivadas. Profundizar en los métodos convencionales de medición, así como en el impacto de cada variable, resulta fundamental para la toma de decisiones en unidades productivas, estableciendo el punto de partida para la integración de tecnologías orientadas al monitoreo de variables en tiempo real. A continuación, se describen las variables fisicoquímicas que intervienen en los procesos acuícolas y las herramientas que permiten su monitoreo en campo.

Variables Fisicoquímicas en Sistemas Acuícolas

El monitoreo de la calidad de agua es una actividad crítica para el análisis de variables que determinan la supervivencia de las especies de interés, ya que arroja datos directos relacionados con su bienestar y crecimiento. Variables como el pH, el oxígeno disuelto, la temperatura y la conductividad eléctrica, influyen directamente sobre los procesos fisiológicos de los organismos (Marium, et al., 2023). Conocer el comportamiento de dichas variables en periodos de tiempo específicos, permite controlar el medio y favorece la toma de decisiones para garantizar un ambiente equilibrado y óptimo para el crecimiento del cultivo. Esto permite disminuir el riesgo de desequilibrio químico del entorno, optimizar la disponibilidad de nutrientes, reducir la tasa de mortalidad y proveer un sistema más eficiente y sostenible (Chapman & Sullivan, 2022).

El pH

Es un parámetro asociado a la alcalinidad y acidez de los estanques y presenta varios efectos en los peces, Shuangyao, en un estudio realizado sobre una Unidad productiva, manifiesta que la producción acuícola se ve reducida al exponerse a un pH con medidas superiores a 8; a partir de pruebas pudo deducir que el índice de conversión alimentaria tiene menor eficiencia conforme el pH es más alto, la tasa específica de crecimiento (SGR) y la tasa de ganancia de peso (WGR) disminuyen a medida que el pH aumenta a partir de 8.3 (Shuangyao et al., 2018). Esto demuestra que un rango de pH entre 6.8 a 7.8 es un buen rango para este tipo de cultivos (Ahammed et al., 2022), favoreciendo el crecimiento, la supervivencia y minimizando el estrés fisiológico, mientras que desviaciones hacia valores más alcalinos afectan negativamente estos factores. La medición de pH es fundamental en muchos campos, donde se destaca la salud, la agricultura, el sector de alimentos y la calidad del agua (Manjakkal et al., 2020).

Conductividad Eléctrica del Agua - EC

Se relaciona con la propiedad que tiene el agua para permitir el flujo de corriente eléctrica, la cual depende principalmente de la concentración de sales y minerales disueltos. En relación con el parámetro de conductividad eléctrica, Agano y colaboradores, mediante un estudio en seis estanques, observaron que la conductividad eléctrica afecta el crecimiento de los peces. Se evidencia que existe una correlación negativa significativa entre la conductividad y el peso/longitud media del pez, esto significa que, a mayor conductividad, se reduce el crecimiento (Makori et al., 2017). Los sensores de conductividad pueden aportar información relevante sobre el estado del agua, por ejemplo, revelar perturbaciones ambientales, dinámicas naturales y factores como la salinización antropogénica (Fulton et al., 2023).

Oxígeno Disuelto - OD

Es uno de los principales parámetros físicos que deben monitorearse y controlarse en sistemas de acuicultura, este afecta directamente la respiración de los peces, su salud, tasas de crecimiento y la capacidad de carga del sistema. El oxígeno disuelto presenta relación con la temperatura y la salinidad del agua, por ejemplo, el agua tibia tiene menor oxígeno disuelto que el agua fría, mientras que a mayor salinidad menor oxígeno disuelto habrá disponible para los peces (Su et al., 2020). Este parámetro se puede considerar de los más críticos en las unidades productivas, ya que si se encuentra fuera del rango óptimo para la especie cultivada, pueden ocurrir eventos de estrés, brotes de enfermedades e incluso la muerte de los peces. El monitoreo de la concentración de Oxígeno Disuelto en agua es fundamental para las Unidades de Producción Acuícola, los peces son vulnerables cuando los niveles de oxígeno disuelto caen por debajo de 4 mg/L (Ahammed et al., 2022).

Haciendo un análisis general sobre las variables fisicoquímicas en las Unidades de Producción Acuícola, se puede comprender que el monitoreo de dichos parámetros es un proceso fundamental para la sustentabilidad del sector. En este sentido, es preciso profundizar sobre las teorías asociadas a la medición de los parámetros de calidad de agua y otras variables en la acuicultura, incluyendo técnicas y herramientas que se usan en las unidades productivas.

Medición de Parámetros de Calidad de Agua

En los procesos de acuicultura se requiere el monitoreo de parámetros de calidad de agua, con el fin de vigilar el estado de los peces y el comportamiento de la producción. Para llevar estos procesos se usan herramientas y métodos de acuerdo al tipo de variable que se requiera medir, a continuación, se detallan estos métodos por cada variable de interés.

Medición de pH

En estanques acuícolas se monitorea de forma manual (pH-metro y método colorimétrico) o con sensores electroquímicos (Sondas de pH). El pH-metro consiste en usar un electrodo de vidrio y uno de referencia para medir el voltaje entre ambos, la medida de pH depende del voltaje entre los electrodos, este es un método que aporta buena precisión pero requiere mantenimiento y calibración frecuente (Zeta et al., 2025). El método colorimétrico usa tiras o Kits con reactivos donde se compara el color; se basa en un indicador químico que cambia de color según la acidez de la muestra y en la comparación de ese color con una escala de referencia, el usuario añade unas gotas de reactivo o sumerge una tira en el agua del estanque, espera unos segundos a que se estabilice el color y lo compara visualmente con una escala impresa que relaciona color aproximado con valor de pH, este proceso no es apto para un monitoreo continuo y está sujeto a la percepción visual del usuario (Zeta et al., 2025). Por su parte, las sondas de pH son equipos comerciales de bajo costo que cuentan con electrodos

potenciométricos (normalmente de vidrio) integrados a placas de acondicionamiento de señal que permiten conectarlas directamente a microcontroladores (Arduino, ESP32) para medir el pH en tiempo real (Flores et al., 2025).

Medición de Conductividad Eléctrica en Estanques Acuícolas

Se monitorea a partir de dos métodos, el más usado se conoce como método conductivo, que consiste en sumergir varios electrodos para medir la resistencia del agua y seguidamente se convierte el valor a conductividad eléctrica. El otro método se conoce como método inductivo, es decir, sin contacto directo; consiste en inducir corriente eléctrica en el agua a partir de dos bobinas toroidales aisladas del agua (una bobina emisora y una receptora), la bobina emisora genera un campo magnético alterno que induce una corriente en el agua que circula alrededor del toroide, la intensidad de esa corriente inducida depende de la conductividad del agua, la cual es captada por la bobina receptora para producir una señal asociada a la conductividad (Parra et al., 2018).

Medición de Oxígeno Disuelto en Estanques Acuícolas

Para la medición del oxígeno disuelto, se usan métodos manuales y sondas electroquímicas. Uno de los procesos manuales se realiza con base en kits colorimétricos, el cual es un procedimiento químico manual que permite estimar oxígeno disuelto de forma indirecta; el resultado se interpreta visualmente por el cambio de color de la muestra (Flores et al., 2025). Otro método se basa en el uso de sensores electroquímicos, el cual consiste en transformar procesos de oxidación–reducción del oxígeno en una señal eléctrica (corriente, conductancia o potencial) proporcional a su concentración en el agua. En los sensores de tipo corriente (polarográficos y galvánicos), el oxígeno que difunde a través de una membrana hasta el electrolito se reduce en el cátodo mientras otro material se oxida en el ánodo, generando

una corriente de difusión cuya magnitud es función de la concentración de O_2 ; en el caso polarográfico se aplica un voltaje de polarización externo y en el galvánico la propia pareja de metales genera el potencial. En los sensores de tipo conductancia, el oxígeno participa en reacciones de oxidación o reducción que modifican la conductividad del electrolito, de modo que midiendo ese cambio de conductividad se infiere la concentración de oxígeno disuelto. En los sensores potenciométricos, el electrodo de trabajo está recubierto con un material sensible al oxígeno y el potencial que se genera entre este y un electrodo de referencia depende de forma definida de la concentración de O_2 , por lo que el sensor estima el oxígeno disuelto a partir de la variación del potencial de electrodo (Wei et al., 2019).

El proceso de monitoreo de parámetros de calidad de agua basado en sondas comerciales es apto para el desarrollo de equipos que permitan llevar una trazabilidad de la producción acuícola en una plataforma de visualización de datos, ya que las sondas comerciales cuentan con un circuito de adquisición y tratamiento de señales que puede ser transmitido desde microcontroladores Arduino y ESP32 a la nube. A continuación, se detallan las teorías basadas en la arquitectura de IoT para este tipo de aplicaciones.

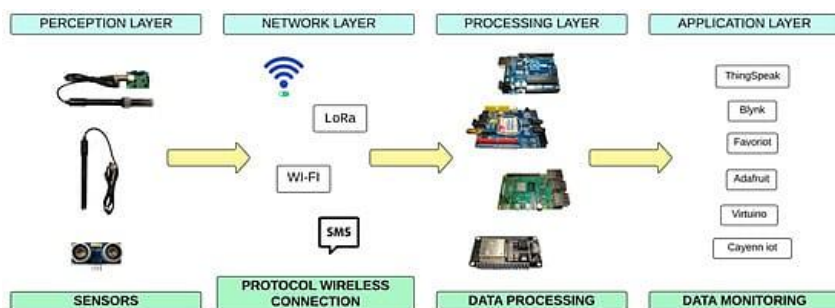
Modelos y Conceptos de Arquitectura IoT

La integración de arquitecturas basadas en Internet de las Cosas (IoT) en el sector acuícola plantea nuevos paradigmas para el monitoreo, gestión y trazabilidad de los sistemas de producción. Analizar los fundamentos de los sistemas ciberfísicos, los modelos de arquitectura IoT, los protocolos de comunicación como MQTT y las bases teóricas del almacenamiento de datos en series temporales, permite comprender la manera en que estos componentes interactúan para ofrecer plataformas robustas y escalables. El abordaje teórico brinda el contexto necesario para el diseño y la implementación de soluciones tecnológicas enfocadas en la eficiencia y el

manejo inteligente de información ambiental y productiva. Flores et al., (2025), a partir de una revisión sistemática de la literatura, diseñaron un diagrama que muestra la operación integrada de un sistema IoT para monitoreo de calidad de agua en acuicultura, organizando el proceso en cuatro capas fundamentales, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Internet de las Cosas para Monitorear la Calidad del Agua Mediante Sensores



Nota. Tomado de *Internet of Things (IoT) Sensors for Water Quality Monitoring in Aquaculture Systems: A Systematic Review and Bibliometric Analysis* por Flores, 2025, p. 7.

De la Figura 2 se puede observar que la Capa de Percepción presenta los sensores que recopilan datos in situ de los parámetros fisicoquímicos del agua, la Capa de Conexión Inalámbrica muestra la transmisión de datos mediante Wi-Fi u otros protocolos inalámbricos desde los sensores hacia el siguiente nivel de procesamiento, la Capa de Procesamiento presenta los microcontroladores que reciben y procesan la información transmitida desde los sensores, la Capa de Aplicación incluye interfaces o dashboards como ThingSpeak, Blink, Virtuino y demás plataformas de visualización de datos en tiempo real.

Con el propósito de implementar un sistema similar al diseño descrito en la Figura 2, a continuación, se describen las teorías que fundamentan la integración de las capas usadas, incluyendo la comunicación UART entre microcontroladores y sensores, el protocolo MQTT

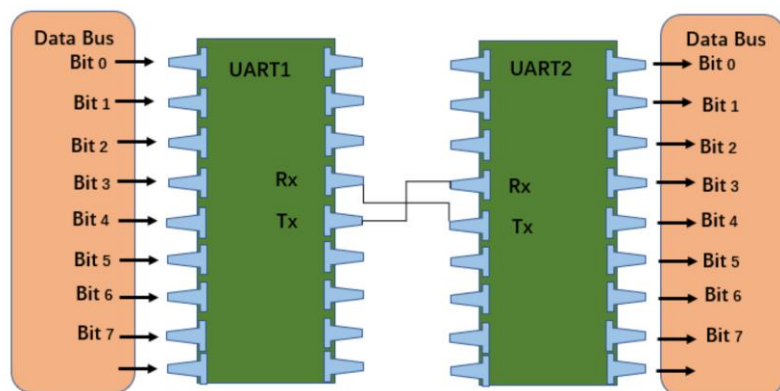
para la comunicación entre microcontroladores y plataformas Web, Sistemas de Backend para la gestión del almacenamiento de datos de series temporales y sistemas de visualización de datos en tiempo real.

Comunicación UART

UART es un protocolo de comunicación serie, asíncrono y full-dúplex que envía los datos bit a bit por dos cables (uno de transmisión y uno de recepción) sin compartir una señal de reloj (Gong et al., 2023). La comunicación UART se fundamenta en un proceso de conversión de datos paralelos a seriales y viceversa, ver Figura 3.

Figura 3

Conexión de UART y Bus de Datos



Nota. Tomado de *UART communication protocol frame format explanation and application* por Gong, 2023, p. 50.

Como se observa en la Figura 3, hay dos elementos llamados UART1 y UART2 conectados por sus pines Rx y Tx, estos elementos hacen parte de dos dispositivos separados que se quieren comunicar, por ejemplo el UART1 puede estar integrado a un Arduino o a un ESP32, mientras que el UART2 puede ser el puerto serial de un computador. El transmisor UART extrae los datos del bus de datos de control de forma paralela (8 bits: bit 0 al bit 7) y los transmite hacia

el receptor UART de manera serial a través de las líneas de transmisión (Tx) y recepción (Rx). El receptor, a su vez, recibe estos datos seriales y los convierte nuevamente a datos paralelos para enviarlos al bus de datos en el extremo receptor. Para lograr esta comunicación efectiva, ambas partes deben tener configuradas idénticamente la tasa de baudios y el formato de transmisión de datos. Dado que UART es un protocolo asincrónico que no transmite un reloj de sincronización, utiliza un reloj de muestreo con una frecuencia 16 veces superior a la velocidad de datos para garantizar la precisión en la recepción de la información, permitiendo que ambos dispositivos se comuniquen utilizando únicamente las líneas de envío y recepción de datos bajo diferentes señales de reloj. La comunicación UART es útil para obtener señales de los sensores de pH, OD y EC de tipo sondas, los cuales cuentan con sistemas de transmisión serial, sin embargo, con este protocolo no es posible transmitir estos datos a internet. El dispositivo capaz de conectarse vía WiFi y transmitir datos a una aplicación web es el ESP32 y una forma segura de hacer este proceso es mediante el protocolo de comunicación MQTT, a continuación, se detalla la teoría relacionada a este protocolo.

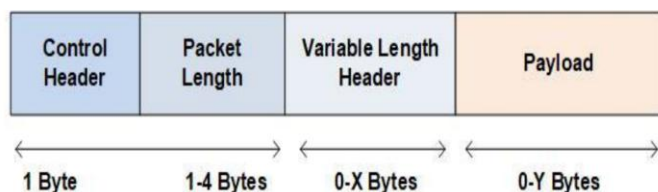
Protocolo de Comunicación MQTT

MQTT es un protocolo de red simple diseñado específicamente para aplicaciones IoT que operan en dispositivos con recursos limitados, como lo son los ESP32, permitiendo la comunicación a través de redes que se caracterizan por su bajo ancho de banda y alta latencia (Narita et al., 2021). Su funcionamiento se basa en un modelo que cuenta con tres elementos, “Publisher”, “Broker” y “Subscriber”, donde el “Publisher” genera y envía datos al “Broker”, el “Broker” actúa como servidor central y finalmente el “Subscriber” se suscribe a los topics específicos donde el “Publisher” envía datos. La estructura del protocolo está optimizada para la

transmisión eficiente de datos, empleando un encabezado de apenas 2 bytes, lo que contribuye a su baja sobrecarga, ver Figura 4.

Figura 4

Estructura de Paquetes MQTT



Nota. Tomado de *Internet of Things Communication Systems based on MQTT and BLE Protocols* por Narita, 2021, p. 40.

A continuación, se detalla la estructura del paquete mostrado en la Figura 4, la cual está compuesta por cuatro componentes principales:

Control Header (1 Byte): Este es el primer byte del paquete y contiene información crítica sobre el tipo y características del mensaje MQTT. Incluye identificadores que especifican qué tipo de mensaje es (CONNECT, PUBLISH, SUBSCRIBE, etc.).

Packet Length (de 1 a 4 Bytes): Este campo especifica la longitud total del paquete MQTT. Utiliza una codificación variable que permite representar longitudes diferentes de manera eficiente, ocupando entre 1 y 4 bytes según sea necesario.

Variable Length Header (de 0 a X Bytes): Este componente contiene información específica del tipo de mensaje. Su tamaño varía según el tipo de paquete MQTT que se esté transmitiendo, por ejemplo, en un mensaje PUBLISH puede contener el topic (tema) del mensaje.

Payload (de 0 a Y Bytes): Es la sección opcional que contiene los datos reales que se desean transmitir. Según Narita (2021), "el payload es opcional y su longitud depende del tipo de

paquete". No todos los paquetes MQTT requieren payload; algunos mensajes de control pueden no tenerlo.

El funcionamiento de este protocolo se fundamenta en el servicio de Broker, que como se mencionó, recibe mensajes de los clientes "Publishers" y los envía a los clientes "Subscribers" correctos según el topic, gestionando conexiones, seguridad y escalabilidad. El Broker se implementa en un servidor que se conecta a internet y acepta conexión de "Publishers" y "Subscribers", recibe los mensajes mediante "topics" o temas, contiene una tabla de suscripciones para gestionar qué cliente está suscrito a qué topic y finalmente entrega cada mensaje solo a los "Subscribers" interesados, respetando el nivel de seguridad QoS (0,1,2) y opciones como mensajes retenidos (Mishra & Kertész, 2020).

El flujo simplificado de una publicación MQTT, según lo explica Mishra (2020) es de la siguiente forma: el Cliente A publica un mensaje en el topic casa/salon/temp, seguidamente, el Broker revisa su tabla e identifica que B y C están suscritos a ese topic, luego envía el mensaje a B y C con la seguridad (QoS) acordada. La seguridad en MQTT tiene tres niveles QoS 0, QoS 1 y QoS 2; en el nivel QoS 0 el mensaje se envía como máximo una vez, sin reintentos ni confirmación (si se pierde en la red, no se vuelve a enviar), el nivel QoS 1 garantiza que el mensaje llegue al menos una vez al receptor, usando confirmaciones y reenvíos, por lo que pueden aparecer duplicados y en el nivel QoS 2 el mensaje se entrega exactamente una vez al suscriptor, mediante un flujo extra de mensajes de control entre cliente y bróker (Mishra & Kertész, 2020).

Algunos ejemplos de Broker son Mosquitto, EMQX, HiveMQ, ActiveMQ, entre otros, los cuales varían en escalabilidad, soporte de MQTT 5.0, clustering y funciones de monitorización. El servicio de Broker sólo se enfoca en el proceso de transmisión de datos entre

dispositivos electrónicos como ESP32 y el Broker, sin embargo, un sistema de visualización de datos requiere de una gestión más completa que integre el procesamiento, enrutamiento y almacenamiento de datos previo a la aplicación de visualización. A continuación, se explica la teoría relacionada a la capa de procesamiento y gestión de datos.

Procesamiento de Datos

En una arquitectura de visualización de datos aplicada al monitoreo de parámetros de calidad de agua se requiere de un servicio encargado de la gestión del almacenamiento y presentación de datos. Khriji (2021), describe esta etapa como una plataforma de procesamiento de eventos y flujos de datos en tiempo real, la cual actúa como un puente entre los nodos sensores, la nube y los microservicios, permitiendo capturar, transportar, transformar y almacenar continuamente grandes volúmenes de mensajes con alta disponibilidad, bajo retardo y alta capacidad de procesamiento. Esta plataforma se basa en un servicio capaz de obtener los datos provenientes de un Broker a través del protocolo MQTT, evitando comunicación punto a punto y reduciendo el consumo de ancho de banda y CPU.

Para el desarrollo de este tipo de servicios existen herramientas que facilitan la configuración y puesta en marcha de aplicaciones de procesamiento, una de estas herramientas es Node-RED, una plataforma de programación visual basada en flujos y nodos; permite arrastrar y conectar “nodos” que representan dispositivos, APIs, funciones lógicas y bases de datos, sin necesidad de mucho código tradicional. Node-RED es open-source, permite construir aplicaciones tipo SCADA de bajo costo, alta personalización y carácter web; un desarrollador puede realizar aplicaciones fácilmente interconectando dispositivos físicos y servicios digitales mediante “nodos” que encapsulan protocolos industriales (Modbus TCP, OPC UA, MQTT, Sparkplug B), bases de datos (especialmente series de tiempo como InfluxDB) y herramientas de

visualización como Grafana, todo de forma modular, multiplataforma y con escaso uso de código tradicional, lo que facilita su adopción por integradores industriales para supervisión en tiempo real, logging, archivado y dashboards similares a los de un SCADA (Nitulescu & Korodi, 2020).

Una aplicación de Node-RED puede ser implementada en un servidor, conectarse a un Broker MQTT y suscribirse a uno de sus topics para obtener datos, esos datos pueden ser procesados por la aplicación de Node-RED, la cual puede tomar decisiones y ejecutar acciones, sin embargo, los datos requieren ser almacenados para que otras aplicaciones puedan consultarlos y mostrarlos al usuario. A continuación, se muestra la teoría relacionada a la gestión del almacenamiento de datos.

Visualización de Datos en Series de Tiempo

Las bases de datos de series temporales son gestores especializados para datos con marca de tiempo, optimizados para escribir y consultar “datos en el tiempo” de forma masiva y eficiente, lo cual es preciso para el tipo de aplicación que se propone desarrollar. Una serie temporal es una secuencia de valores asociados a instantes de tiempo (p.ej. [timestamp, valor]), como temperatura cada minuto, consumo eléctrico por segundo o métricas de un servidor (Jensen et al., 2017). Una característica clave en la gestión de datos en series de tiempo es la indexación por tiempos, lo cual permite organizar los datos por rangos temporales facilitando consultas de una variable durante la “última hora”, “última semana”, etc.

Una base de datos con las características descritas previamente se puede implementar mediante un servidor, hay varias herramientas que se ocupan de este servicio, una de las cuales es InfluxDB, una base de datos especializada en "datos de series temporales" (métricas, sensores, logs) con alto volumen de escritura y consultas agregadas en tiempo real (Mota et al., 2025). Esta herramienta se usa ampliamente en IoT, monitorización industrial, energía y analítica en tiempo

real, por lo que es una opción adecuada para el monitoreo de parámetros de calidad de agua en acuicultura.

El lenguaje usado para realizar consultas a InfluxDB se basa en InfluxQL que, como lo explica Mota (2025), es similar a SQL pero añade funciones específicas para filtrar, agrupar y agregar información en función del tiempo, lo que facilita tareas como obtener promedios, máximos o mínimos por intervalos y gestionar políticas de retención sobre grandes volúmenes de datos históricos. En versiones más recientes también se dispone de Flux, un lenguaje de tipo funcional y de *scripting* de datos que permite construir consultas más complejas, combinar múltiples fuentes de información y realizar análisis avanzados, manteniendo un enfoque flexible para el procesamiento y la correlación de métricas en entornos IoT, monitoreo y analítica.

Siguiendo la estructura del sistema propuesto, el servicio de InfluxDB puede desplegarse en un servidor en la nube y servir de gestor de almacenamiento de datos, mientras que para el proceso de visualización, es preciso contar con un servicio aparte, es decir, una aplicación que sea capaz de realizar consultas a InfluxDB y mostrar los datos en una interfaz de usuario amigable. A continuación, se describe la teoría asociada a las herramientas de visualización de datos y su utilidad en los sistemas de monitoreo en acuicultura.

Las plataformas de visualización de datos son sistemas tecnológicos diseñados para transformar conjuntos de datos complejos y voluminosos en representaciones gráficas interactivas y comprensibles, facilitando el análisis, la interpretación y la toma de decisiones con base en evidencias (Salis & Chidravalli, 2024). Estas plataformas se apoyan en la computación en la nube para ofrecer escalabilidad en procesamiento, almacenamiento y renderizado de visualizaciones, lo que permite adaptarse al crecimiento continuo del volumen y la velocidad de los datos. Además, se evalúan según criterios como escalabilidad, rendimiento, rentabilidad y

facilidad de uso, con el fin de comparar distintas plataformas y algoritmos y seleccionar la opción más adecuada a cada contexto de aplicación.

Una de las herramientas de visualización de datos que se integra fácilmente con InfluxDB es Grafana, Cholke (2024) explica que es una aplicación web diseñada para el análisis y visualización de series temporales mediante paneles configurables, que consulta distintas fuentes de datos para representar métricas, InfluxDB se empareja frecuentemente con Grafana para la elaboración de dashboards de monitorización. En un flujo típico, Grafana solicita datos a InfluxDB; los datos se almacenan previamente por colectores o programas de alimentación y Grafana los renderiza en paneles y gráficos.

El desarrollo de aplicaciones tecnológicas que serán expuestas al uso de operarios, clientes y demás usuarios requiere de una validación técnica desde dos visiones, usuarios y de arquitectura, de manera que se asegure su futura aplicación a gran escala. A continuación, se describe la teoría relacionada a los modelos de evaluación de plataformas tecnológicas.

Modelos de Evaluación de Plataformas Tecnológicas

La evaluación de las arquitecturas de TI es fundamental porque estas deben sostener escenarios reales de análisis visual e interactivo, donde se combinan grandes volúmenes de datos, cargas de trabajo complejas y requisitos estrictos de latencia para mantener la interactividad del usuario. Si se quiere validar el desempeño de un sistema de visualización de datos para el monitoreo de parámetros de calidad de agua en Unidades de Producción Acuícola, es fundamental revisar dos frentes, por un lado la arquitectura y por otro lado la experiencia de usuario. Se sugiere la aplicación de métodos de evaluación más realistas y reproducibles, basados en trazas de uso auténticas, que permitan caracterizar mejor cómo las arquitecturas

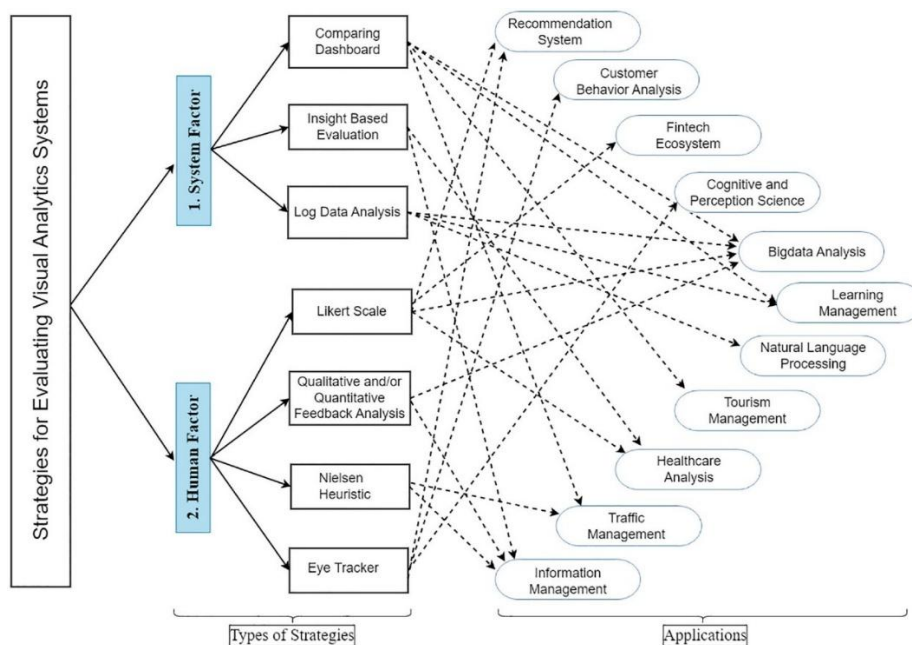
responden bajo distintas combinaciones de datos, tareas, usuarios e interfaces de visualización, garantizando así sistemas más eficientes, escalables y útiles en la práctica (Battle et al., 2018).

Algunos de los criterios definidos para evaluar arquitecturas de TI, según Battle (2018) son; rendimiento, fiabilidad, seguridad, usabilidad y mantenibilidad. Adicionalmente sugiere aplicar pruebas como carga, estrés y escalabilidad, además de analizar trazas reales de uso que combinen datos, consultas, interacción y visualización para verificar que la plataforma responde adecuadamente bajo distintas condiciones.

Islam y otros investigadores (2023), de forma similar a como lo define Battle, agrupa siete criterios de evaluación para sistemas de análisis visual, organizados en dos categorías, ver Figura 5.

Figura 5

Estrategias de Evaluación para Varios Tipos de Aplicaciones



Nota. Tomado de *Strategies for evaluating visual analytics systems: A systematic review and new perspectives* por Islam, 2023, p. 85.

En cuanto a los factores del Sistema, se define la Comparación de Paneles (Dashboard Comparison), la Evaluación Basada en Perspectivas (Insight-Based Evaluation) y el Análisis de Datos de Registros (Log Data Analysis). En cuanto a factores Humanos, se define la Escala Likert (Likert Scale), el Análisis Cualitativo y Cuantitativo (Qualitative and Quantitative Analysis), la Heurística de Nielsen (Nielsen's Heuristics) y los Rastreadores de Ojos (Eye Trackers). Cada criterio tiene propósitos específicos: algunos evalúan aspectos técnicos como eficiencia y precisión del sistema, mientras que otros miden la usabilidad, el rendimiento del usuario y su experiencia con la visualización.

Metodología

Esta investigación tiene como fin el desarrollo de un sistema electrónico y una plataforma web con apoyo de tecnologías emergentes como redes de sensores, Arduino, ESP32 y la configuración de servicios en la nube. A continuación, se describen las características de la investigación y las fases de su desarrollo.

Tipo de Investigación

Se realizó una investigación aplicada, ya que se orientó a resolver un problema práctico en una Unidad de Producción Acuícola.

Enfoque de Investigación

La investigación tuvo un enfoque mixto; las fases de análisis de contexto y evaluación del sistema emplearon métodos cuantitativos, como los propuestos por Hernández Sampieri (2014), mediante la medición de fenómenos, uso de estadística descriptiva y experimentación para evaluar métricas técnicas como latencia, disponibilidad de datos y tiempos de tarea. Las fases de co-diseño y recolección de experiencias adoptaron un enfoque cualitativo, a través de la cual se involucró a un acuicultor como informante clave y co-diseñador, priorizando la profundidad de la interacción y el conocimiento contextual sobre la representatividad estadística.

Diseño de Investigación

La investigación se realizó a partir de un diseño exploratorio secuencial, propuesto por Hernández Sampieri (2014). En una fase preliminar con análisis cualitativo, se exploró el contexto de un productor acuícola mediante diseño participativo, lo que permitió definir los requerimientos funcionales del sistema. En una segunda fase con análisis cuantitativo, se evaluó el desempeño técnico de la plataforma desarrollada mediante métricas de latencia y

disponibilidad del servicio. Los hallazgos de ambas fases se integran en un análisis total que vincula las necesidades del productor con el rendimiento medido del sistema.

Población y Muestra

Dado el enfoque mixto, se define la población y muestra en las fases que contemplan un análisis cuantitativo:

Para la fase de análisis de contexto, se ha definido como población las Unidades de Producción Acuícola que operan en el municipio de Ciénaga de Oro Córdoba, mientras que la muestra consta de 20 Unidades productivas.

Para las fases de co-diseño y desarrollo se trabajó con un acuicultor en calidad de informante clave y co-diseñador, rol propio del diseño participativo (Wacnik et al., 2025). En esta fase no aplica la definición de población y muestra.

Para la fase de evaluación de desempeño del sistema, se ha definido como población el conjunto de eventos de transmisión, mientras que la muestra consta de 20 experimentos realizados. La evaluación de usabilidad del sistema consta de una valoración cualitativa realizada en compañía de un acuicultor, por tanto sus resultados se interpretan como un indicador preliminar de facilidad de uso, y no como una validación definitiva de la usabilidad de un sistema dirigido al mercado.

Fuentes de Información y Métodos

La información se obtuvo mediante la aplicación de una encuesta, las medidas de funcionamiento del dispositivo, las medidas de desempeño de la arquitectura y la aplicación de una entrevista. En este sentido, se presentan cuatro fuentes de información primaria, las cuales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1*Fuentes de Información*

Fuente de información	Método	Objetivo de la información
Encuesta	Formulario electrónico	Comprender el contexto de la acuicultura en Córdoba.
Entrevista	Visita técnica	Observar las experiencias y evaluar la experiencia de usuario.
Medidas de desempeño	Experimentos en laboratorio	Evaluar el desempeño de la arquitectura.

Nota. Definición de las fuentes de información.

Fases del Desarrollo

Para desarrollar el sistema se utilizó la metodología conocida como Diseño Participativo, propuesta por Björgvinsson. Consiste en involucrar al usuario final en el desarrollo de la solución, de esta forma, el usuario no solo es observado sino que participa como co-diseñador (Björgvinsson et al., 2012). Steinke et al., (2022) señalan que esta metodología permite la co-construcción de soluciones pertinentes con actores clave del contexto en proyectos de innovación digital para el sector agropecuario, igualmente sugieren que el diseño participativo con informantes clave resulta más efectivo que los enfoques masivos, ya que integra el conocimiento tácito del productor directamente en el proceso de desarrollo de la aplicación.

Con base en las características de la metodología “Diseño Participativo”, se propusieron cinco fases para desarrollar el proyecto; en primer lugar se realizó un análisis del contexto, mediante la aplicación de una encuesta a un grupo de acuicultores, una fase de observación y recolección de experiencias del cliente a partir de una visita técnica a un acuicultor, seguidamente se planteó un taller de Co-diseño con el acuicultor, una fase de desarrollo,

incluyendo presentación de simulaciones al acuicultor y finalmente se realizó una etapa de evaluación del sistema propuesto y experiencia de usuario.

La investigación se llevó a cabo en el departamento de Córdoba, Colombia, se realizó con apoyo de una Unidad de Producción Acuícola que se encuentra desarrollando su actividad económica y cuyo negocio está legalmente constituido. En este caso, la Unidad Productiva participó como co-diseñador, de manera, que no solo fue observada sino que se involucró en las etapas de desarrollo. A continuación, se detallan las fases y sus respectivas actividades.

Fase 1. Análisis del Contexto

Se aplicó una encuesta a través de un formulario electrónico a un grupo de acuicultores del departamento de Córdoba, con el fin de comprender los procesos que se llevan a cabo en las Unidades de Producción Acuícola, ver Tabla 2. Esto se hizo para tener un punto de partida y establecer los requerimientos tecnológicos del sistema propuesto.

Tabla 2*Preguntas de la Encuesta*

Pregunta	Opciones de respuesta	Descripción
Zona	Urbana Rural	El usuario escoge donde se encuentra la Unidad productiva.
Número de estanques	Respuesta numérica	El usuario indica el número de estanques con que cuenta.
Tecnologías de monitoreo	Oxígeno disuelto pH Temperatura Conductividad Sin monitoreo	El usuario escoge las tecnologías con las que cuenta.
Frecuencia de medición de temperatura	Más de una vez por día Diario Semanal Nunca	El usuario escoge la frecuencia de medición de temperatura.
Frecuencia de medición de Oxígeno disuelto	Más de una vez por día Diario Semanal Nunca	El usuario escoge la frecuencia de medición de Oxígeno disuelto.
Frecuencia de medición de pH	Más de una vez por día Diario Semanal Nunca	El usuario escoge la frecuencia de medición de pH.
Frecuencia de medición de Conductividad Eléctrica	Más de una vez por día Diario Semanal Nunca	El usuario escoge la frecuencia de medición de Conductividad Eléctrica.
¿Cuánto tiempo tarda en tomar la medida de un parámetro de la calidad del agua?	<=1min 2min - 10min 11min-20min > 20 min No registra	Es el tiempo que tarda un acuicultor en tomar una medida desde la preparación previa hasta ver el resultado.
¿Cuánto tiempo tarda en guardar la medida de un parámetro de la calidad del agua en un sistema de información?	<=1min 2min - 10min 11min-20min > 20 min No registra	Es el tiempo que tarda un acuicultor en guardar la medida de un parámetro de la calidad del agua en un sistema de información cualquiera, ejemplo, un programa,

Pregunta	Opciones de respuesta	Descripción
¿Cuánto tiempo tarda para obtener información del comportamiento de una variable?	<=1 min 2min - 10min 11min-20min > 20 min No realiza análisis	una aplicación o una libreta de apuntes. Si no hace este proceso escoge la opción “No registra”. Es el tiempo que tarda un acuicultor para obtener información del comportamiento de una variable, ejemplo, para observar el comportamiento del pH en el estanque durante el último mes. Si no hace este proceso escoge la opción “No registra”.

Nota. Instrumento aplicado a los acuicultores.

Con los datos recolectados, se analizaron aspectos críticos del proceso productivo de algunos acuicultores del departamento de Córdoba.

Se realizó un análisis para establecer las frecuencias absolutas y relativas de cada categoría y las medidas de tendencia central para identificar cuánto tiempo dedican actualmente los acuicultores a medir, registrar y analizar variables, adicionalmente se detectaron cuellos de botella o ineficiencias en la gestión de datos. A partir de las respuestas “No registra”, fue posible estimar el porcentaje de acuicultores que no monitorean, no registran o no analizan datos de calidad de agua en sus procesos productivos.

Fase 2. Observación y Recolección de Experiencias

Se escogió una unidad productiva y se realizó una visita técnica con el propósito de analizar su proceso productivo en campo, se acompañó al acuicultor en su rutina diaria y se observó cómo mide, cómo registra las variables de los estanques y cómo las analiza para tomar decisiones.

En primer lugar, se buscó verificar qué variables son las más críticas para medir en los estanques, además de identificar los requerimientos tecnológicos en términos de optimización de recursos asociados al proceso productivo.

Seguidamente se revisó detalladamente el proceso para encontrar dificultades en relación a la captura de señales con los métodos convencionales, de manera que se pudiera verificar si existe la necesidad de reducir errores en la medida.

A continuación, se procedió a verificar si el acuicultor requiere de la inclusión de procesos de registros periódicos en bases de datos, con tal de que la información pueda ser consultada posteriormente y así tomar mejores decisiones. Se concertaron opciones de diseño del dispositivo con el fin de validar las características técnicas de acuerdo a las necesidades propias del acuicultor.

Una vez desarrollado el dispositivo electrónico e integrado con la plataforma web, se realizaron pruebas de rendimiento del sistema desde una perspectiva de usabilidad y facilidad por parte del acuicultor.

Fase 3. Co-Diseño

En la visita técnica, se realizó un taller en compañía del acuicultor y se socializó el sistema a desarrollar usando prototipos esquematizados en papel. A partir de la explicación ofrecida al acuicultor, se le solicitaron sugerencias de mejora, a partir de las preguntas:

¿Cómo te gustaría medir los parámetros de calidad de agua?

¿Cómo te gustaría ver los datos?

¿Qué datos necesitas ver a primera vista?

Se analizaron los requerimientos tecnológicos identificados en la unidad productiva para la implementación de una arquitectura de TI. Se realizó una caracterización de las tecnologías de

sensores, módulos de adquisición y procesamiento de señales, módulos de comunicación inalámbrica, entre otras disponibles en el mercado. De los sensores se analizaron características como voltaje de alimentación, variable física medida, rango y resolución. Por parte de los módulos de procesamiento de señales y comunicación se analizaron características como voltajes de operación, tipos de canales de entrada, tipos de canales de salida y protocolos de comunicación. Con base en las sugerencias dadas por el acuicultor, se planteó una lista de requerimientos como base para desarrollar el sistema propuesto. El Stack propuesto para dar solución a los requerimientos se presenta de la siguiente forma:

Sensores – Arduino Nano y ESP32 – Broker MQTT – NodeRED – InfluxDB – Grafana.

Fase 4. Desarrollo

El sistema propuesto consta de dos capas, el dispositivo electrónico y la plataforma de visualización de datos.

Para el desarrollo del dispositivo electrónico, se integraron los sensores de Temperatura, pH, EC y OD, estos sensores transmiten señales a un Arduino Nano, que a su vez responde a un ESP32 que gestiona las medidas y su registro en plataforma Web complementado con una pantalla Touch de la marca Nextion. A continuación, se detallan las características técnicas de estos elementos.

Sensor de Temperatura DS18B20. El sensor de temperatura DS18B20 consta de una sonda que integra una interfaz digital de un solo cable (1-wire), lo que facilita las mediciones de temperatura en un amplio rango y simplifica su manejo con microcontroladores (Patil, Jadhav, Swami, & Kamble, 2024). En la Figura 6 se muestra el sensor con su respectivo empaque.

Figura 6

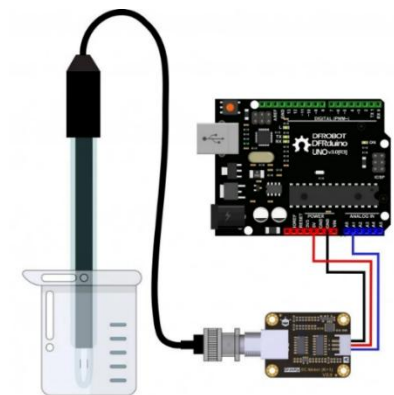
Sensor de Temperatura DS18B20



Nota. Tomado de DFROBOT. <https://wiki.dfrobot.com/dfr0198/>

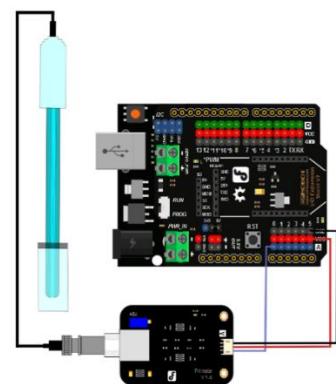
El DS18B20 cuenta con tres cables, uno rojo correspondiente a VDD, uno negro correspondiente a GND y uno amarillo correspondiente a la señal digital de salida asociada a la temperatura. Se conecta el cable rojo al pin 3.3 V de Arduino Nano, el cable negro a GND y el cable amarillo a una resistencia de $4.7K \Omega$ que a su vez se conecta a 3.3 V. El cable amarillo le transmite la temperatura al Arduino Nano usando un pin digital mediante la librería `<OneWire.h>` y `<DallasTemperature.h>`.

Sensor Gravity EC. El sensor Gravity integra una sonda con un circuito que opera con un voltaje entre 3 V y 5 V, la sonda se conecta a través de un conector de tipo BNC y un circuito responsable de la comunicación con Arduino, puede medir valores de conductividad entre 1 ms/cm y 15 ms/cm ver Figura 7. Este sensor envía las señales de conductividad a través de un puerto analógico de Arduino Nano. Para programarlo se usaron las librerías “DFRobot_EC.h” y “<EEPROM.h>” en el entorno de programación de Arduino (DFROBOT, s.f.).

Figura 7*Sensor de Conductividad Eléctrica*

Nota. Tomado de DFROBOT. <https://wiki.dfrobot.com/dfr0300/docs/20349>

Sensor Gravity pH. El sensor analógico de pH, consta de una sonda con un conector tipo BNC y un circuito responsable de la comunicación con Arduino, ver Figura 8. Este sensor se alimenta con 3.3 V de Arduino Nano, cuenta con un rango de medida de pH entre 0 y 14, para operar se debe conectar la sonda de pH con conector BNC, y luego conectar el cable de señal del circuito al puerto de entrada analógica de Arduino Nano (DFROBOT, s.f.).

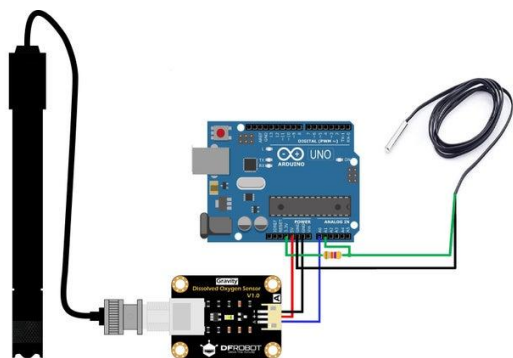
Figura 8*Sensor de pH*

Nota. Tomado de DFROBOT. <https://wiki.dfrobot.com/sen0161/docs/19898>

Sensor Gravity OD. El sensor de Oxígeno Disuelto Gravity, adquiere señales de OD y las transmite al Arduino Nano, este sensor integra un conector BNC y un circuito de comunicación, el sensor se alimenta con un voltaje de 3.3 V y cuenta con un rango de medida de OD entre 0 y 20 mg/L (Nesh, s.f.), ver Figura 9.

Figura 9

Sensor de Oxígeno Disuelto



Nota. Tomado de *Calibrated Dissolved Oxygen Meter*. NeshS.

<https://www.instructables.com/Calibrated-Dissolved-Oxygen-Meter/>

Arduino Nano. Se usó la plataforma Arduino debido a que es un microcontrolador de hardware y software libre, además de contar con las librerías que permiten la adquisición de señales de los sensores descritos (Patil et al., 2024). La versión de Arduino Nano se integra en el diseño para leer señales digitales provenientes del sensor de temperatura y analógicas provenientes de los sensores EC, pH y OD. El Arduino Nano se alimenta con 5 V y usa el puerto de comunicación serial UART para transferir datos de los sensores al ESP32.

ESP32. Se usó el ESP32 debido a que es una plataforma con características mejoradas respecto a Arduino, integrando pines GPIO (Entradas/Salidas de Propósito General), ADC para la transformación de señales analógicas a digitales y el protocolo MQTT necesario para la publicación de parámetros a la plataforma web. El ESP32 opera con un voltaje de 5 V, se

programa con el mismo entorno de programación de los Arduino y permite dotar a los dispositivos electrónicos con comunicación Wi-Fi y Bluetooth (Mamun et al., 2024). Algunos de los sensores descritos no pueden ser controlados directamente desde el ESP32, por tanto es necesario que trabaje en conjunto con el Arduino Nano para capturar las señales de los sensores y enviar datos a internet.

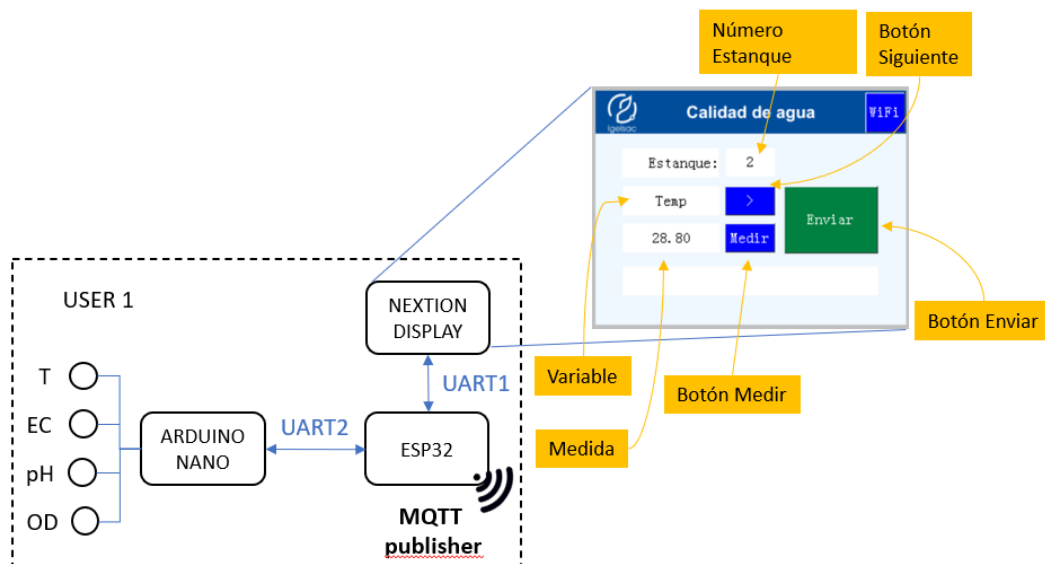
Display Nextion. La pantalla Nextion se integra en el proyecto como HMI local (visualización + entrada táctil) conectada por puerto UART al ESP32. Se usó una pantalla táctil Nextion de 2,4 pulgadas modelo NX2432T024, la cual integra una TFT de 320×240 píxeles con panel táctil resistivo de 4 hilos, controlador gráfico, memoria flash de 4 MB y 2 KB de RAM para gestionar de forma local la interfaz. La conexión con ESP32 se da mediante 4 pines (alimentación y datos), donde se conectan VCC a 5 V, GND a tierra común, TX del Nextion al pin RX de ESP32 y RX del Nextion al pin TX de ESP32.

La interfaz gráfica se diseñó con el software Nextion Editor, el cual permite diseñar componentes como botones, textos, barras de progreso y deslizadores mediante un entorno WYSIWYG, seguidamente se generó un archivo ejecutable y se descargó al display Nextion mediante memoria SD. La lógica pesada (cálculos, red) se dejó para ESP32 y Arduino, en este sentido la pantalla Nextion se programó para mostrar variables (pH, Temperatura, OD, EC) y gestionar procesos de lectura y transmisión de los datos provenientes de los sensores.

Conexión de Módulos y Sensores. El sistema se puede agrupar en tres dispositivos principales, una pantalla Nextion para la interacción del usuario, un Arduino Nano conectado con los sensores para la toma de medidas y un ESP32 para la publicación en la nube, ver Figura 10.

Figura 10

Esquema del Sistema Electrónico



Nota. Elaboración propia.

La pantalla Nextion es la interfaz entre el usuario y el sistema electrónico, cuenta con los siguientes elementos:

Número Estanque. Es una caja de texto editable, cuando el usuario toca esa caja se abre un cuadro para digitar números enteros. En esta caja el usuario puede indicar el estanque en el que tomará la medida.

Variable. Es una caja de texto que muestra la variable que será medida. En el ejemplo de la Figura 10 aparece “Temp” indicando que el valor medido corresponde a temperatura.

Botón Siguiente: es el elemento que usa el usuario para escoger la variable que desea medir, cada vez que hace un nuevo toque aparece la siguiente “Variable”, de esta forma el usuario navega entre “Temp”, “pH”, “OD” y “EC”.

Botón Medir. Este botón gestiona la lectura de la variable escogida, enviando un comando al puerto serial UART1 del ESP32. Si la variable es “Temp” el comando es “T”, si la

variable es “pH” el comando es “H”, si la variable es “OD” el comando es “O” y si la variable es “EC” el comando es “C”.

Medida. Es una caja de texto que muestra la medida de la Variable después de tocar el botón “Medir”, cuando el usuario toca “Medir” la pantalla envía el comando “T” (o el que corresponda según la Variable) al puerto serial, seguidamente el ESP32 recibe el comando a través del puerto UART1 y lo reenvía a Arduino Nano a través del puerto UART2, el Arduino Nano ejecuta la función de medida de la sonda según el comando recibido por el UART2 y devuelve por el mismo puerto la respuesta del sensor, finalmente, el ESP32 recibe la medida de la variable y la reenvía a la pantalla, a través del puerto UART1, donde es mostrada en la caja de texto “Medida”.

Función adicional de Medida. A petición del Acuicultor, se incluyó la opción de digitar la medida en la pantalla de forma manual, en caso de que el sensor usado sea diferente a la tecnología del sistema propuesto, por ejemplo, un termómetro o un kit colorimétrico.

Botón Enviar. Este botón controla el envío de datos a la nube una vez que el usuario indique el estanque, escoja la variable y tome la medida. Su función es configurar un mensaje compuesto que incluye el estanque, la variable y la medida, y enviarlo a través del puerto serial UART1 al ESP32. Un ejemplo del mensaje enviado desde la pantalla al ESP32 sería “2:Temp:28.80”, indicando que es una medida de temperatura del estanque 2 cuyo valor es 28.80 °C.

El ESP32 es el cerebro de la operación, está configurado para conectarse a una red WiFi, conectarse a un Broker MQTT, recibir comandos de la pantalla para gestionar las medidas, generar topics y publicar mensajes al Broker MQTT. Su programación se describe a continuación:

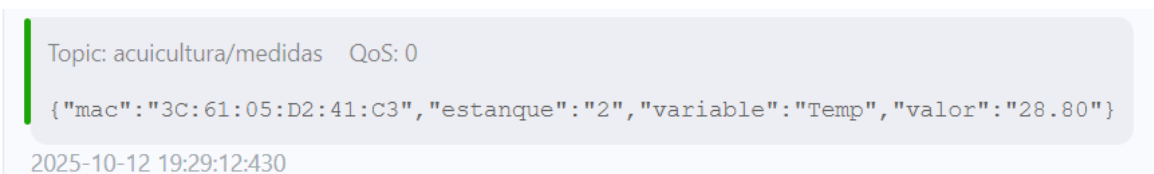
Cuando el ESP32 recibe datos desde la pantalla a través del puerto serial UART1 identifica qué acción debe realizar:

Si recibe la letra “T”, “H”, “O” o “C” reenvía la misma letra mediante el puerto serial UART2 al Arduino Nano para que tome la medida, espera que Arduino Nano responda y devuelve la medida por el puerto UART1 a la pantalla.

Si recibe un mensaje compuesto, (como el del ejemplo “2:Temp:28.80”), descompone el mensaje en tres variables teniendo en cuenta la separación “:”, la primera parte del mensaje la guarda en una variable llamada “estanque”, la segunda parte del mensaje la guarda en una variable llamada “variable” y la tercera parte del mensaje la guarda en una variable llamada “valor”. Seguidamente crea una variable llamada “macAddr” donde guarda la dirección MAC del ESP32 (esta dirección es única y se usará para saber qué dispositivo envía medidas a la plataforma web en caso de que existan más usuarios), luego crea una variable llamada “topic” con el valor "acuicultura/medidas" para publicar en el Broker MQTT, seguidamente configura un mensaje en formato JSON, llamado “payload” que contiene la mac, el estanque, la variable y el valor y finalmente publica “payload” al topic creado. En la Figura 11 se muestra un ejemplo del mensaje publicado al Broker MQTT.

Figura 11

Mensaje Publicado al Broker MQTT



```
Topic: acuicultura/medidas  QoS: 0
{"mac": "3C:61:05:D2:41:C3", "estanque": "2", "variable": "Temp", "valor": "28.80"}
2025-10-12 19:29:12:430
```

Nota. Elaboración propia.

El Arduino Nano es el encargado de tomar las medidas de las cuatro sondas, apoyado en las librerías que los fabricantes de las sondas han dispuesto para su lectura mediante plataformas Arduino. Su función consiste en esperar comandos que lleguen a su puerto serial (provenientes del ESP32) y según la letra recibida ejecutar la medida correspondiente para devolver su valor a través del mismo puerto.

Configuración de la Arquitectura de TI. La otra etapa del desarrollo consta de la arquitectura de TI necesaria para implementar la solución propuesta. Esta arquitectura se propuso a partir de las características ofrecidas por el ESP32, que puede conectarse via WiFi y publicar haciendo uso del protocolo MQTT. La arquitectura propuesta integra el Broker MQTT, NodeRED, InfluxDB y Grafana, cuyos servicios se desplegaron en un container Docker en una instancia de Google Cloud.

Mosquitto. Es el Broker MQTT escogido, es el responsable de la integración del dispositivo y las aplicaciones; en esta plataforma el ESP32 juega el rol de “publicador MQTT”, los publicadores son clientes que establecen canales o “topics” en el Broker MQTT y ahí envían los datos de interés cada vez que un usuario realiza el procedimiento de envío de datos. Dentro de la programación del ESP32 se creó el topic “acuicultura/medidas”, de manera que el siguiente servicio (Node-RED), dedicado a la gestión de almacenamiento de los datos que se publican en el Broker juega el rol de suscriptor del topic “acuicultura/medidas”.

Node-RED. Es la plataforma donde se programó la función encargada de la gestión del almacenamiento de datos provenientes de los sensores, el diseño incluye tres nodos “Nodo mqtt in – Nodo function – Nodo influxdb out”.

Nodo mqtt in. Nombrado como “acuicultura/medidas” y configurado para conectarse a la url y el puerto del Broker, además este nodo se suscribe al topic “acuicultura/medidas”.

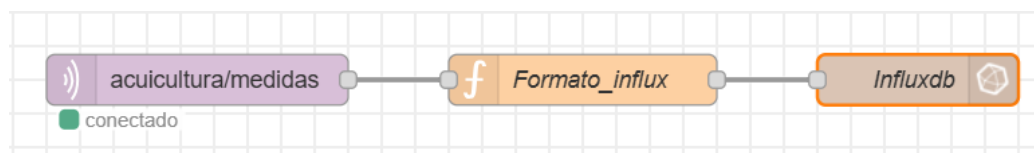
Nodo function. Nombrado como “Formato_influx” y configurado para tomar el mensaje desde el nodo mqtt in y darle el formato requerido por InfluxDB para que posteriormente se almacene en la base de datos con la estructura adecuada.

Nodo influxdb out. Nombrado como “Influxdb” y configurado para conectarse a la url y el puerto de InfluxDB, además este nodo incluye como parámetros la “organización”, el “bucket” donde se almacenan los datos y la “medición”, también se define un API TOKEN de seguridad que InfluxDB genera de forma única para poder almacenar datos en el respectivo bucket.

En la Figura 12 se muestra el flujo de datos diseñado en Node-RED.

Figura 12

Flujo de Datos en Node-RED



Nota. Elaboración propia.

La configuración precisa de cada nodo incluyendo cada parámetro de conexión, de suscripción, de formateo y de seguridad permite que los datos lleguen de forma segura a la base de datos para que luego sea consultada.

InfluxDB. Es la base de datos de series de tiempo usada para el almacenamiento y posterior consulta de las medidas. Desde Node-RED se puede acceder a este servicio mediante la creación de un bucket y una medición, además de la generación de un API TOKEN de seguridad que evita que otras aplicaciones consulten o almacenen datos. La estructura de almacenamiento de datos propuesta consiste en tres tags (MAC, Estanque y Variable) y un field (valor numérico),

en la Figura 13 se muestra un ejemplo de esta estructura con base en una medida de temperatura en el estanque 2 publicada por un ESP32 cuya mac es “94:B9:7E:F9:6A:C0”.

Figura 13

Estructura para Almacenamiento de Datos en InfluxDB

```
6/2/2026, 20:08:11 nodo: debug 1
msg.payload : Object
  ▼ object
  ▼ tags: object
    MAC: "94:B9:7E:F9:6A:C0"
    Estanque: "2"
    Variable: "Temperatura"
  ▼ fields: object
    valor: 25
```

Nota. Elaboración propia.

Con base en la estructura propuesta, cuando una aplicación de visualización de datos se conecte con InfluxDB podrá hacer consultas y filtrarlas, por ejemplo, una aplicación puede solicitar todas las medidas de pH en el estanque 3 tomadas con del dispositivo “94:B9:7E:F9:6A:C0” durante la última semana.

Grafana. Es la herramienta usada para la visualización de datos, esta aplicación extrae datos de InfluxDB y los muestra a través de gráficas de tiempo y widgets interactivos. Para poder acceder a InfluxDB, al igual que sucede con el nodo “influxdb out” de Node-RED, es preciso configurar el dashboard para que se conecte a la url y puerto de InfluxDB, así como la configuración para que consulte en el bucket y la medición asociadas a las medidas que se desean consultar usando el API TOKEN respectivo.

Una vez conectadas las dos herramientas, se procedió a diseñar un panel de usuario conformado por tres menús desplegables (dispositivo, estanque y variable), una gráfica de

medida vs tiempo y cuatro widgets dinámicos que le permiten al usuario visualizar el último valor medido de cada parámetro, ver Figura 14.

Figura 14

Diseño de Panel de Visualización



Nota. Elaboración propia.

Según el diseño propuesto, cuando el usuario ingresa a Grafana puede escoger el dispositivo mediante un menú desplegable que, a futuro, puede asociarse a cualquier otra Unidad de Producción Acuícola, seguidamente puede escoger el estanque mediante otro menú desplegable asociado al número que identifica a un estanque particular, finalmente, puede escoger la variable de interés que desea analizar (pH, Temp, OD, EC) mediante otro menú desplegable. La gráfica central muestra de forma automática la medida de la variable escogida asociada al estanque y al dispositivo a lo largo del tiempo. Adicionalmente, el usuario puede ver el último valor medido de cada variable mediante cuatro widgets circulares.

Fase 5. Evaluación del Sistema

Se realizó una evaluación desde dos enfoques, por un lado, métricas técnicas de rendimiento de toda la arquitectura (dispositivo–MQTT–Node-RED–InfluxDB–Grafana) y, por otro, métricas de usabilidad y soporte a la tarea del usuario en escenarios simulados.

Rendimiento Técnico del Sistema. Se tomaron medidas de latencia extremo a extremo, por lo que se diseñó un escenario de publicación arbitraria de datos de sensores reales y simulados variando frecuencia de muestreo, número de nodos y número de variables (pH, OD, temperatura, etc.). Las medidas de latencia incluyeron desde el dispositivo hasta la visualización y los tiempos de respuesta de consultas en Grafana.

Se ejecutaron pruebas de monitoreo en tiempos diferentes registrando el número de muestras esperadas vs recibidas y con esto se procedió a calcular la disponibilidad del sistema.

Usabilidad e Interacción. En compañía del acuicultor se hicieron pruebas para evaluar la facilidad de uso, la cual se asocia al tiempo para completar tareas de toma de medida, registro de datos, análisis de datos y satisfacción al trabajar con el dispositivo y los tableros de Grafana. Se definieron cinco tareas para que el acuicultor ejecutara con el dispositivo electrónico y seis tareas para que el acuicultor ejecutara con Grafana, por ejemplo: escoger el estanque “1”, medir la variable “EC” y registrarla en la plataforma Web o por ejemplo, ir a Grafana, escoger el estanque “1” y visualizar la variable “Temp” mediante una gráfica.

Resultados

Se propuso la implementación de una plataforma web de visualización de datos conformada por un dispositivo electrónico de monitoreo de parámetros de calidad de agua y el despliegue de cuatro servicios de TI en una instancia de Google Cloud.

En primer lugar se planteó la identificación de los requerimientos tecnológicos de las Unidades de Producción Acuícola a partir de un análisis contextual del sector, mediante la aplicación de una encuesta a 20 productores del departamento de Córdoba, esto se complementó con un análisis más detallado enfocado en el proceso productivo de un acuicultor a través de una visita técnica para la recolección de experiencias.

A partir de los requerimientos tecnológicos identificados en el sector acuícola y complementados con la recolección de experiencias de la unidad productiva de estudio, se diseñó un stack de servicios integrados que incluyen hardware para la adquisición y procesamiento de señales y software en la nube para la visualización.

Finalmente, se implementaron los servicios y se evaluó el desempeño y la usabilidad de los elementos que constituyen la plataforma web de visualización de datos, a partir de pruebas controladas de laboratorio y complementado con un análisis de la experiencia de usuario con apoyo de un acuicultor.

A continuación, se describen los tres resultados de esta investigación.

Identificación de Requerimientos Tecnológicos en el Sector Acuícola de Córdoba

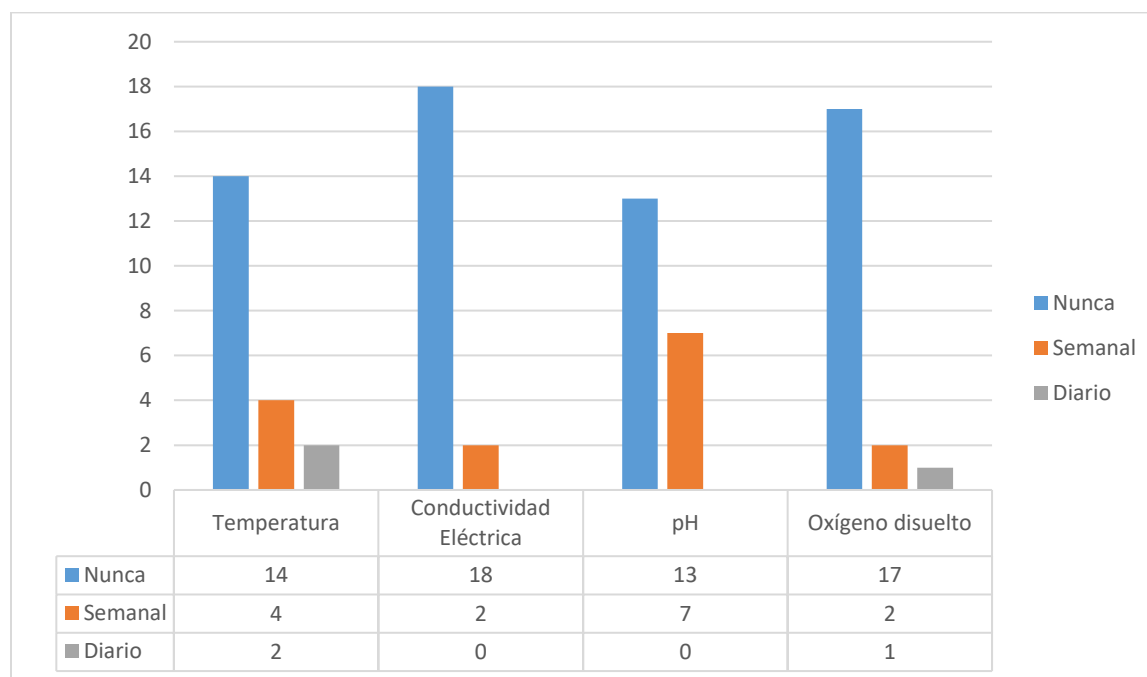
Se planteó un análisis asociado al contexto del sector acuícola en Córdoba que incluye la aplicación de una encuesta a 20 productores y la recolección de experiencias de un acuicultor mediante la observación de su proceso productivo.

Aplicación de Encuesta

Se aplicó una encuesta a 20 acuicultores del departamento de Córdoba, de los cuales 18 (90%) se encuentran en zona rural y presentan características similares en relación a las tecnologías requeridas. Uno de los aspectos más importantes de la encuesta tiene que ver con la medición de los parámetros de calidad de agua de los estanques. En la Figura 15 se muestra la frecuencia de las mediciones por cada variable.

Figura 15

Mediciones por Variable



Nota. Elaboración propia.

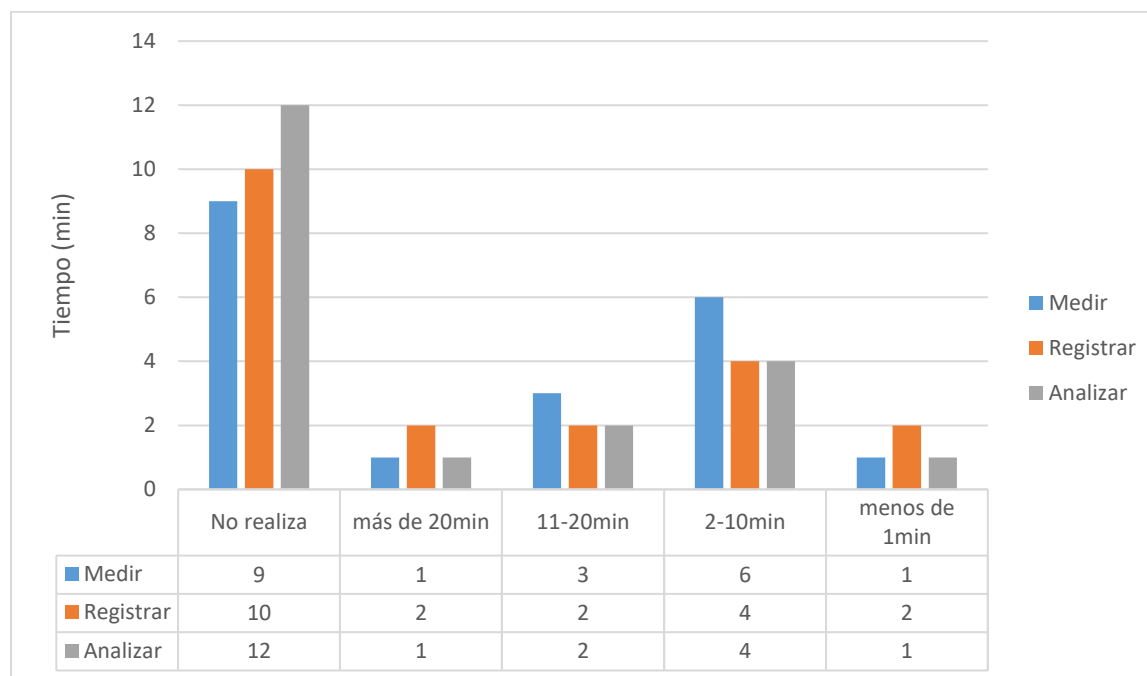
Se puede observar que la conductividad eléctrica es el parámetro menos medido por los acuicultores encuestados, monitoreado sólo por dos productores, lo que representa el 10% de la muestra. Siete de los encuestados (35%) monitorean pH, siendo la variable a la que más tienen acceso los acuicultores. La temperatura la monitorean 6 acuicultores y el oxígeno disuelto, que es

de mucha importancia, solo lo monitorean 3 acuicultores de los encuestados. Con estos datos se tiene un panorama poco favorable y se requiere con urgencia que los productores encuestados empiecen a monitorear las variables de su proceso.

En relación a los tiempos que demandan los procesos de medida, registro y análisis de datos, en la Figura 16 se muestra el estado actual de las unidades productivas en estudio.

Figura 16

Tiempos que Demandan los Procesos de Medida, Registro y Análisis de Datos



Nota. Elaboración propia.

En el proceso “Medir” el productor prepara su herramienta de medición y toma lectura del parámetro que desea, en este proceso uno de los acuicultores encuestados (5%) tarda menos de un minuto en medir una variable de calidad de agua, seis tardan entre 2 y 10 minutos, tres tardan entre 11 y 20 minutos, uno tarda más de 20 minutos y nueve de los acuicultores encuestados (45%) no miden ninguna variable de calidad de agua. El proceso “Registrar”

consiste en guardar la medida en un software, en la nube o en un cuaderno de apuntes, este proceso le toma menos de un minuto a dos acuicultores, entre 2 y 10 minutos a cuatro, entre 11 y 20 minutos a dos, más de 20 minutos a uno y 10 de los acuicultores encuestados (50%) no registran parámetros de calidad de agua. Finalmente, el proceso “Analizar” consiste en acceder a información registrada y verificar el comportamiento de cualquier parámetro para tomar decisiones, este proceso le toma menos de un minuto a un acuicultor, entre 2 y 10 minutos a cuatro acuicultores, entre 11 y 20 minutos a dos acuicultores, más de 20 minutos a uno y 12 de los acuicultores encuestados (60%) no analizan sus parámetros históricos para la toma de decisiones.

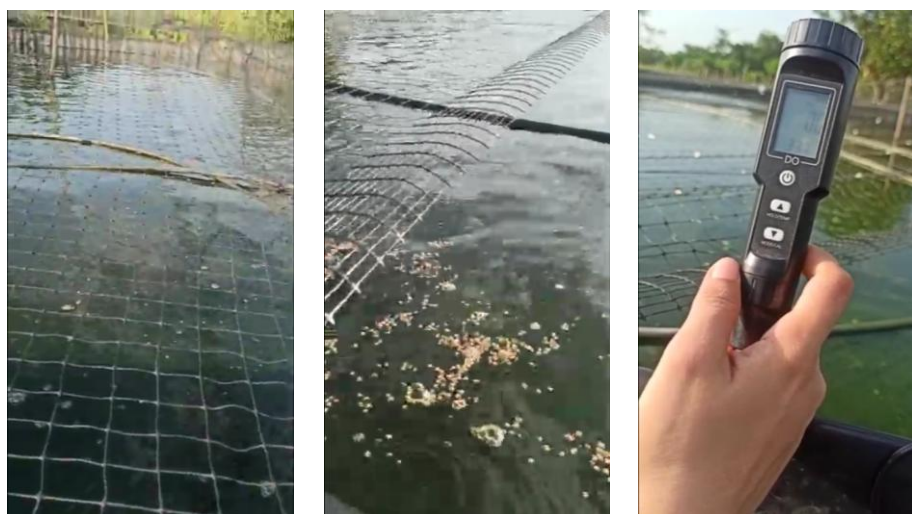
Recolección de Experiencias

Se hizo revisión del proceso productivo de una Unidad de Producción Acuícola ubicada en una vereda del departamento de Córdoba, se pudo verificar la necesidad de monitorear algunas variables críticas dentro del estanque. La unidad productiva requiere minimizar el desperdicio de recursos asociados al proceso productivo, en este sentido, se evidencia el interés del acuicultor por implementar técnicas de control. Otro punto clave que se pudo observar, es que la unidad productiva requiere reducir errores en las mediciones, cuyo proceso de registro y trazabilidad depende en gran parte de algún operario. Finalmente, un aspecto clave es que, aunque las mediciones se pueden realizar con equipos especializados asequibles en el mercado, la unidad productiva también requiere de la inclusión de procesos de registros periódicos donde la información quede guardada, con el fin de tomar mejores decisiones, esto es de gran interés para el acuicultor ya que considera fundamental contar con acceso en tiempo real y desde cualquier lugar a la información, reportes históricos y gráficos.

En la visita técnica se observó que el acuicultor cuenta con tres estanques donde produce tilapia Roja, esta característica es general, ya que manifiesta que en su mayoría, todas las Unidades Productivas cuentan con más de un estanque, ver Figura 17. Partiendo de esta observación, es necesario que el sistema sea portable y no se instale directamente en el estanque, sino que el acuicultor pueda transportar el equipo de un estanque a otro y tomar la respectiva medida.

Figura 17

Estanques de Producción Acuícola



Nota. Elaboración propia.

El acuicultor mide diariamente el pH, la temperatura y el Oxígeno Disuelto, lo hace a través de sondas individuales y los datos no son registrados, ver Figura 18. En este sentido, las decisiones que toma son en tiempo real, es decir, toma la medida y ejecuta las acciones de control.

Figura 18

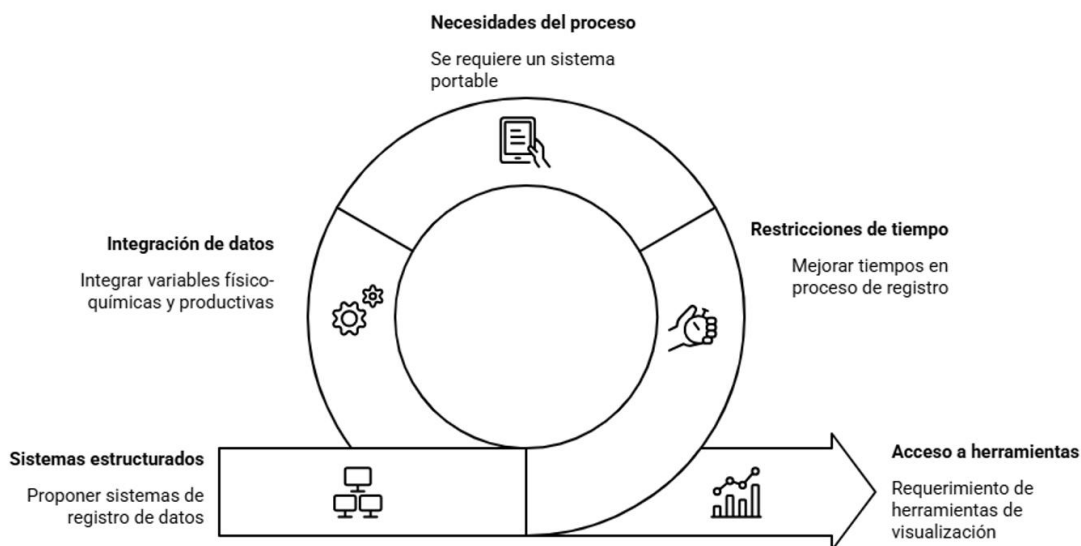
Sondas de Medición de pH, Temperatura y Oxígeno Disuelto



Nota. Elaboración propia.

Adicional a los sensores de pH, Temperatura y Oxígeno Disuelto, con los que cuenta actualmente el productor, manifiesta que es fundamental para su proceso productivo darle seguimiento a otras variables, por lo que requiere que la pantalla tenga la opción de diligenciar de forma manual el Consumo de alimentos (gramos), el Número de muertes, el Peso promedio (gramos) y el Largo promedio (cm). Para facilitar el proceso de captura de datos, se le sugirió realizar las medidas y su registro de forma individual, esto asegura que los mensajes publicados en el Broker MQTT sean simples y la gestión de su almacenamiento sea eficiente, así como también le facilita al usuario su interacción con la pantalla.

Después de analizar el contexto del sector acuícola mediante la encuesta y complementar su análisis con una visita técnica a una unidad productiva fue posible identificar los requerimientos tecnológicos, los cuales se resumen en la Figura 19.

Figura 19*Requerimientos Tecnológicos en la Gestión de Datos Acuícolas*

Nota. Elaboración propia con íconos de la herramienta Napkin AI.

Arquitectura de TI para el Monitoreo y Visualización de Datos

Se planteó una fase de Co-diseño, mediante un taller participativo en compañía de un acuicultor, a partir de este encuentro se estableció el diseño del hardware y el Stack de servicios de TI para su desarrollo y puesta en marcha. Seguidamente se desarrolló el dispositivo electrónico basado en un arreglo de sensores de calidad de agua, Arduino Nano y ESP32, y complementados con la implementación de cuatro servicios desplegados en una instancia de Google Cloud.

Definición del Diseño

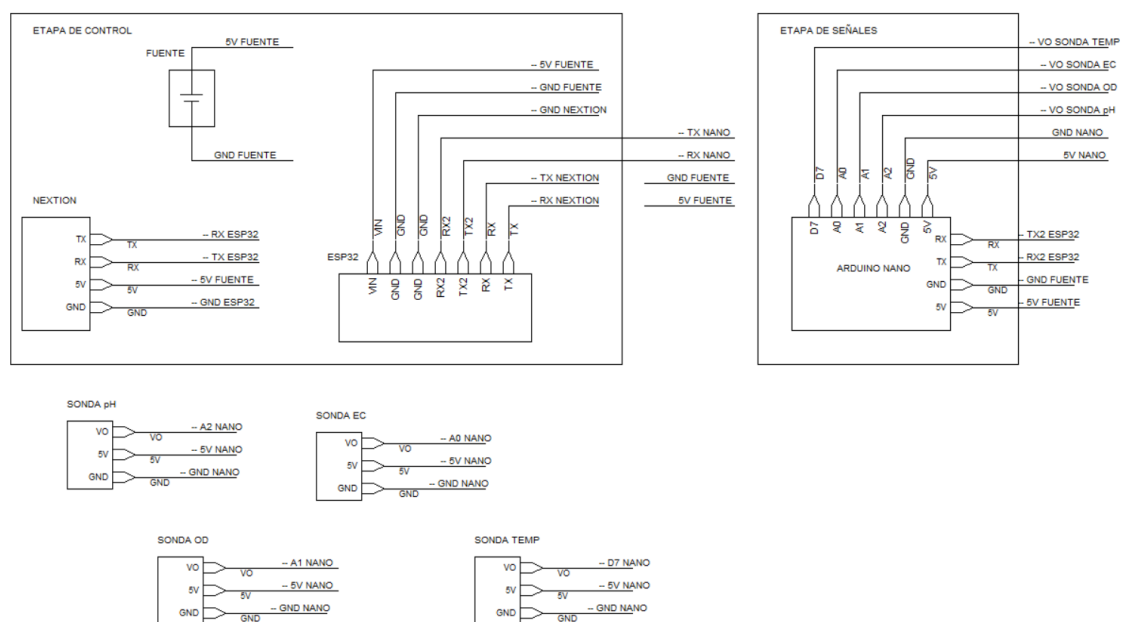
A partir del análisis realizado en la Unidad de Producción Acuícola de estudio, se planteó el diseño de una herramienta tecnológica que integra el siguiente Stack:

Sensores – Arduino Nano y ESP32 – Broker MQTT – NodeRED – InfluxDB – Grafana.

El sistema propuesto consta de una etapa física (hardware) y una plataforma web (software en la nube). El dispositivo electrónico contiene una fuente de voltaje DC portátil, la pantalla Nextion, el ESP32, el Arduino Nano y los sensores. La plataforma web contiene cuatro servicios implementados en una instancia de Google Cloud, Mosquitto, Node-RED, InfluxDB y Grafana. En la Figura 20 se muestra un esquema eléctrico con la conexión de los elementos electrónicos para la toma de medidas y en la Figura 21 se muestra la arquitectura de TI implementada.

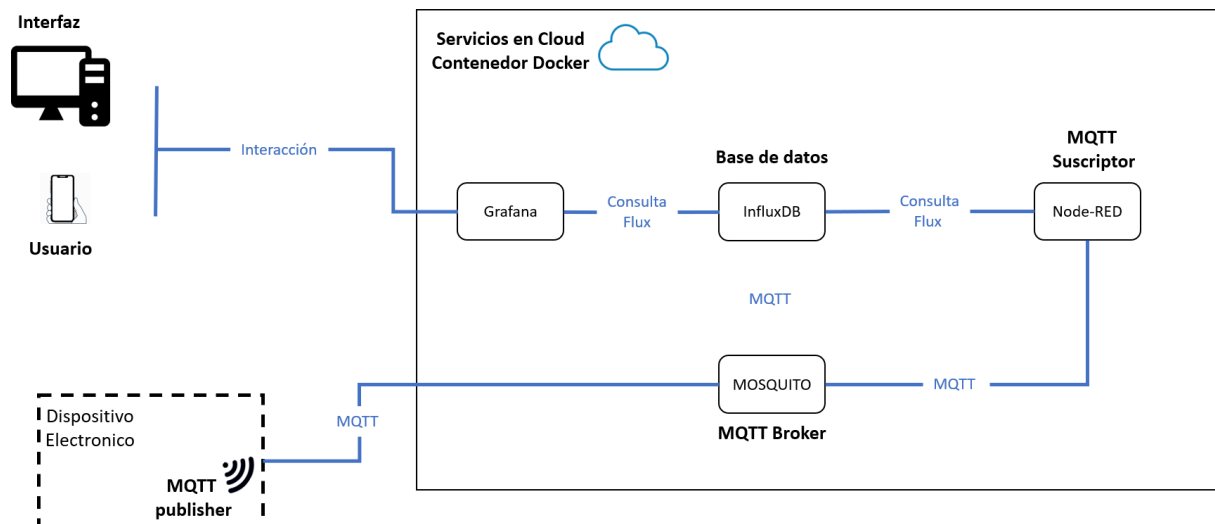
Figura 20

Diagrama Eléctrico del Dispositivo



Nota. Elaboración propia.

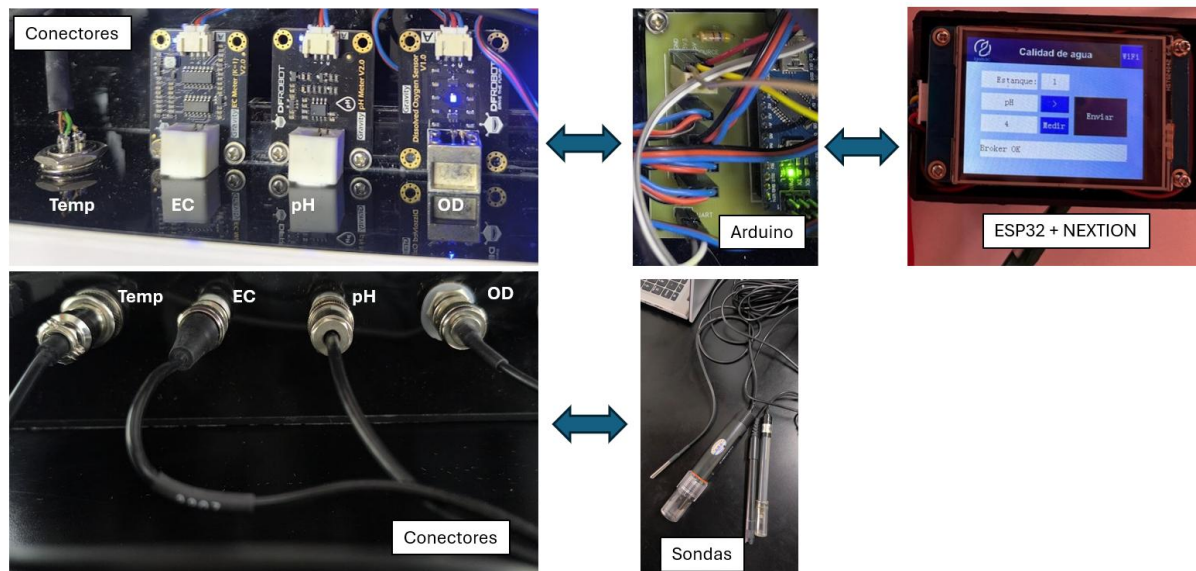
Figura 21

Arquitectura de TI

Nota. Elaboración propia.

Desarrollo del Dispositivo Electrónico y la Plataforma Web

El prototipo electrónico desarrollado fue elaborado en dos partes, una de adquisición y tratamiento de señales electroquímicas y otra de control y registro de datos a la plataforma web, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 22*Desarrollo del Dispositivo Electrónico*

Nota. Elaboración propia.

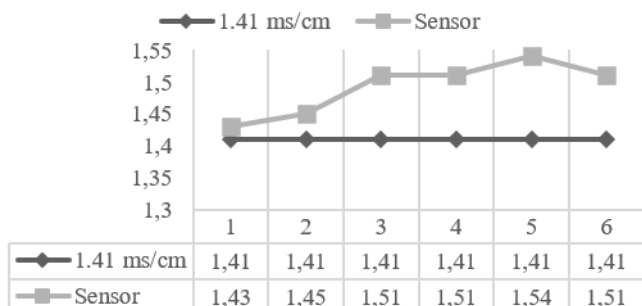
La caja que contiene los elementos de adquisición y tratamiento de señales electroquímicas incluye las sondas de los sensores de Temperatura, Conductividad Eléctrica, pH y Oxígeno Disuelto, el respectivo circuito de acondicionamiento analógico de cada sensor y Arduino Nano para la gestión de librerías de los sensores. La caja que contiene los elementos de control y registro de datos a la plataforma web incluye un ESP32 conectado con una pantalla Touch de la marca Nextion y una fuente de 5VDC portable.

Antes de probar los sensores, se realizaron las respectivas calibraciones mediante las librerías aportadas por el fabricante y el uso de algunas muestras de control, seguidamente se tomaron medidas sobre las mismas muestras y sobre agua cruda para verificar que los sensores capturan señales de forma correcta.

En la Figura 23 se muestran lecturas obtenidas con el sensor de conductividad eléctrica en una muestra de control de 1.41 mS/cm .

Figura 23

Medidas en Muestra con Conductividad Eléctrica de 1.41 ms/cm

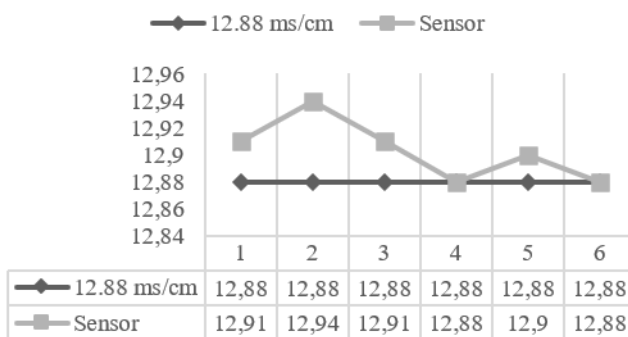


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 24 se muestran lecturas obtenidas con el sensor de conductividad eléctrica en una muestra de control de 12.88 mS/cm .

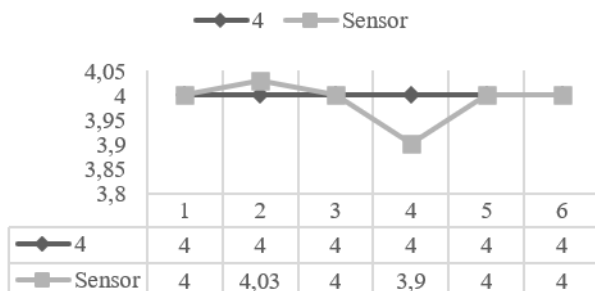
Figura 24

Medidas en Muestra con Conductividad Eléctrica de 12.88 ms/cm

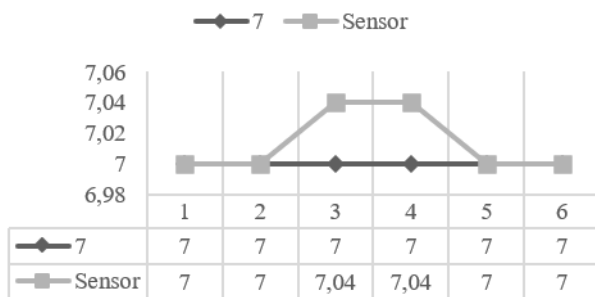


Nota. Elaboración propia.

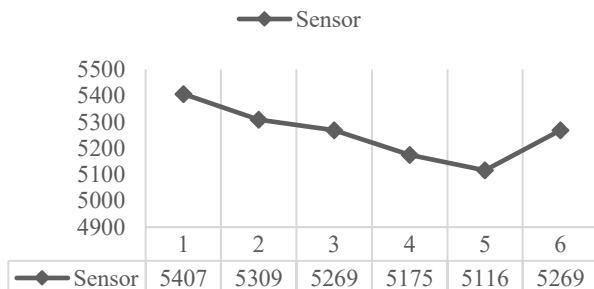
En la Figura 25 se muestran lecturas obtenidas con el sensor de pH en una muestra de control de pH 4.

Figura 25*Medidas en Muestra con un pH de 4**Nota.* Elaboración propia.

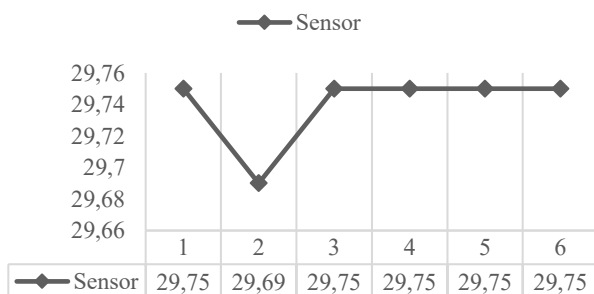
En la Figura 26 se muestran lecturas obtenidas con el sensor de pH en una muestra de control de pH 7.

Figura 26*Medidas en Muestra con un pH de 7**Nota.* Elaboración propia.

En la Figura 27 se muestran lecturas obtenidas con el sensor de oxígeno disuelto en una muestra de agua cruda.

Figura 27*Medida de Oxígeno Disuelto en Agua Cruda**Nota.* Elaboración propia.

En la Figura 28 se muestran lecturas obtenidas con el sensor de temperatura en una muestra de agua cruda.

Figura 28*Medida de Temperatura en Agua Cruda**Nota.* Elaboración propia.***Descripción de los Servicios Implementados***

Se propuso una arquitectura basada en microservicios, donde se pueden independizar todos los procesos y así contar con mayor flexibilidad y escalabilidad.

Se usó un servicio de Google Cloud donde se implementó un contenedor de Docker, en el contenedor se desplegaron cuatro servicios (Mosquitto – Node-RED – InfluxDB - Grafana).

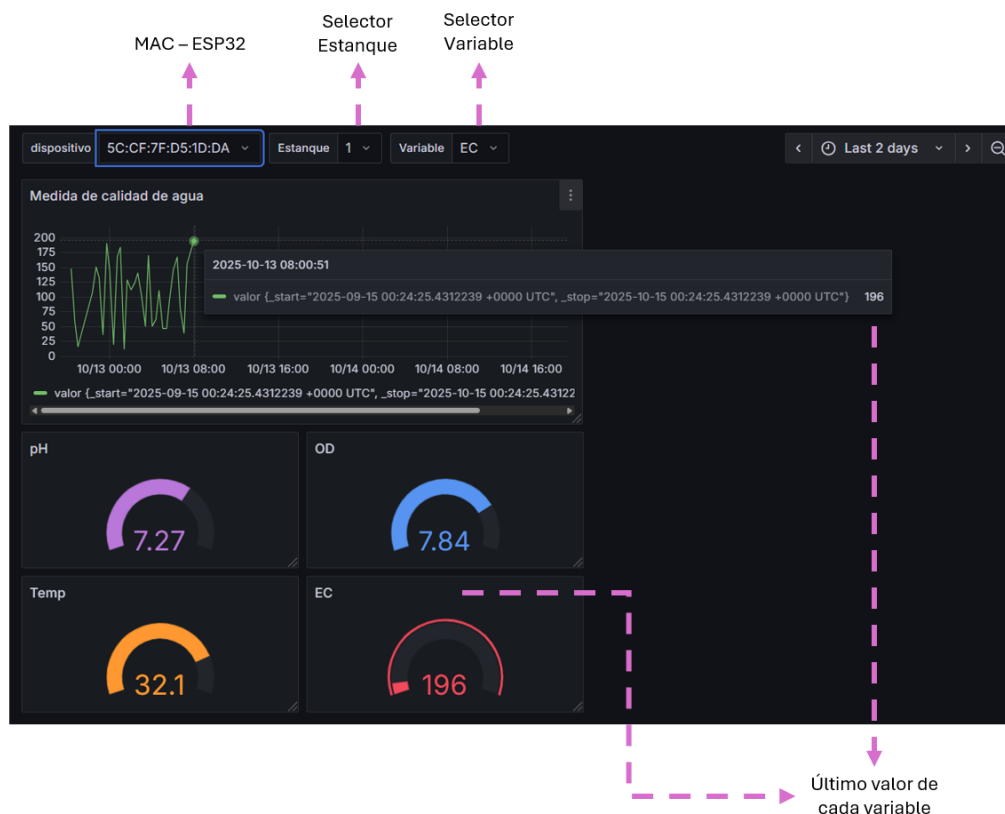
Seguidamente se realizó la configuración de cada herramienta siguiendo los pasos descritos en las fases de desarrollo de la metodología y se diseñó la interfaz de usuario en Grafana de acuerdo a la propuesta inicial acordada con el acuicultor.

La arquitectura desplegada en Google Cloud está diseñada bajo el principio de escalabilidad horizontal y vertical. En su configuración actual, los cuatro microservicios (Mosquitto, Node-RED, InfluxDB y Grafana) operan dentro de un contenedor Docker sobre una instancia de máquina virtual. Esta configuración permite escalar verticalmente aumentando los recursos de cómputo (vCPU y RAM) sin modificar la lógica de los servicios, o escalar horizontalmente mediante la replicación del contenedor usando orquestadores como Google Kubernetes Engine, lo cuál es importante si el sistema se extiende a múltiples unidades productivas. El protocolo MQTT soporta conexiones simultáneas de múltiples dispositivos ESP32, por lo que la adición de nuevos puntos de monitoreo dentro de la misma unidad productiva no requiere modificaciones en la arquitectura base, sino únicamente el aprovisionamiento de nuevas credenciales de acceso al broker. InfluxDB, al ser una base de datos de series de tiempo, está optimizada para ingestión de datos de alta frecuencia, lo que garantiza que el sistema mantiene su desempeño con volúmenes crecientes de registros históricos.

Siguiendo las indicaciones del diseño propuesto, la interfaz de usuario consta de una gráfica para ver las medidas a lo largo del tiempo y una serie de controles para seleccionar la variable deseada, en el estanque deseado en el dispositivo deseado, ver Figura 29.

Figura 29

Interfaz de Usuario en Grafana



Nota. Elaboración propia.

El control para escoger el dispositivo es un menú desplegable que muestra todas las MAC asociadas a los ESP32 que envían datos a la plataforma, Grafana recupera este dato directamente con una consulta a InfluxDB. De la misma forma, los controles para escoger el estanque y la variable de interés son menús desplegables, así, cuando se da clic sobre cada uno de estos controles Grafana consulta en InfluxDB y muestra las opciones de tags almacenados. El diseño de la gráfica de medida vs tiempo está automatizado para extraer y mostrar los datos que corresponden a la variable, el estanque y el dispositivo seleccionado. Finalmente, se agregaron

cuatro widgets interactivos que muestran el último dato de cada variable asociada al dispositivo y estanque seleccionado.

Desempeño de la Plataforma Web

Se propuso la evaluación del sistema de monitoreo mediante dos enfoques, por un lado, el análisis de las métricas técnicas de rendimiento del sistema electrónico y la plataforma web, y por otro, el análisis de las métricas de usabilidad apoyados de la experiencia de un acuicultor.

Rendimiento Técnico del Sistema

A continuación, se muestran las medidas de latencia extremo a extremo, mediante un escenario de publicación arbitraria de captura de datos de sensores (reales y simulados).

En la Tabla 3 se muestra el tiempo promedio que demora el Arduino Nano para devolver la medida de cada sensor de forma experimental. En este tiempo, Arduino toma varias muestras mientras se estabiliza la medida, el promedio se obtuvo mediante un escenario controlado con ayuda de un cronómetro, donde se pudo demostrar que el sistema de captura de datos tarda menos de tres segundos en este proceso.

Tabla 3

Latencia en el Proceso de Captura de Datos de Sensores

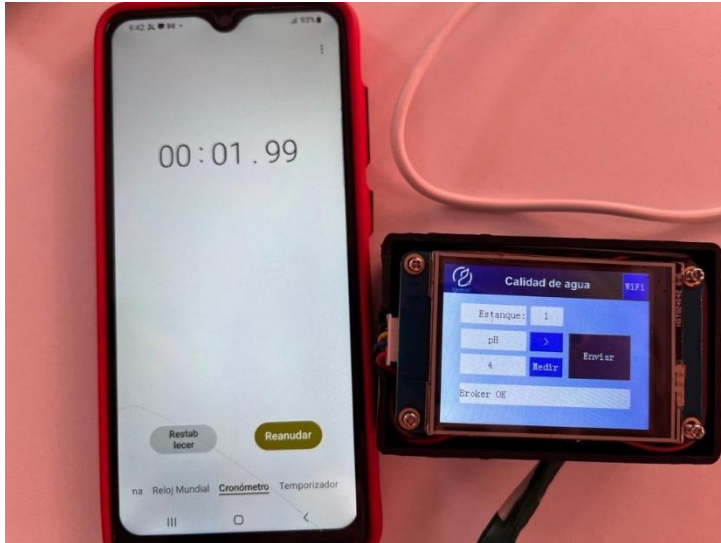
Tarea ejecutada por Arduino Nano	Latencia (segundos)
Captura de temperatura	1.5
Captura de EC	1.9
Captura de OD	2.1
Captura de pH	2.8

Nota. Pruebas realizadas en laboratorio.

El tiempo que tarda el ESP32 para solicitar una medida al Arduino Nano y mostrarla en pantalla fue en promedio de **1.99 s**, ver Figura 30.

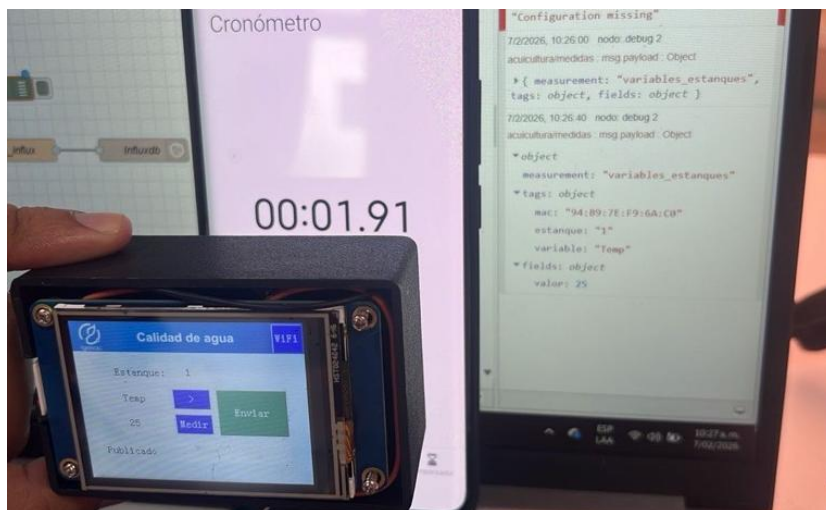
Figura 30

Latencia de Consulta de Dato entre Arduino Nano y ESP32



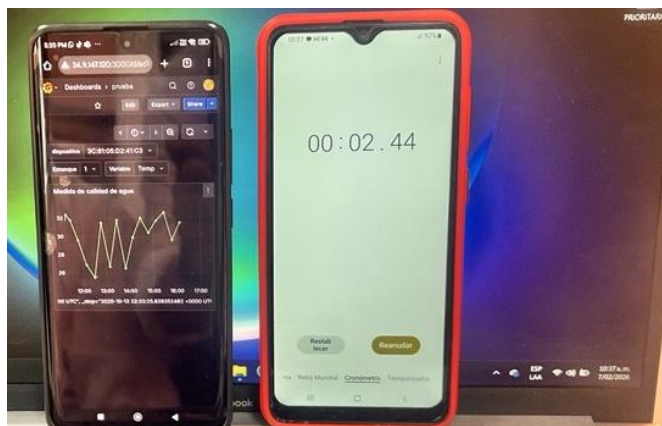
Nota. Elaboración propia.

El tiempo que tarda el dispositivo electrónico en el proceso de registro de una variable, desde que se toca el botón “Enviar” en la pantalla hasta que llega a la plataforma web fue en promedio de **1.91 s**, ver Figura 31.

Figura 31*Latencia de Envío de Datos a la Plataforma Web*

Nota. Elaboración propia.

El tiempo que tarda Grafana para consultar los datos de una variable desde que se selecciona la variable hasta que se muestra la gráfica en pantalla fue en promedio de **2.44 s**, ver Figura 32.

Figura 32*Latencia de Respuesta de InfluxDB a Grafana*

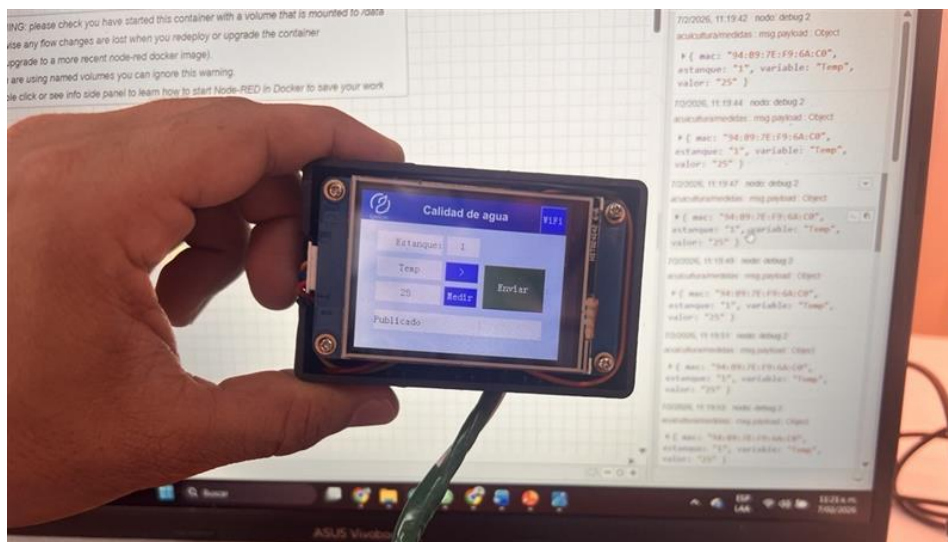
Nota. Elaboración propia.

Al finalizar las pruebas de latencia se puede observar que la latencia de transmisión de datos a la plataforma web es de **1.91 s** y la latencia de extremo a extremo del sistema es de **9.14 s**.

A continuación, se muestran las pruebas asociadas a la disponibilidad del sistema de monitoreo, mediante la identificación de muestras esperadas vs muestras recibidas en la plataforma web. Para el cálculo de la disponibilidad del sistema se hicieron **20** toques al botón “Enviar” en la pantalla del dispositivo, con un período arbitrario entre muestras entre 1 segundo y 1 minuto, usando un valor fijo simulado, seguidamente se verificó el número de muestras recibidas en la plataforma web, resultando **20** muestras recibidas en total, es decir, el dispositivo no presenta pérdida de datos en el proceso de registro, ver Figura 33.

Figura 33

Disponibilidad de los Datos



Nota. Elaboración propia.

Usabilidad e Interacción

Las pruebas de usabilidad e interacción se hicieron en compañía del acuicultor participante, se midió el tiempo que tarda el acuicultor para completar cinco tareas con el dispositivo y seis tareas con Grafana, asociadas a los procesos de toma de medida, registro de datos, análisis de datos. En la Tabla 4 se muestran los tiempos de cada tarea, las cuales fueron completadas con facilidad.

Tabla 4

Tareas Completadas por el Acuicultor

Ítem	Tarea asignada	Tiempo (s)
1	Dispositivo: Encender el dispositivo y esperar que conecte al Broker.	8
2	Dispositivo: Escoger el estanque “1”, medir la variable “EC” y registrarla a la plataforma web.	12
3	Dispositivo: Escoger el estanque “3”, medir la variable “OD” y registrarla a la plataforma web.	18
4	Dispositivo: Escoger el estanque “3”, medir la variable “Temp” y registrarla a la plataforma web.	7
5	Dispositivo: Escoger el estanque “2”, medir la variable “pH” y registrarla a la plataforma web.	13.5
6	Grafana: visualizar los datos de temperatura del estanque “1”.	7
7	Grafana: visualizar los datos de pH del estanque “1”.	5
8	Grafana: visualizar los datos de OD del estanque “2”.	4
9	Grafana: visualizar los datos de pH del estanque “3”.	7
10	Grafana: visualizar los datos de temperatura del estanque “4”.	8
11	Grafana: visualizar los datos de pH del estanque “4”.	4

Nota. Pruebas realizadas mediante simulación de escenarios.

El acuicultor participó en la evaluación sin previo entrenamiento, con el fin de descubrir si el sistema es intuitivo, en este sentido, antes de hacer las pruebas, el acuicultor tomó varios minutos revisando el dispositivo y la aplicación de Grafana en su celular, seguidamente se le explicó el experimento y se le pidió que completara las tareas. Las tareas fueron completadas por

parte del acuicultor sin cometer errores en el proceso de medición, de registro y de análisis de datos en Grafana, mostrando la facilidad de uso del sistema, además, los tiempos mostrados en la Tabla 4 demuestran que las tareas le tomaron entre 4 y 13.5 segundos al acuicultor, lo que sugiere, en este contexto particular, la rapidez con la que un usuario puede llevar su proceso productivo con ayuda de esta herramienta.

El acuicultor manifestó que el dispositivo electrónico presenta una conexión sencilla y logra establecer comunicación con Internet en pocos segundos, lo que facilita su puesta en marcha. Sin embargo, señaló como aspecto a mejorar la necesidad de vaciar la caja de texto donde se muestra el estanque seleccionado en la pantalla para poder elegir uno nuevo sin retrasos, ya que durante las pruebas presentó demoras al momento de cambiar el dato de estanque. Asimismo, reportó dificultades en la interacción con la pantalla táctil, indicando que en varias ocasiones los botones no responden adecuadamente, lo que por momentos obliga a realizar dos pulsaciones para ejecutar una acción, por tal motivo, sugiere el uso de una pantalla de mayor tamaño que mejore la precisión y la experiencia de uso. En cuanto al proceso de análisis de datos en la plataforma web, el acuicultor destacó que la selección del estanque y de la variable de interés resulta más intuitiva que en el dispositivo físico dado que no requiere la digitación de consultas, se realiza mediante menús desplegables permitiendo la visualización automática de las gráficas y representando un avance significativo en su proceso de análisis. Identificó oportunidades de mejora relacionadas con el diseño visual de la plataforma, especialmente en el uso de colores, ya que la interfaz oscura dificulta la lectura de los datos; además, considera que los widgets circulares interactivos que muestran el último valor de cada variable aportan información relevante, pero sugiere la inclusión de un botón que permita desplegar dichos datos únicamente cuando sean requeridos.

Haciendo un análisis de la gobernanza de los datos, es preciso mencionar los objetivos pertenecientes al dominio APO de COBIT, los cuales apoyan la gestión de las tecnologías utilizadas en los procesos que involucran datos. Este proceso se fortalece implementando un ciclo de vida del dato estructurado, desde la adquisición en sensores hasta el almacenamiento en InfluxDB y la visualización en Grafana, con garantías de integridad en la transmisión mediante QoS nivel 1 del protocolo MQTT. Por otro lado, también se identifican oportunidades de mejora continua mediante procesos que apunten a la constitución de un esquema de clasificación que distinga el nivel de sensibilidad de los datos productivos del acuicultor, lo cual también tiene relación con los objetivos pertenecientes al dominio APO. Para esto, es esencial definir los roles de propietario y custodio del dato y así establecer quién asume responsabilidad ante pérdida o uso indebido de la información. Adicionalmente, se requiere la validación de calidad del dato a nivel de plataforma, de modo que registros anómalos, como lecturas fuera de rango sean detectadas.

Una dimensión relevante para la adopción del sistema en la Unidad de Producción Acuícola es el costo de operación y mantenimiento. La arquitectura implementada se basa en software de código abierto (Mosquitto, Node-RED, InfluxDB y Grafana), lo que elimina el costo de licencias. El componente de mayor costo recurrente es el servicio de cómputo en Google Cloud y a esto hay que sumar las horas de un técnico especializado en redes dentro del equipo de trabajo de la Unidad Productiva. Si a futuro se pretende extender la plataforma a otros usuarios, se abre una oportunidad de negocio para ofrecer servicios de gestión de tecnologías de información al sector acuícola, de manera que un solo equipo técnico atienda los casos de todos los usuarios a un costo ajustado. En cuanto al hardware, el dispositivo electrónico desarrollado (Arduino Nano, ESP32, sensores de pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto) tiene un

costo de fabricación estimado de 2 millones y su inversión no es recurrente, salvo que se requieran cambios de pieza. El mantenimiento preventivo se limita a la calibración periódica de los sensores electroquímicos, actividad que el propio acuicultor puede realizar con soluciones de referencia estándar. Este análisis confirma que la solución propuesta es económicamente viable para el perfil socioeconómico del productor acuícola de pequeña y mediana escala en el departamento de Córdoba.

Discusiones

Teniendo en cuenta el estado actual de los procesos de medida, registro y análisis de la calidad de agua por parte de los acuicultores encuestados se tiene que, 9 acuicultores no miden ninguna variable, de los 11 acuicultores que sí miden variables, uno no las registra y de los 10 acuicultores que registran sus variables, 2 no las analizan para tomar decisiones. Esto evidencia que 12 acuicultores (60%) presentan dificultades para analizar su proceso productivo, aun contando con herramientas de monitoreo. El hecho de que 12 acuicultores no estén tomando decisiones basadas en el análisis de datos de sus procesos productivos, demuestra que no hay un impacto positivo contundente asociado al uso de herramientas de monitoreo de la calidad del agua, es decir, aunque algunos cuentan con equipos para medir los parámetros de la calidad de agua, más de la mitad tienen dificultades para analizarlos y tomar decisiones.

Se identificaron tres procesos fundamentales en el sector acuícola, el monitoreo de parámetros de calidad de agua, el registro de datos de calidad de agua y el análisis de datos para tomar decisiones. La encuesta muestra que más de la mitad de los acuicultores (55%) al menos miden una variable, 10 de los acuicultores (50%), aunque con ciertas dificultades, registran lo que miden y 8 de los acuicultores (40%) pueden analizar las variables medidas para tomar decisiones. Tomando como referencia un tiempo de 2 minutos para cada proceso, se verificó que 10 de los acuicultores demoran más de 2 minutos para medir, 8 demoran más de 2 minutos para registrar sus medidas y 7 demoran más de 2 minutos para analizar sus datos históricos. Un solo acuicultor de los encuestados (5%) manifestó que cuenta con tecnologías para medir, registrar sus medidas y acceder a los datos para analizarlos y tomar decisiones en menos de un minuto por cada proceso.

Los antecedentes evidencian avances significativos en el uso de tecnologías IoT para el monitoreo de la calidad del agua en sistemas acuícolas e hidropónicos, particularmente mediante la integración de sensores fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura y otras variables críticas, junto con plataformas de microcontroladores como Arduino y ESP32. Los trabajos de Lin et al., (2021), Sulaiman et al., (2024) y Yamuna et al., (2023) demuestran que la automatización del proceso de adquisición y transmisión de datos, apoyada en infraestructuras inalámbricas y plataformas web o móviles, mejora la continuidad del monitoreo y la capacidad de respuesta ante cambios en la calidad del agua. Asimismo, investigaciones como las de Cho et al., (2024) destacan la importancia de la compensación automática del drift de sensores para garantizar la confiabilidad de las mediciones, mientras que los trabajos de Yamuna et al., (2023) y Kanagachidambaresan (2025) incluyen técnicas de analítica avanzada y aprendizaje automático para la predicción y gestión de los parámetros de calidad del agua. Los trabajos mencionados validan la pertinencia del uso de arquitecturas IoT, sensores en tiempo real y analítica de datos como herramientas clave para mejorar la sostenibilidad, eficiencia y control en los procesos acuícolas. Sin embargo, en estos trabajos se observan vacíos relacionados con la contextualización tecnológica en entornos productivos locales, la usabilidad de las plataformas desde la perspectiva del acuicultor y la integración efectiva entre medición, registro histórico y análisis de datos para la toma de decisiones operativas. La presente investigación aporta una solución que trasciende la validación técnica de la sensorización y transmisión de datos, incluyendo un análisis de contexto del sector acuícola del departamento de Córdoba, y el análisis de requerimientos tecnológicos de un acuicultor, con el fin de evaluar el desempeño y la usabilidad de una plataforma web de visualización de datos.

La metodología conocida como Diseño Participativo propuesta por Björgvinsson (2012), permitió involucrar a un acuicultor en el desarrollo del sistema con el rol de “co-diseñador”; este aspecto fue determinante para conseguir que el sistema fuera lo más cercano y ajustado a las necesidades del productor. Durante las actividades de recolección de experiencias se pudieron identificar cinco aspectos asociados a los requerimientos tecnológicos en los procesos de registro y análisis de datos, como se describe a continuación.

La solución implementada aporta en la mejora de registro de datos, ya que con el dispositivo electrónico, el acuicultor puede disponer de un sistema estructurado para el registro de datos, conservando la disponibilidad y la integridad de los datos en un bucket de InfluxDB.

El dispositivo se conecta a la red en un promedio de 8 segundos y tarda menos de 2 segundos en almacenar una medida en la plataforma web una vez ha recibido una lectura del sensor.

El dispositivo es portable, de esta manera el usuario puede trasladarlo de un estanque a otro para realizar los procesos de medida y registro de datos.

Además de las cuatro variables de calidad de agua, el acuicultor puede usar el dispositivo para registrar variables productivas como peso de los peces, largo de los peces, consumo de alimento, entre otras, así sus análisis serán con base a variables de producción.

El uso de Grafana le permite al acuicultor navegar entre sus datos, filtrar, agrupar y analizar el comportamiento de su producción de forma interactiva.

A diferencia de las investigaciones mencionadas, que se centran principalmente en la precisión de los sensores o en modelos predictivos avanzados, este sistema se enfoca en portabilidad, trazabilidad de la información y acceso remoto en tiempo real, aspectos críticos para la adopción tecnológica en Unidades de Producción Acuícola de pequeña y mediana escala.

La investigación apunta al cierre de brechas tecnológicas mediante aplicación práctica ajustada a las necesidades de un productor, se proyecta como una plataforma escalable y orientada al usuario final, que fortalece la gestión de los parámetros de calidad del agua y respalda procesos de toma de decisiones más informados y eficientes en el contexto acuícola rural.

Producción Académica

Artículos

Publicación en Revista Nueva Granada: Diseño de un sistema de monitoreo de calidad de agua basado en IoT, aplicado a unidades de producción acuícola.

DOI 10.18359/rfcb.7395

Ponencias

EXPOTECH 2024: Diseño de un sistema de monitoreo de calidad de agua basado en Internet de las cosas aplicado a Unidades de Producción Acuícola.

EXPOTECH 2025: Sistema electrónico basado en ESP32 y MQTT para aplicaciones en acuicultura.

Conclusiones

La presente investigación estuvo orientada al diseño participativo, consiguiendo la implementación de servicios en la nube integrados con un dispositivo electrónico para el monitoreo de la calidad del agua en una Unidad de Producción Acuícola.

Con la aplicación de la encuesta a 20 productores del municipio de Ciénaga de Oro en el departamento Córdoba, se pudo caracterizar un escenario en el que la medición, el registro y el análisis de variables críticas como pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica se realizan de forma limitada, principalmente debido a restricciones de tiempo, acceso a herramientas tecnológicas y ausencia de sistemas de registro estructurados. El análisis reveló que más de la mitad de los acuicultores encuestados (55%) no registran los datos de calidad de agua en ningún sistema de información y el 45% restante lo hace con métodos manuales con una trazabilidad limitada. Este hallazgo justifica la necesidad de una herramienta de monitoreo y visualización de datos como la propuesta y representa un indicador directamente relacionado con la brecha tecnológica existente en el sector acuícola del departamento de Córdoba.

De forma complementaria, la recolección de experiencias mediante la observación directa de una unidad productiva permitió profundizar en las necesidades reales del proceso, por ejemplo de contar con un sistema portable, de fácil uso, que reduzca errores humanos, facilite la trazabilidad de la información y permita el acceso remoto y en tiempo real a datos históricos y visualizaciones gráficas. Asimismo, se identificó la necesidad de integrar tanto variables fisicoquímicas del agua como datos productivos relevantes, para fortalecer la toma de decisiones desde un enfoque integral del proceso.

La arquitectura de microservicios implementada en Google Cloud (Mosquito – Node-RED – InfluxDB – Grafana) demostró ser una opción viable para unidades productivas con

acceso a Internet. Desde la perspectiva de la Gestión de TI, la solución ofrece ventajas en términos de escalabilidad horizontal, es decir, es posible incluir nuevas unidades productivas sin modificar la arquitectura central, siempre que exista conectividad a Internet. Se identifica como limitación la dependencia de infraestructura de red rural, cuya disponibilidad no fue evaluada de forma sistemática y que abre futuras investigaciones en relación a tecnologías de transmisión de largo alcance como LoRaWAN. Para trabajos futuros, que se direccionen a la maduración de una herramienta tecnológica aplicada de forma masiva al mercado, se recomienda una evaluación formal de los costos de mantenimiento operativo en Google Cloud frente a alternativas de alojamiento local, considerando el perfil económico del acuicultor promedio en el departamento de Córdoba, de esta forma se podrá validar la factibilidad técnica y económica de una herramienta a la medida del sector acuícola.

Las pruebas de desempeño técnico evidenciaron una latencia extremo a extremo de 9.14 s, este valor puede considerarse aceptable para aplicaciones donde el monitoreo en tiempo real no es crítico, sin embargo, supera los estándares típicos del protocolo MQTT. Este resultado se atribuye principalmente al tiempo de procesamiento del Arduino Nano en la etapa de adquisición de señales; para obtener el valor sentido por una de las sondas, Arduino Nano requiere de varios ciclos de lectura del puerto analógico que estabilicen la medida.

Teniendo en cuenta la naturaleza del proyecto aplicado, que busca resolver un problema concreto usando conocimiento existente y que el enfoque de la etapa evaluativa corresponde a un análisis cualitativo, la evaluación de usabilidad del sistema se realizó en compañía del acuicultor, que en esta etapa del proceso no se define como muestra sino como actor; se demostró que el sistema es intuitivo y que las tareas de medición, registro y análisis se completaron sin errores por parte del usuario. Estos resultados deben interpretarse como un indicador preliminar de

facilidad de uso, y no como una validación definitiva de la usabilidad de un sistema dirigido al mercado. Para estudios futuros encaminados al desarrollo de una herramienta comercial con un público objetivo masivo, se recomienda ampliar la evaluación de usabilidad a una muestra de al menos 10 acuicultores en condiciones de campo.

La principal contribución de esta investigación consiste en demostrar la viabilidad técnica y operativa de una plataforma IoT de bajo costo, co-diseñada con el usuario final, para el monitoreo de variables de calidad de agua en el sector acuícola de Córdoba, un contexto con limitada adopción tecnológica y recursos productivos reducidos. A diferencia de estudios similares que se centran en la precisión de los sensores o en modelos de predicción avanzados, esta investigación priorizó la pertinencia contextual como criterio de diseño, lo que representa un enfoque diferenciador en el campo del IoT aplicado a la acuicultura. Este proceso dejó aprendizajes que apuntan a futuras investigaciones, como se mencionó antes, la inclusión de tecnología LoRa o la maduración de una herramienta tecnológica comercial, la cuál podría alcanzarse con una muestra más amplia de usuarios en condiciones de campo para validar su funcionalidad. Escalar la solución a nivel industrial requerirá de pruebas de estrés del sistema, una estrategia de gobernanza de datos y un análisis de sostenibilidad operativa que contemple los costos reales de conectividad y mantenimiento en zonas rurales del departamento de Córdoba.

Recomendaciones

Para un trabajo futuro, que busque la maduración de una herramienta tecnológica que pueda ofrecerse de forma comercial basada en las características del sistema implementado en este proyecto, se sugiere la integración de variables operativas y estratégicas del negocio de forma personalizada, de manera que un usuario pueda gestionar su producción mediante un análisis sólido, que le permita asociar el estado de la calidad de agua con el crecimiento de los peces, el consumo de alimentos o por ejemplo, la trazabilidad de muertes por ciclo. Un sistema con estas características sería fundamental para la toma de decisiones que impacten la productividad y competitividad del sector acuícola del departamento de Córdoba.

Se recomienda un estudio de factibilidad técnica y económica para la planificación de una herramienta tecnológica comercial, que se centre en el perfil económico de los acuicultores del departamento de Córdoba y en el análisis de cobertura de internet, así se podrá tener un punto de partida para ofrecer sistemas de monitoreo local o el uso de sistemas de monitoreo de largo alcance como LoRa integrados con servicios en la nube.

Trabajos futuros

Plataforma Tecnológica de Gestión Inteligente del Agua Basada en LoRaWAN Aplicada a los Procesos de Acuicultura en Córdoba.

Aplicación de Agentes de Inteligencia Artificial en la Gestión de la Producción Acuícola Basada en una Plataforma Tecnológica de Gestión Inteligente del Agua.

Referencias

- Ahammed, M., Momin, A., Sultana, S., & Sarkar, A. (2022). pH and temperature monitoring with a GSM-based auto feeding system of a biofloc technology. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 13(4), 270-274.
- Amrita, C., & Babiyoala, D. (2018). Analysing the water quality parameters from traditional to modern methods in aquaculture. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 7(6), 1954-1961.
- Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca. (2022, Agosto 1). *La AUNAP lideró el I Foro Nacional de Acuicultura en Colombia*. Retrieved from <https://aunap.gov.co/la-aunap-lidero-el-i-foro-nacional-de-acuicultura-en-colombia/>
- Battle, L., Angelini, M., Binnig, C., Catarci, T., Eichmann, P., Fekete, J., . . . Willett, W. (2018). Evaluating visual data analysis systems: a discussion report. *HILDA'18: Workshop on Human-In-the-Loop Data Analytics* (pp. 1-6). Houston, TX, USA: Association for Computing Machinery (ACM). <https://doi.org/10.1145/3209900.3209901>
- Björgvinsson, E., Ehn, P., & Hillgren, P. (2012). Agonistic participatory design: working with marginalised social movements. *CoDesign*, 8(2-3), 127-144. <https://doi.org/10.1080/15710882.2012.672577>
- Chapman, D., & Sullivan, T. (2022). The role of water quality monitoring in the sustainable use of ambient waters. *One Earth*, 5(2), 132-137. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.008>
- Chiquito, R., Hernández, L., Alvarado, G., Sánchez, G., Chiquito, C., & Hernández, L. (2022). Aquaculture—production aystem and waste management for agriculture fertilization—a Review. *Sustainability*, 14(12), 1-13. <https://doi.org/10.3390/su14127257>

Cho, W., Kim, D., Kim, H., Gang, M., Jung, D., Yang, S., & Park, S. (2024). Automated drift compensation system for electrical conductivity and pH probes in hydroponic systems.

Journal of the ASABE, 67(5), 1203-1215. <https://doi.org/10.13031/ja.15603>

Cholke, P., Pathak, A., Patil, K., Phule, D., & Patil, M. (2024). Cryptocurrency mining farm monitoring using ESP32, InfluxDB, and Grafana. *2024 IEEE International Conference on Blockchain and Distributed Systems Security (ICBDS)*, (pp. 1-6). Pune, India.

<https://doi.org/10.1109/ICBDS61829.2024.10837056>

DFROBOT. (n.d.). *DFRobot Gravity Analog Electrical Conductivity Sensor Meter V2 K=1*.

Retrieved from

https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_Electrical_Conductivity_Sensor___Meter_V2___K=1__SKU_DFR0300

DFROBOT. (n.d.). *pH Meter*. Retrieved from

https://wiki.dfrobot.com/PH_meter_SKU__SEN0161__

Dirección de Cadenas Pecuarias, Pesqueras y Acuícolas. (2021, Marzo). *ACUICULTURA EN COLOMBIA Cadena de la Acuicultura*. Retrieved from

https://sioc.minagricultura.gov.co/Acuicultura/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf?utm_source=chatgpt.com

FAO. (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*. Roma.

Flores, M., Guadalupe, G., Pachas, M., Chapa, S., Mori-Zababurú, R., & Guerrero, J. (2025).

Internet of Things (IoT) sensors for water quality monitoring in aquaculture systems: A systematic review and bibliometric analysis. *AgriEngineering*, 7(3), 78.

<https://doi.org/10.3390/agriengineering7030078>

- Fulton, S., Stegen, J., Kaufman, M., Dowd, J., & Thompson, A. (2023). Laboratory evaluation of open source and commercial electrical conductivity sensor precision and accuracy: How do they compare? *PLOS ONE*, *18*(5), 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285092>
- García, N., & Fold, N. (2021). Take back your fish: questioning NGO-mediated development in Caquetá, Colombia. *Third World Quarterly*, *43*, 148-165. <https://doi.org/10.1080/01436597.2021.1996225>
- Gong, J., Guo, W., & Sun, W. (2023). UART communication protocol frame format explanation and application. *Applied and Computational Engineering*, *14*, 47-56. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/14/20230757>
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Islam, M., Akter, S., Islam, L., Razzak, I., Wang, X., & Xu, G. (2023). Strategies for evaluating visual analytics systems: A systematic review and new perspectives. *Information Visualization*, *23*, 84-101. <https://doi.org/10.1177/14738716231212568>
- Jensen, S., Pedersen, T., & Thomsen, C. (2017). Time series management systems: A survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, *29*, 2581-2600. <https://doi.org/10.1109/tkde.2017.2740932>
- Kanagachidambaresan, G., Rohini, P., Muralidhar, M., Pulikandla, A., Dharmadurai, M., & Kumar, A. (2025). Water quality monitoring and advisory systems using real-time sensors and GPTs for precision brackishwater aquaculture. *025 IEEE International Conference on Computer, Electronics, Electrical Engineering & their Applications (IC2E3)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/IC2E365635.2025.11167875>

- Khriji, S., Benbelgacem, Y., Chéour, R., Houssaini, D., & Kanoun, O. (2021). Design and implementation of a cloud-based event-driven architecture for real-time data processing in wireless sensor networks. *The Journal of Supercomputing*, 78, 3374 - 3401. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03955-6>
- Lin, J., Tsai, H., & Lyu, W. (2021). An integrated wireless multi-sensor system for monitoring the water quality of aquaculture. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(24), 1-20. <https://doi.org/10.3390/s21248179>
- Makori, A., Abuom, P., Kapiyo, R., Anyona, D., & Dida, G. (2017). Effects of water physico-chemical parameters on tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth in earthen ponds in Teso North Sub-County, Busia County. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 20(30). <https://doi.org/10.1186/s41240-017-0075-7>
- Mamun, M., Ashik-E-Rabbani, M., Haque, M., & Upoma, S. (2024). IoT-based real-time biofloc monitoring and controlling system. *Smart Agricultural Technology*, 9, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100598>
- Manjakkal, L., Szwagierczak, D., & Dahiya, R. (2020). Metal oxides based electrochemical pH sensors: Current progress and future perspectives. *Progress in Materials Science*, 109, 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100635>
- Marium, A., Chatha, A., Naz, S., Khan, M., Safdar, W., & Ashraf, I. (2023). Effect of temperature, pH, salinity and dissolved oxygen on fishes. *Journal of Zoology and Systematics*, 1(2), 1-12. <https://doi.org/10.56946/jzs.v1i2.198>
- Mestra, L., Santana, L., Ríos, D., Mejía, L., Ortiz, C., & Paternina, S. (2020). Caracterización de sistemas de alimentación de ovinos en el departamento de Córdoba, Colombia. *Archivos De Zootecnia*, 69, 432-443. <https://doi.org/10.21071/AZ.V69I268.5391>

- Mikkola, H. (2024). Evolution and prospects of freshwater fish species and aquaculture in Colombia: A historical perspective. *UTTAR PRADESH JOURNAL OF ZOOLOGY*, 45(14), 56-79. <https://doi.org/10.56557/upjoz/2024/v45i144179>
- Ministerio de Agricultura. (2021, Marzo). *Acuicultura en Colombia*. Retrieved Mayo 16, 2024, from <https://sioc.minagricultura.gov.co/Acuicultura/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Mishra, B., & Kertész, A. (2020). The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey. *IEEE Access*, 8, 201071-201086. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3035849>
- Mota, A., Serôdio, C., Briga, A., & Valente, A. (2025). Implementation of an Internet of Things architecture to monitor indoor air quality: A case study during sleep periods. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(6), 1683. <https://doi.org/10.3390/s25061683>
- Narita, I., Popescu, F., & Despina, C. (2021). Internet of Things communication systems based on MQTT and BLE protocols. *Journal of Military Technology*, 4(2), 39-44. <https://doi.org/10.32754/jmt.2021.2.08>
- Nesh, S. (n.d.). *Calibrated Dissolved Oxygen Meter*. Retrieved from <https://www.instructables.com/Calibrated-Dissolved-Oxygen-Meter/>
- Nitulescu, I., & Korodi, A. (2020). Supervisory control and data acquisition approach in Node-RED: Application and discussions. *IoT*, 1(1), 76-91. <https://doi.org/10.3390/iot1010005>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015, Septiembre 25). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Retrieved Octubre 29, 2023, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

- Palomo, G., Negrete, J., & Castellon, J. (2017). Plaguicidas en canales de riego del distrito de La Doctrina (Córdoba-Colombia). *Temas Agrarios*, 23, 20-36.
<https://doi.org/10.21897/RTA.V23I1.1143>
- Parra, L., Lloret, G., Lloret, J., & Rodilla, M. (2018). Physical sensors for precision aquaculture: A review. *IEEE Sensors Journal*, 18, 3915-3923.
- Patil, V., Jadhav, C., Swami, S., & Kamble, S. (2024). Liquid temperature measurement using Arduino. *International Scientific Journal of Engineering and Management*, 3(4), 1-3.
<https://doi.org/10.55041/isjem01448>
- Romero, G., García, C., Pacheco, G., María, A., Santana, V., & Gabriela, A. (2020). Desarrollo sostenible: Desde la mirada de preservación del medio ambiente colombiano. *Revista de Ciencias Sociales (RCS)*, 26(4), 293-307. <https://doi.org/10.31876/rcs.v26i4.34664>
- Salis, V., & Chidravalli, S. (2024). Cloud-Based Visualization Techniques for Big Data. In B. Sundaramurthy, & P. Dayalan, *Creating AI Synergy Through Business Technology Transformation* (pp. 301-312). Hershey, Pensilvania, Estados Unidos: IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-4187-2.ch014>
- Shuangyao, W., Zhiqiang, J., Mingguang, M., Shoukang, M., Yang, S., & Youzhen, S. (2018). Effects of seawater pH on survival, growth, energy budget and oxidative stress parameters of juvenile turbot *Scophthalmus maximus*. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 17(4), 675. <https://doi.org/10.22092/ijfs.2018.116814>
- Silva, J., Solano, D., Fernández, C., Romero, L., & Villa, J. (2019). Privacy preserving, protection of personal data, and Big Data: A review of the Colombia case. *Procedia Computer Science*, 151, 1213-1218. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.174>

- Steinke, J., Ortiz, B., van Etten, J., & Müller, A. (2022). Participatory design of digital innovation in agricultural research-for-development: insights from practice. *Agricultural Systems*, *195*(103313), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103313>
- Su, X., Sutarlie, L., & Loh, X. (2020). Sensors, biosensors, and analytical technologies for aquaculture water quality. *Research*. <https://doi.org/10.34133/2020/8272705>
- Subasinghe, R., Soto, D., & Jia, J. (2009). Global aquaculture and its role in sustainable development. *Reviews in Aquaculture*, *1*(1), 2-9. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2008.01002.x>
- Sulaiman, H., Yusof, A., & Nor, M. (2024). Enhancing electrical conductivity and pH sensor measurements in precision hydroponics: Comparative analysis of six data processing methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1-10. doi:10.1088/1755-1315/1426/1/012004
- Wacnik, P., Daly, S., & Verma, A. (2025). Participatory design: a systematic review and insights for future practice. *Design Science*, *11*, 1-31. <https://doi.org/10.1017/dsj.2025.10009>
- Wei, Y., Jiao, Y., An, D., Li, D., Li, W., & Wei, Q. (2019). Review of dissolved oxygen detection technology: From laboratory analysis to online intelligent detection. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *19*(18), 3995. <https://doi.org/10.3390/s19183995>
- Wicaksono, E., Priyono, S., Lestari, P., Shirot, M., Firmansyah, P., Ismail, A., . . . Awaliyah, F. (2024). Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) productivity performance in small-scale recirculating aquaculture systems (RAS) with different biofilter media. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, *17*(4), 1471-1479.

- Yamuna, R., Harsharani, K., Manasa, S., Sathya, M., Lenish, P., & Asha, K. (2023). IWQMA: Intelligent water quality management in aquaculture using IoT technology. *TWIST*, *18*(4), 183–198.
- Zeta, B., Alam, S., Rahman, G., & Ahmed, K. (2025). A low-cost pH sensor for real-time monitoring of aquaculture systems in a multi-layer wireless sensor network. *Sensors*, *25*(9), 2824. <https://doi.org/10.3390/s25092824>