

Artículo de Investigación

Tecnologías IoT para el monitoreo de la calidad del agua en la acuicultura

IoT technologies for water quality monitoring in aquaculture

Karens Medrano¹: Universidad Don Bosco, El Salvador.

karens.medrano@udb.edu.sv

Evelyn Hernández: Universidad Don Bosco, El Salvador.

evelyn.hernandez@udb.edu.sv

Rene Tejada: Universidad Don Bosco, El Salvador.

rene.tejada@udb.edu.sv

Angel Moreno: Universidad Don Bosco, El Salvador.

angel.moreno@udb.edu.sv

Fecha de Recepción: 27/05/2024

Fecha de Aceptación: 05/08/2024

Fecha de Publicación: 18/12/2024

Cómo citar el artículo

Medrano, K., Hernández, E., Tejada, R. y Moreno, E. (2025). Tecnologías IoT para el monitoreo de la calidad del agua en la acuicultura [IoT technologies for water quality monitoring in aquaculture]. *European Public & Social Innovation Review*, 10, 01-16. <https://doi.org/10.31637/epsir-2025-929>

Resumen:

Introducción: Las tecnologías IoT en la acuicultura ofrecen soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia operativa y la gestión de recursos en las granjas acuícolas, optimizando el proceso productivo. **Metodología:** Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica para evaluar los beneficios de las tecnologías IoT en acuicultura. La investigación analizó diversas herramientas como sensores ambientales, sistemas de rastreo y dispositivos de automatización. **Resultados:** Entre las herramientas destacadas se encuentran los sensores que monitorean en tiempo real la calidad del agua y la temperatura, los sistemas RFID y GPS para el seguimiento de inventarios, y los dispositivos de automatización que regulan procesos como la alimentación y la gestión energética. Estos elementos mejoran la logística, reducen costos y aumentan la productividad. **Discusión:** La integración de plataformas IoT con análisis

¹ Autor Correspondiente: Karens Medrano. Universidad Don Bosco (El Salvador).

avanzados de datos permite tomar decisiones basadas en información precisa, optimizando la producción y minimizando los riesgos. **Conclusiones:** Las tecnologías IoT proporcionan un enfoque integral y sostenible para la gestión de granjas acuícolas, mejorando las condiciones para el crecimiento de los peces y optimizando el uso de recursos naturales y energéticos.

Palabras clave: Acuicultura; Calidad del Agua; Digitalización de la información; Internet de las Cosas (IoT); Sistemas Embebidos; Protocolos de Comunicación; Sistemas de monitoreo; Servicios en la nube.

Abstract

Introduction: IoT technologies in aquaculture offer innovative solutions to improve operational efficiency and resource management in aquaculture farms, optimising the production process. **Methodology:** A comprehensive review of the scientific literature was conducted to evaluate the benefits of IoT technologies in aquaculture. The research analysed various tools such as environmental sensors, tracking systems and automation devices. **Results:** Among the tools highlighted were sensors that monitor water quality and temperature in real time, RFID and GPS systems for inventory tracking, and automation devices that regulate processes such as feeding and energy management. These elements improve logistics, reduce costs and increase productivity. **Discussion:** Integrating IoT platforms with advanced data analytics enables decisions based on accurate information, optimising production and minimising risks. **Conclusions:** IoT technologies provide a holistic and sustainable approach to aquaculture farm management, improving conditions for fish growth and optimising the use of natural resources and energy.

Keywords: Aquaculture; Water Quality; Digitization of information; Internet of Things (IoT); Embedded Systems; Communication Protocols; Monitoring Systems; Cloud Services.

1. Introducción

La importancia de los productos marinos en la seguridad alimentaria y la nutrición está en constante aumento, ya que proporcionan proteínas, ácidos grasos omega-3 y micronutrientes esenciales. Según la FAO, la producción pesquera y acuícola alcanzó un récord de 214 millones de toneladas en 2020, con un consumo per cápita de 20,2 kg, más del doble que hace 50 años (FAO, 2022). Estos alimentos representan aproximadamente el 17% de la proteína de origen animal a nivel mundial y emplean a 58,5 millones de personas en la producción primaria (FAO, 2022). Además, por primera vez, la producción acuícola superó a la pesca de captura, constituyendo el 51% del total (FAO, 2022). El director general de la FAO, Qu Dongyu, destaca la necesidad de acciones transformadoras para mejorar la eficiencia, inclusividad, resiliencia y sostenibilidad de los sistemas alimentarios acuáticos, consolidando así su papel en la lucha contra la inseguridad alimentaria, la mitigación de la pobreza y la promoción de la gobernanza sostenible (FAO, 2022).

En el ámbito de la acuicultura, la aplicación de tecnologías innovadoras se presenta como un factor clave para fortalecer la seguridad alimentaria global de manera sostenible. La digitalización de la información está revolucionando el sector acuícola a un ritmo vertiginoso, permitiendo aumentar la producción de alimentos de manera sostenible (Boyd y McNevin, 2019). Este proceso demanda una evolución constante de las operaciones para aumentar la producción acuícola y reducir el impacto ambiental (Froehlich *et al.*, 2017), así como el desarrollo de estrategias que prioricen la transferencia de conocimiento entre expertos en el área de acuicultura y los especialistas en digitalización de la información (Kumar y Engle, 2016).

Las directrices actuales para la acuicultura enfatizan la necesidad de impulsar innovaciones tecnológicas dentro de este sector productivo, destacando herramientas informáticas como el Internet de las Cosas (IoT) (Little *et al.*, 2016). Esta tecnología integra dispositivos inteligentes como sensores para medir las variables fisicoquímicas que determinan la calidad del agua, lo cual permite a los acuicultores mejorar la eficiencia operativa y tomar decisiones informadas en tiempo real (Ottinger *et al.*, 2016). Esta integración tecnológica es esencial para revitalizar e intensificar la labor productiva de este sector de manera responsable, considerando los aspectos ambientales, sociales y económicos (Rice *et al.*, 2015).

El desarrollo de la acuicultura no solo implica invertir capital financiero, sino también transformar las estructuras y sistemas acuícolas de manera integral, tanto en términos financieros como comerciales. Esta transformación debe ser sostenible y guiada por expertos diversos como zootecnistas, ingenieros acuícolas, ingenieros pesqueros, investigadores ambientales, biólogos marinos y especialistas en innovación tecnológica (Tacon y Metian, 2015; Ponce-Palafox *et al.*, 2006), este enfoque integral es crucial para garantizar el desarrollo efectivo y sostenible del sector, beneficiándose de los avances tecnológicos.

La importancia de este trabajo radica en varios aspectos sobresalientes para futuras investigaciones en acuicultura. La innovación tecnológica mediante el uso de IoT permite la creación de sistemas avanzados para el monitoreo y control, optimizando la producción y minimizando el impacto ambiental. Además, estas tecnologías contribuyen a la sostenibilidad ambiental al permitir el monitoreo de la calidad del agua y prevenir problemas ecológicos. La eficiencia operativa mejora con datos precisos y en tiempo real, reduciendo costos y aumentando la productividad. Esto impacta directamente en la seguridad alimentaria global, satisfaciendo la creciente demanda de productos marinos de manera sostenible. La transferencia de conocimiento entre expertos en acuicultura y especialistas en tecnologías digitales facilita la adopción de prácticas innovadoras, generando beneficios socioeconómicos significativos. Por último, este trabajo proporciona una base sólida para futuras investigaciones, abriendo caminos para nuevas innovaciones y mejoras en el sector acuícola.

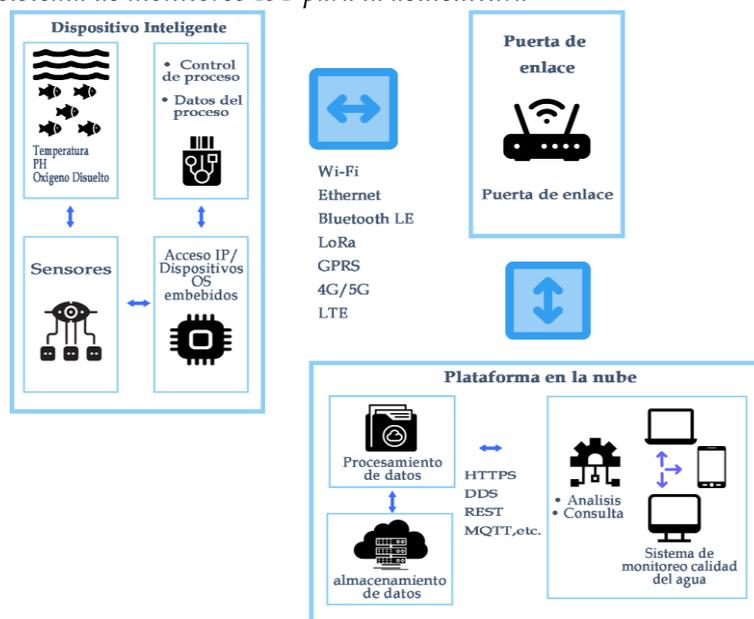
2. Diseño del sistema de monitoreo

El diseño de un sistema de monitoreo sigue una arquitectura general común a la mayoría de los sistemas disponibles. Esta arquitectura incluye un nodo sensor, un servidor o almacenamiento local de datos y una página web o aplicación para la visualización de dichos datos. Las variaciones del sistema se dan en términos de protocolo de comunicación, diseño de la interfaz de usuario, número de sensores y precio final. Las tecnologías modernas emergentes como el Big Data, el Internet de las Cosas (IoT) y los sensores se integran gradualmente en todo el proceso de producción acuícola. Esto conlleva a la eliminación de la mano de obra tradicional y permite el monitoreo en tiempo real de diversos aspectos del entorno de producción (Mahamuni y Goud, 2023).

Además, se establece un sistema de monitoreo basado en IoT para mejorar la eficiencia y la gestión del proceso acuícola mediante el análisis de big data en plataformas en la nube y la adopción de decisiones inteligentes en tiempo real (Singh *et al.*, 2023). La implementación de estas tecnologías no solo optimiza la producción acuícola, sino que también mejora la sostenibilidad y reduce los costos operativos (Raju y Varma, 2017).

Figura 1.

Arquitectura de sistema de monitoreo IoT para la acuicultura



Fuente: Elaboración propia (2024).

Como se muestra en la Figura 1, se presenta un diseño de la arquitectura de un sistema de monitoreo IoT que recopila información sobre la calidad del agua en tiempo real mediante sensores. La calidad del agua en la acuicultura afecta significativamente la tasa de crecimiento, el estado de salud y la eficacia de la ingesta de alimentos de los peces.

2.1. Seguridad de Datos

Los datos recolectados por los dispositivos IoT son valiosos, pero también requieren protección. La seguridad en los sistemas IoT es crucial debido a la gran cantidad de datos sensibles que se generan y se intercambian (Whitmore *et al.*, 2015). En proyectos IoT, es esencial implementar múltiples capas de seguridad para proteger tanto los datos como los dispositivos (Lee y Lee, 2015). Esto incluye la autenticación y el cifrado de dispositivos, la segmentación de redes y el uso de firewalls y sistemas de detección de intrusiones (IDS) para proteger el tráfico (Weber, 2010). Los datos deben cifrarse tanto en tránsito como en reposo, y su integridad debe verificarse mediante algoritmos de hash (Ziegeldorf *et al.*, 2014).

Las aplicaciones deben desarrollarse siguiendo prácticas seguras y someterse a pruebas de penetración (Fernandes *et al.*, 2014). La gestión de identidades y accesos (IAM) es crucial para controlar quién puede acceder a los recursos, complementada con políticas de contraseñas fuertes y su rotación regular (Sicari *et al.*, 2015). El monitoreo continuo y la detección de anomalías son necesarios, junto con planes de respuesta a incidentes (Stojmenovic y Wen, 2014). La seguridad física de los dispositivos y el control de acceso a las instalaciones también son vitales (Gubbi *et al.*, 2013). Además, los proyectos deben cumplir con las regulaciones y estándares de seguridad aplicables, realizando auditorías y evaluaciones periódicas para asegurar el cumplimiento de las políticas de seguridad (Roman *et al.*, 2013).

La seguridad en los sistemas de monitoreo IoT es fundamental para proteger la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos. A continuación, se presenta una tabla con protocolos y herramientas que se pueden utilizar para asegurar un sistema de monitoreo IoT,

abarcando diversas áreas de seguridad como el cifrado de datos, autenticación, autorización, detección de intrusiones, monitoreo y gestión, actualización y parcheo, respaldo y recuperación, control de acceso a la red, y gestión de identidades.

Tabla 1.

Protocolos y herramientas de seguridad en sistemas de monitoreo IoT

Categoría	Protocolo	Herramienta
Cifrado de datos	TLS/SSL	AES
Autenticación	OAuth	JWT (JSON Web Token)
Detección de intrusos		Snort / Suricata
Monitoreo y Gestión		Nagios / Zabbix
Control de Acceso a Red		Firewalls

Fuente: Elaboración propia (2024).

Para asegurar la transmisión y almacenamiento de datos en sistemas IoT, se utilizan protocolos de cifrado como TLS/SSL y herramientas como AES (Dworkin, 2001). En cuanto a la autenticación, OAuth permite a las aplicaciones acceder a recursos sin compartir credenciales (Hardt, 2012), mientras que JWT (JSON Web Token) se utiliza para autenticación y autorización segura entre dos partes (Jones *et al.*, 2015).

En la detección de intrusiones, Snort y Suricata son sistemas populares que analizan el tráfico de red para identificar patrones de ataques (Roesch, 1999; Sturges, 2010). Para el monitoreo y gestión, Nagios y Zabbix supervisan dispositivos IoT y generan alertas en tiempo real (Barth, 2008; Zabbix LLC, 2021). Finalmente, en el control de acceso a la red, los firewalls como iptables controlan el tráfico de red según José Domingo(s.f.) las reglas de seguridad predefinidas para filtrar y restringir el acceso a dispositivos IoT.

2.2. Protocolos de comunicación de datos

En los sistemas IoT, los protocolos de comunicación desempeñan un papel esencial en asegurar la transferencia eficiente y segura de datos entre dispositivos. Entre los más utilizados se encuentran MQTT, LoRaWAN, HTTP, BLE y NB-IoT, cada uno diseñado con características específicas que los hacen idóneos para diversos entornos y aplicaciones. MQTT es ideal para conexiones remotas con ancho de banda limitado (Salagean y Zinca, 2020); LoRaWAN es óptimo para comunicación a larga distancia con bajo consumo de energía (García y Hernández, 2020); y HTTP es ampliamente utilizado en la comunicación web (Mozilla, s.f.).

Según Agustín Bassi (2021), la introducción al Bluetooth Low Energy proporciona una visión detallada sobre las tecnologías BLE y su aplicación en dispositivos IoT. Bassi discute las características y beneficios de esta tecnología emergente en el contexto de la comunicación de baja energía (BLE). NB-IoT se especializa en la comunicación de datos en grandes áreas geográficas con bajo consumo de energía (Cendón y Mancheño, 2017). En la Tabla 1 presentamos un resumen de sus principales características.

Tabla 2.
Comparativa de protocolo de comunicación IoT

Característica	LoraWAN	HTTP	MQTT	BLE	NB-IoT
Rango de cobertura	Hasta 15 km en áreas rurales, 5 km en áreas urbanas	Limitado a la red local (LAN/WAN)	Depende de la red subyacente	Corto (hasta 100 metros)	Hasta 10 km en áreas rurales, 1-2km en áreas urbanas
Consumo de energía	Muy bajo	Alto	Muy bajo	Muy bajo	Bajo
Ancho de banda	Bajo (0.3-5.0 kbps)	Alto	Bajo	Medio (1Mbps)	Bajo (hasta 250kbps)
Capacidad de conexión	Alta (muchos dispositivos por gateway)	Limitada	Muy Alta	Alta	Alta
Seguridad	AES-128 encriptación	TLS/SSL	TLS/SSL	AES-128	3GPP Estándares de seguridad
Estándar	Lora Alliance	IETF (Internet Engineering Task Force)	OASIS (Organization of the Advancement of structured Information Standards)	Bluetooth SIG (Special Interest Group)	3GPP (2rd Generation Parthnership Project)
Ámbito de aplicación	Sensores remotos, agricultura, medición	Comunicación de datos masivos (web,API)	Comunicación eficiente en IoT	Weareables, sensores de corto alcance	Sensores remotos, aplicaciones industriales

Fuente: Elaboración propia (2024).

Estos protocolos facilitan la interoperabilidad y mejoran la eficiencia del sistema IoT. A la hora de comunicar dispositivos IoT con Internet, los protocolos más comunes son MQTT, LoRaWAN, HTTP, BLE y NB-IoT. Estos protocolos son altamente flexibles, ya que están diseñados para transmitir cualquier tipo de información, desde datos simples de sensores hasta mensajes complejos entre dispositivos y servidores. La elección del protocolo adecuado depende de las necesidades específicas de la aplicación IoT, incluyendo factores como el consumo de energía, el alcance de la comunicación, la cantidad de datos a transmitir y la frecuencia de la transmisión. Esta flexibilidad y adaptabilidad son clave para el éxito de los sistemas IoT en una amplia variedad de aplicaciones y entornos.

2.3. Sensores y microcontroladores

Las posibilidades del IoT en la acuicultura incluyen dispositivos que recopilan datos de sensores, envían información en tiempo real al usuario y activan automáticamente procesos como el cambio o la oxigenación del agua, la alimentación, el ajuste de temperatura y la ventilación. La integración de sensores y microcontroladores en un sistema de monitoreo basado en IoT permite la recopilación y análisis continuo de datos, mejorando significativamente la capacidad de toma de decisiones. Además, con el análisis de Big Data en plataformas en la nube, es posible identificar patrones y tendencias, optimizando así la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones acuícolas (Mahamuni y Goud, 2023; Singh *et al.*, 2023).

Para seleccionar sensores y microcontroladores en un sistema de monitoreo de la calidad del agua, es crucial considerar varios factores que permitan conocer las fluctuaciones en determinados parámetros físicos, químicos y biológicos y analizar si sus características son aptas para recreación, potabilización y/o protección de la vida acuática (Chapman, 1996).

En cuanto a los sensores que sean seleccionados para el monitoreo de la calidad del agua, se debe evaluar que los parámetros de medición necesarios, como pH, temperatura y oxígeno disuelto, presenten las condiciones ideales (Ponce-Palafox *et al.*, 2006), además, de asegurarse que sean precisos y duraderos en condiciones acuáticas (Bassi, 2021).

Tabla 3.

Condiciones ideales de los cultivos de tilapia

Parámetros	Rango	Efecto
Oxígeno Disuelto	5 a 7 mg/l	Las tilapias necesitan un nivel adecuado de oxígeno disuelto en el agua para respirar correctamente.
Temperatura	25C a 30C	La temperatura del agua desempeña un papel crucial en el metabolismo de la tilapia
Potencial de Hidrogeno	6.5 a 8	Los valores fuera de este rango pueden afectar a la salud de la tilapia y a su capacidad para obtener nutrientes.

Fuente: Elaboración propia (2024).

En el campo del Internet de las Cosas (IoT), diversos microcontroladores juegan un papel crucial debido a sus características específicas y capacidades de conectividad. Arduino destaca por su facilidad de uso y la robustez de su comunidad de desarrolladores, siendo ampliamente utilizado en proyectos educativos y de prototipado rápido (Arduino, n.d.).

Los microcontroladores ESP8266 y ESP32 son altamente valorados por su integración de Wi-Fi y Bluetooth, ideales para aplicaciones que requieren conectividad inalámbrica avanzada (Espressif Systems, n.d.). Por otro lado, el Raspberry Pi se distingue como una computadora de bajo costo con potentes capacidades de procesamiento y flexibilidad para aplicaciones más complejas que requieren conectividad Wi-Fi y Bluetooth (Raspberry Pi Foundation, n.d.).

Respecto a los microcontroladores, se debe asegurar que tengan la capacidad de procesamiento adecuada, soporten los protocolos de comunicación necesarios y ofrezcan eficiencia energética, especialmente si el sistema funciona con baterías. La facilidad de programación y el soporte disponible también son factores clave, así como, el costo y la escalabilidad para futuras expansiones del sistema.

Tabla 4.

Condiciones ideales de los cultivos de tilapia

Microcontrolador	Características principales	Plataforma de desarrollo	Conectividad	Idiomas de programación
Arduino	Fácil de usar, gran comunidad de soporte	Arduino IDE	USB,Bluetooth (con módulos)	C, C++
ESP8266	Bajo costo, Wi-Fi integrado	Arduino IDE, NodeMCU	Wi-Fi	C, Lua

ESP32	Dual-core, Wi-fi y Bluetooth integrados	Arduino IDE, ESP-IDF	Wi-Fi, Bluetooth	C, C++
Raspberry Pi	Computadora de bajo costo, potente	Raspbian (Linux)	Wi-Fi, Bluetooth	Python, C, C++

Fuente: Elaboración propia (2024).

Estos sistemas embebidos son ampliamente empleados en el desarrollo de proyectos de IoT gracias a su conectividad integrada, capacidad de procesamiento y facilidad de desarrollo y programación. Es importante realizar pruebas de campo para evaluar el rendimiento de los componentes en condiciones reales y seleccionar aquellos que permitan ajustes y mejoras sin necesidad de una reestructuración completa del sistema.

2.4. Almacenamiento de datos

El almacenamiento en la nube ofrece un almacenamiento rentable y escalable. Ya no tendrá que preocuparse de quedarse sin capacidad, de mantener las redes de área de almacenamiento (SAN), de sustituir los dispositivos defectuosos, de agregar infraestructura para escalar verticalmente con la demanda o de operar con hardware infrutilizado cuando la demanda disminuye.

Según AWS, Azure, Google Cloud e IBM Watson, los servicios en la nube para IoT representan una infraestructura robusta y escalable que facilita la conectividad y la gestión eficiente de dispositivos interconectados (Amazon Web Services [AWS], 2023; Microsoft Azure, 2023; Google Cloud, 2023; IBM, 2023). Estas plataformas permiten a las organizaciones implementar, monitorear y gestionar dispositivos IoT de manera segura, aprovechando capacidades avanzadas como análisis de datos en tiempo real, integración con servicios existentes y opciones de seguridad mejoradas.

El almacenamiento en la nube ofrece una solución rentable y escalable para las necesidades de almacenamiento de datos, eliminando la preocupación por la capacidad limitada y los problemas asociados con la gestión de infraestructuras físicas tradicionales (Amazon Web Services [AWS], 2023). Ya no es necesario mantener hardware costoso o preocuparse por la escalabilidad vertical, ya que la capacidad se ajusta dinámicamente según la demanda y se paga solo por el uso efectivo del servicio (Microsoft Azure, 2023).

Tabla 5.

Servicios en la nube IoT

Servicio en la Nube	Características principales
AWS IoT Core	Escalabilidad masiva Integración con otros servicios AWS Gestión de dispositivos y seguridad
Azure IoT Hub	Conexión segura y bidireccional Gestión de dispositivos Análisis de datos en tiempo real
Google Cloud IoT Core	Escalabilidad y flexibilidad Integración con Google Cloud Platform Gestión de dispositivos
IBM Watson IoT Platform	Análítica avanzada y machine learning Gestión de dispositivos Seguridad y privacidad

Fuente: Elaboración propia (2024).

2.5. Sistemas de monitoreo y visualización de datos

La gestión efectiva y el análisis de datos generados por dispositivos IoT son esenciales para optimizar operaciones y facilitar decisiones informadas en diversos sectores industriales (Grafana, 2023; InfluxDB, 2022; Eclipse Mosquitto, 2021; CrateDB, 2020; Apache Spark, 2019). Entre las plataformas y herramientas más utilizadas para monitoreo y visualización de estos datos se destacan Grafana, conocida por su capacidad en la visualización de series temporales y métricas en tiempo real, e InfluxDB, diseñada específicamente para manejar grandes volúmenes de datos de series temporales y eventos.

Eclipse Mosquitto, por otro lado, se posiciona como un broker MQTT open-source esencial en implementaciones de IoT para la gestión de mensajes y comunicaciones. Además, CrateDB ofrece una solución robusta de base de datos distribuida SQL para aplicaciones en tiempo real e IoT, mientras que Apache Spark es reconocido por su potente motor de procesamiento distribuido utilizado en análisis de datos en tiempo real y Big Data (Grafana, 2023; InfluxDB, 2022; Eclipse Mosquitto, 2021; CrateDB, 2020; Apache Spark, 2019). Estas plataformas juegan un papel clave en la creación de infraestructuras IoT eficientes, facilitando la conectividad, la monitorización y el análisis de datos para mejorar la toma de decisiones estratégicas.

Tabla 6.

Sistemas de visualización de datos

Servicio en la Nube	Características principales
Grafana	Plataforma para visualización y análisis de datos de series temporales y métricas en tiempo real
InfluxDB	Base de datos de series temporales diseñadas para manejar grandes volúmenes de datos de métricas y eventos
Eclipse Mosquitto	Broker MQTT open-source utilizado en implementación de IoT y mensajería
CrateDB	Base de datos distribuida SQL para aplicaciones IoT y de tiempo real
Apache Spark	Motor de procesamiento distribuido para el análisis de datos en tiempo real y Big Data

Fuente: Elaboración propia (2024).

3. Metodología

La metodología de este estudio sobre tecnologías IoT para la calidad del agua en acuicultura se organizará en ocho pasos fundamentales. Primero, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura científica para establecer una base sólida y contextualizar el estudio dentro del conocimiento existente. En segundo lugar, se definirán los requisitos específicos y metas claras para el monitoreo de la calidad del agua, asegurando que estas sean precisas y alcanzables. En tercer lugar, se seleccionarán cuidadosamente las tecnologías y sensores más adecuados para las necesidades del estudio, considerando factores como precisión, costo y compatibilidad con el entorno acuícola.

A continuación, se procederá al diseño y desarrollo de un sistema IoT personalizado que integrará los sensores seleccionados con una plataforma de recopilación y análisis de datos, en el cuarto paso. El quinto paso implicará la implementación de este sistema en un entorno de acuicultura real para realizar pruebas rigurosas de funcionamiento y precisión, asegurando

que el sistema opere efectivamente bajo condiciones reales. En el sexto paso, se analizarán los datos recopilados para evaluar la efectividad del sistema en comparación con estándares establecidos, utilizando métodos estadísticos y de comparación apropiados.

En el séptimo paso, se discutirán los hallazgos del estudio, se extraerán conclusiones sobre la viabilidad y el potencial futuro de las tecnologías IoT en este campo, y se ofrecerán recomendaciones prácticas para su implementación en entornos acuícolas. Finalmente, en el octavo paso, se identificarán áreas de investigación futura para continuar mejorando estas aplicaciones en acuicultura, proporcionando una guía para futuros estudios y desarrollos en este ámbito.

Esta meticulosa descripción de los procedimientos y tecnologías específicas utilizadas asegurará que otros investigadores puedan replicar el estudio o evaluar su rigor metodológico, contribuyendo al avance del conocimiento en la aplicación de tecnologías IoT en acuicultura.

4. Resultados y Perspectivas

La implementación de tecnologías IoT para el monitoreo de la calidad del agua en acuicultura ofrece múltiples beneficios significativos. En primer lugar, facilita el monitoreo en tiempo real, permitiendo a los acuicultores detectar de manera inmediata cualquier anomalía o riesgo potencial que pueda afectar la producción de peces o mariscos. Esta capacidad es fundamental para una gestión proactiva que permite prevenir problemas graves antes de que ocurran, asegurando así, la continuidad de las operaciones acuícolas sin interrupciones significativas.

Además, al proporcionar datos precisos sobre parámetros clave como temperatura, oxígeno disuelto, pH y salinidad, las tecnologías IoT permiten a los acuicultores optimizar sus operaciones de manera más eficiente. Esto incluye ajustar el uso de recursos como alimentos, energía y productos químicos de manera precisa y oportuna. La gestión más precisa conduce a una mayor sostenibilidad económica y ambiental, reduciendo tanto los costos operativos como los impactos negativos en el medio ambiente circundante.

Las soluciones IoT también ofrecen la ventaja de emitir alertas automáticas, notificando a los acuicultores sobre cambios repentinos en la calidad del agua. Esta capacidad de respuesta rápida permite tomar medidas correctivas de manera oportuna, minimizando los riesgos para la salud de los animales acuáticos y mejorando la productividad general de la explotación. Animales más sanos y un entorno acuático bien gestionado no solo promueven un crecimiento más rápido y saludable, sino que también reducen la incidencia de enfermedades, mejorando así la calidad y la cantidad del producto final.

Además de mejorar la gestión diaria, el seguimiento preciso y continuo de los parámetros del agua ayuda a mitigar el riesgo de pérdidas por condiciones ambientales adversas. Esta capacidad reduce la probabilidad de errores humanos y permite una gestión más efectiva de eventos imprevistos como fluctuaciones climáticas extremas o cambios repentinos en la composición del agua.

En resumen, la adopción de tecnologías IoT en acuicultura no solo mejora la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental, sino que también promueve un entorno más saludable y productivo para los animales acuáticos. A largo plazo, estas tecnologías tienen el potencial de aumentar la rentabilidad de las explotaciones acuícolas al reducir costos, minimizar riesgos y mejorar la calidad general del producto final. El continuo desarrollo de sistemas y protocolos más optimizados para proyectos IoT en acuicultura promete seguir mejorando estos beneficios, garantizando un futuro más resiliente y seguro para la industria acuícola global.

5. Conclusiones

El monitoreo de la calidad del agua mediante tecnologías IoT representa un avance significativo en la acuicultura moderna, transformando fundamentalmente la gestión y operación de las explotaciones acuícolas con múltiples beneficios. Estas tecnologías permiten un monitoreo continuo y en tiempo real de parámetros críticos como temperatura, oxígeno disuelto, pH, salinidad y otros indicadores clave, proporcionando datos precisos y actualizados sobre las condiciones ambientales del agua para peces y mariscos.

Una ventaja destacada de las tecnologías IoT es su capacidad para detectar rápidamente anomalías o cambios no deseados en la calidad del agua. Esta detección temprana facilita una respuesta inmediata, crucial para prevenir problemas graves que podrían afectar la salud de los animales y la productividad general de la explotación. Esto promueve una gestión más proactiva y eficiente, reduciendo potencialmente los costos asociados con tratamientos de emergencia y pérdidas de producción.

Además, del monitoreo y la detección, las tecnologías IoT ofrecen oportunidades significativas para optimizar el uso de recursos. Con datos precisos y en tiempo real, los acuicultores pueden ajustar la alimentación, controlar el consumo energético y optimizar el uso de productos químicos según las necesidades específicas del entorno acuático. Esta optimización no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir el desperdicio y minimizar el impacto negativo en el ecosistema circundante.

La mejora en la salud y el crecimiento de los animales es otro beneficio clave. Un entorno acuático óptimo, mantenido mediante el monitoreo constante de la calidad del agua, fomenta un crecimiento más saludable y rápido de los peces y mariscos. Esto se traduce en animales más robustos y con menor incidencia de enfermedades, mejorando así la calidad del producto final y fortaleciendo la competitividad del productor en el mercado.

Desde una perspectiva económica, la implementación efectiva de tecnologías IoT puede conducir a una reducción significativa de los costos operativos a largo plazo. La capacidad de prever problemas y optimizar recursos mejora la rentabilidad general de las explotaciones acuícolas, mientras que la transparencia y precisión de los datos sobre la calidad del agua fortalecen la confianza del consumidor y la conformidad con estándares de calidad rigurosos.

Para maximizar los beneficios de los proyectos IoT en acuicultura, es crucial seleccionar adecuadamente sistemas de visualización avanzados que faciliten la interpretación eficiente de datos sin comprometer la fiabilidad ni la seguridad. Además, la elección de microcontroladores robustos y confiables es esencial para garantizar el rendimiento óptimo y la durabilidad en entornos acuáticos desafiantes.

En conclusión, las tecnologías IoT están revolucionando la acuicultura al mejorar la eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones. Al integrar estos avances con sistemas de visualización avanzados y microcontroladores adecuados, los productores pueden maximizar el potencial de sus operaciones acuícolas, asegurando un futuro más prometedor y resiliente para esta importante industria alimentaria.

6. Referencias

- Amazon Web Services. (2023). *AWS IoT Core Overview*. <https://aws.amazon.com/iot-core/>
- Apache Software Foundation. (2019). *Apache Spark*. <https://spark.apache.org/>
- Arduino. (s.f.). *Arduino - Home*. <https://www.arduino.cc/>
- Barth, S. (2008). *Nagios: System and network monitoring*. No Starch Press.
- Bassi, A. (28 de mayo de 2021). Intro a Bluetooth Low Energy. *Goto IoT*. https://www.gotoiot.com/pages/articles/ble_intro/index.html
- Boyd, C. E. y McNevin, A. A. (2015). *Aquaculture, Resource Use, and the Environment*. Wiley-Blackwell.
- Cendón, B. y Mancheño, A. (4 de agosto de 2017). *Gestión inteligente de residuos urbanos con tecnología Narrow Band IoT (NB-IoT)*. Comunicación presentada en el III Congreso Ciudades Inteligentes.
- Chapman, D. (1996). *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring* (2ª ed.). Chapman and Hall Ltd. <http://dx.doi.org/10.4324/noe0419216001>
- Crate.io. (2020). *CrateDB*. <https://crate.io/>
- Domingo, J. (s.f.). *Configuración básica de iptables*. Recuperado el 4 de julio de 2024, de <https://fp.josedomingo.org/seguridadgs/u03/iptables.html>
- Dworkin, M. J. (2001). *Recommendation for block cipher modes of operation*. NIST Special Publication, 800(38A).
- Eclipse Foundation. (2021). *Eclipse Mosquitto*. <https://mosquitto.org/>
- Espressif Systems. (s.f.). *Espressif Systems - Wi-Fi and Bluetooth Chips*. <https://www.espressif.com/en/products/socs>
- Fernandes, E., Jung, J. y Prakash, A. (2016). *Security Analysis of Emerging Smart Home Applications*. En *IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, pp. 636-654. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SP.2016.44>
- Froehlich, H. E., Gentry, R. R. y Halpern, B. S. (2017). Conservation aquaculture: Shifting the narrative and paradigm of aquaculture's role in resource management. *Biological Conservation*, 215, 162-168. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.012>
- García García, W. F. y Hernández Pérez, J. F. (2020). *Tecnología Lora y su integración lot en la agricultura: un análisis bibliométrico*. <http://hdl.handle.net/11349/28144>
- Google Cloud. (2023). *Google Cloud IoT Core*. <https://cloud.google.com/iot-core>
- Grafana. (2023). *Grafana*. <https://grafana.com/>

- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. y Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. *Future Generation Computer Systems*, 29, 1645-1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Hardt, D. (2012). *The OAuth 2.0 authorization framework*. RFC 6749.
- IBM. (2023). *IBM Watson IoT Platform*. <https://www.ibm.com/internet-of-things/platform/watson-iot-platform>
- InfluxData. (2022). *InfluxDB*. <https://www.influxdata.com/>
- Jones, M., Bradley, J. y Sakimura, N. (2015). *JSON Web Token (JWT)*. RFC 7519.
- Kumar, G. y Engle, C. R. (2016). Technological advances that led to growth of shrimp, salmon, and tilapia farming. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 24(2), 136-152. <http://dx.doi.org/10.1080/23308249.2015.1112357>
- Lee, I. y Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431-440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
- Little, D. C., Newton, R. W. y Beveridge, M. C. M. (2016). Aquaculture: A rapidly growing and significant source of sustainable food? Status, transitions, and potential. *Proceedings of the Nutrition Society*, 75(3), 274-283. <https://doi.org/10.1017/s0029665116000665>
- Mahamuni, C. V. y Goud, C. S. (2023). Unveiling the Internet of Things (IoT) Applications in Aquaculture: A Survey and Prototype Design with ThingSpeak Analytics. *Journal of Ubiquitous Computing and Communication Technologies*, 5(2), 152-174. <https://doi.org/10.36548/jucct.2023.2.004>
- Microsoft Azure. (2023). *Azure IoT Hub*. <https://azure.microsoft.com/en-us/services/iot-hub/>
- Mozilla. (s.f.). *HTTP: Visión general*. <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/HTTP/Overview>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*. <https://www.fao.org/publications/sofia/2022/en/>
- Ottinger, M., Clauss, K. y Kuenzer, C. (2016). Aquaculture: Relevance, distribution, impacts and spatial assessments - A review. *Ocean & Coastal Management*, 119, 244-266. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.10.015>
- Ponce-Palafox, J. T., Romero Cruz, O., Castillo Vargasmachuca, S., Arteaga Nochebuena, P., Ulloa-García, M., González Sala, R., Febrero Toussaint, I. y Esparza, L. H. (2006). El desarrollo sostenible de la acuicultura en América Latina. *Revista Electrónica de Veterinaria REDVET*, 7(7). <https://www.redalyc.org/pdf/636/63612753004.pdf>
- Raju, K. R. S. R. y Varma, G. H. K. (2017). Knowledge Based Real Time Monitoring System for Aquaculture Using IoT. En *IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)* (pp. 318-321). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IACC.2017.0075>

- Raspberry Pi Foundation. (s.f.). *Raspberry Pi*. <https://www.raspberrypi.org/>
- Rice, C., Black, K. D., Hargrave, B. T. y Morris, J. A. Jr. (2015). Marine cage culture and the environment: effects on water quality and primary production. *Aquaculture Environment Interactions*, 6, 151-174. <https://doi.org/10.3354/aei00122>
- Roesch, M. (1999). *Snort: Lightweight intrusion detection for networks*. En Proceedings of the 13th USENIX conference on System administration (pp. 229-238).
- Roman, R., Zhou, J. y Lopez, J. (2013). On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things. *Computer Networks*, 57(10), 2266-2279. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.018>
- Salagean, M. y Zinca, D. (2020). *IoT Applications based on MQTT Protocol*. En International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), 2020 (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISETC50328.2020.9301055>
- Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A. y Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy, and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, 76, 146-164.
- Singh, M., Sahoo, K. S. y Gandomi, A. H. (2023). An Intelligent IoT-Based Data Analytics for Freshwater Recirculating Aquaculture System. *IEEE Internet of Things Journal*. Publicación anticipada en línea. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3298844>
- Stojmenovic, I. y Wen, S. (2014). *The fog computing paradigm: Scenarios and security issues*. En 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (pp. 1-8). IEEE.
- Sturges, A. (2010). *Suricata: Open source next generation intrusion detection and prevention engine*. Open Information Security Foundation.
- Tacon, A. G. J. y Metian, M. (2015). Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 23(1), 1-10. <https://doi.org/10.1080/23308249.2014.987209>
- Troell, M., Naylor, R. L. y Metian, M. (2014). Does aquaculture add resilience to the global food system? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(37), 13257-13263. <https://doi.org/10.1073/pnas.1404067111>
- Weber, R. H. (2010). Internet of Things - New security and privacy challenges. *Computer Law & Security Review*, 26(1), 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2009.11.008>
- Whitmore, A., Agarwal, A. y Da Xu, L. (2015). The Internet of Things - A survey of topics and trends. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 261-274. <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9489-2>
- Zabbix LLC. (2021). *Zabbix*. <https://www.zabbix.com/>
- Ziegeldorf, J., Morchon, O. y Wehrle, K. (2014). Privacy in the Internet of Things: Threats and Challenges. *Security and Communication Networks*, 7(12), 2728-2742. <https://doi.org/10.1002/sec.795>

CONTRIBUCIONES DE AUTORES/AS, FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Contribuciones de los/as autores/as:

Conceptualización: Medrano, Karens; **Software:** Apellidos, Nombres **Validación:** Moreno, Ángel **Análisis formal:** Tejada, Rene; **Curación de datos:** Hernández, Evelyn; **Redacción-Preparación del borrador original:** Medrano, Karens **Redacción-Re- visión y Edición:** Tejada, Rene **Visualización:** Tejada, Rene **Supervisión:** Hernández, Evelyn **Administración de proyectos:** Medrano, Karens **Todos los/as autores/as han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito:** Medrano, Karens; Hernández, Evelyn; Tejada, Rene; Moreno, Ángel.

Financiación: No financiamiento externo.

Agradecimientos: Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Don Bosco por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación. Agradecemos el acceso a los recursos y las instalaciones fundamentales para este estudio.

AUTOR/ES:

Karens Medrano

Universidad Don Bosco, El Salvador.

Estudié Ingeniería en Ciencias de la Computación en la Universidad Don Bosco y tengo un Máster en Gestión Integral de Seguridad, Sistemas y Redes Informáticas. Poseo conocimientos avanzados en programación, bases de datos relacionales y Big Data. Además, tengo experiencia en tecnologías emergentes como Internet de las Cosas (IoT) y realidad virtual y aumentada. Mi formación académica y habilidades técnicas me capacitan para abordar desafíos complejos en el ámbito de la informática y la tecnología, destacándome por mi capacidad para implementar soluciones innovadoras y seguras en diversos entornos digitales. karens.medrano@udb.edu.sv

Índice H: 1

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-2092-2622>

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57207031272>

Evelyn Hernández

Universidad Don Bosco, El Salvador.

Estudié Ingeniería en Ciencias de la Computación en la Universidad Don Bosco y tengo un Máster en Tecnología Educativa. Poseo conocimientos avanzados en programación, bases de datos relacionales y Big Data. Además, tengo experiencia en tecnologías emergentes como Internet de las Cosas (IoT). Mi formación académica y habilidades técnicas me capacitan para abordar desafíos complejos en el ámbito de la informática y la tecnología, destacándome por mi capacidad para implementar soluciones innovadoras y seguras en diversos entornos digitales.

evelyn.hernandez@udb.edu.sv

Índice H: 1

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-8287-0015>

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58282802700>

Rene Tejada

Universidad Don Bosco, El Salvador.

studié Ingeniería en Ciencias de la Computación en la Universidad Don Bosco y tengo un Máster en Gestión Integral de Seguridad, Sistemas y Redes Informáticas. Poseo conocimientos avanzados en programación, bases de datos relacionales y una sólida especialización en infraestructuras de redes. Además, tengo experiencia en tecnologías emergentes como Internet de las Cosas (IoT), realidad virtual y aumentada. Mi formación académica y habilidades técnicas me capacitan para abordar desafíos complejos en el ámbito de la informática y la tecnología, destacándome por mi capacidad para implementar soluciones innovadoras y seguras en diversos entornos digitales.

rene.tejada@udb.edu.sv

Índice H: 1

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-2996-3217>

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57545979200>

Angel Moreno

Universidad Don Bosco, El Salvador.

Actualmente soy Estudiante de la Maestría en Automatización Industrial, graduado de Ingeniería en Electrónica y del técnico en ingeniería electrónica con especialización en telecomunicaciones. Me he especializado en el desarrollo de proyectos que permiten la integración de sistemas electrónicos de instrumentación y potencia, redes de comunicaciones electrónicas y las tecnologías para la automatización de procesos industriales.

angel.moreno@udb.edu.sv

Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0004-5238-9430>