

SISTEMA DE MONITOREO DE AMBIENTE PARA EL CONTROL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE LAS GRANJAS ACUÍCOLAS DE LA SELVA DEL PERÚ BASADO EN INTERNET DE LAS COSAS*

ADRIAN ERNESTO LINO VILLARAN
20170837@aloe.ulima.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0003-1421-6921>
Universidad de Lima, Perú

RESUMEN. La industria alimenticia de la acuicultura está creciendo a un ritmo tan acelerado que está por alcanzar a la pesca en toneladas producidas. Sin embargo, en el Perú, la acuicultura se encuentra poco desarrollada: su participación en el sector es del 1,4 %, y cuenta con productores poco especializados, que residen en zonas alejadas con baja posibilidad de acceso tecnológico. Por ello, en este trabajo se plantea un sistema de monitoreo de ambiente semiautónomo dirigido exclusivamente a la zona oriental del Perú, capaz de medir temperatura (agua y aire), oxígeno disuelto, pH y luminosidad. Con este fin se genera un nodo de medición de parámetros que captura las condiciones ambientales y las envía a un *gateway* a través de la red LoRa. En un despliegue de casi cinco días, con más de 69 000 datos capturados, el sistema demostró que tiene la capacidad de medir las condiciones ambientales de forma precisa y autónoma con tendencias normales para la ubicación y hora de medición. Asimismo, se pudieron identificar ciertas correlaciones entre los datos obtenidos, como la temperatura del ambiente sobre el oxígeno disuelto, que tiene un coeficiente de correlación de 0,81. Por otro lado, el uso de la red LoRa requiere aplicar cierto tipo de control de la integridad de la información, ya que esta no viene por defecto. Finalmente, se concluye que el sistema desarrollado sí permite monitorear las condiciones ambientales en la selva peruana, brindando al productor la capacidad de visualizar su información en tiempo real de forma local y remota.

PALABRAS CLAVE: internet de las cosas, red inalámbrica de sensores, sensores

* Quiero agradecer a mi asesor Pablo Alberto Rojas Jaén, quien me guio en el desarrollo; y a la asociación de productores piscícolas de Campoverde, que puso a mi disposición sus instalaciones para la experimentación.

ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM FOR THE CONTROL OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF AQUACULTURE FARMS IN THE PERUVIAN JUNGLE BASED ON THE INTERNET OF THINGS

ABSTRACT. The aquaculture food industry is growing at a fast pace and is about to catch up with fishing in terms of tons produced. However, in Peru aquaculture only represents 1,4 % of the fish industry, with producers who are not very specialized and live in remote areas with lack of technology. For this reason, a semi-autonomous environment monitoring system is being developed exclusively for the eastern zone of Peru, capable of measuring temperature (water and air), dissolved oxygen, pH, and luminosity in real time. For its development, a Parameter Measurement Node is proposed which captures the conditions of the environment and send them to a gateway through the LoRa network. During a 5 days period, more than sixty-nine thousand data points were captured, the system demonstrated that it could measure environmental conditions accurately and autonomously with expected trends for the location and time of measurement. Likewise, it was possible to identify certain correlations between the data, such as ambient temperature and dissolved oxygen, which has a correlation coefficient of 0,81. On the other hand, the use of the LoRa network requires the application of a certain type of information integrity control since it is not provided by default. Finally, it was concluded that the system developed does allow monitoring environmental conditions in the Peruvian rainforest, providing the producer with the ability to visualize his information in real time locally and remotely.

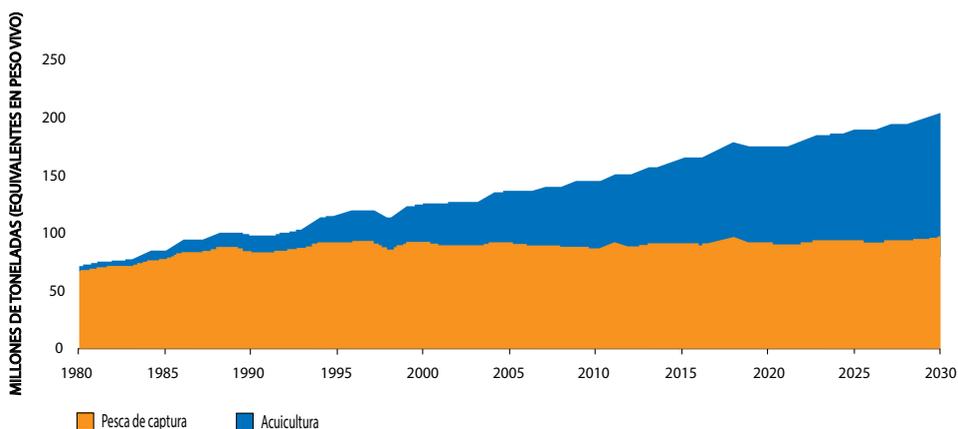
KEYWORDS: Internet of Things, wireless sensor network, sensors

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la acuicultura es la industria alimenticia con el crecimiento más acelerado: a nivel mundial, ha crecido un 8,9 % desde los años setenta, lo cual demuestra su enorme potencial (Subasinghe, 2005). Asimismo, esta tendencia continúa, como se puede apreciar en la Figura 1 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020, p. 193).

Figura 1

Producción mundial de pescado



Nota. Reproducido de *El estado mundial de la pesca y la acuicultura* (p. 179), por FAO, 2020.

Por otro lado, a nivel nacional, la producción de pescado representa el 0,30 % del PBI (Banco Central de Reserva del Perú [BCRP], 2020); este sector sufrió una variación de únicamente -15,8 % entre el segundo trimestre del 2019 y el del 2020, por lo que se posiciona como el segundo sector menos afectado en este periodo (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2020). Asimismo, la FAO (2020) indica que se produjo 7,2 millones de toneladas de pescado, de las cuales 104 000 toneladas provienen de la acuicultura, que tiene una participación del 1,4 % en el sector. Sin embargo, a nivel mundial, la participación acuícola es significativamente mayor: representa el 45,9 % de la producción total de pescado, lo que indica un bajo desarrollo del sector acuícola en el Perú en comparación con la producción global (FAO, 2020, p. 180).

En línea con lo mencionado, su poca representación (INEI, 2020) coloca a los productores pertenecientes a la acuicultura de recursos limitados (47,9 % del sector acuícola) y a la acuicultura de micro y pequeña empresa (50,7 % del sector acuícola)

del país en una difícil posición para acceder a tecnología con el objetivo de hacer crecer su negocio y mejorar sus prácticas de producción, ya que no se encuentran en la capacidad de innovar tecnológicamente debido a su informalidad, inestabilidad financiera y carencia de infraestructura de sus zonas (Ministerio de la Producción, 2018, p. 16).

A la fecha, a nivel internacional, se han llevado a cabo investigaciones sobre la implementación de sistemas basados en internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés); sin embargo, son muy pocos los trabajos de este tipo para un ambiente de producción en el territorio peruano. Así, no se toma en consideración las características de conectividad, climáticas y geográficas de la zona oriental del país; en cambio, las investigaciones internacionales fueron realizadas bajo condiciones controladas de laboratorio, en donde se tiene disponibilidad de corriente eléctrica y conexión constante a internet (Encinas et al., 2017; Kang et al., 2017; Salim et al., 2016).

Debido a lo mencionado anteriormente, la presente investigación busca enfocarse en los pequeños y microacuicultores de la parte oriental del Perú, y desarrollar un sistema que permita monitorear el ambiente de producción. Asimismo, se busca considerar las características geográficas y climáticas, así como la disponibilidad de conexión a internet para el desarrollo de la investigación.

2. ESTADO DEL ARTE

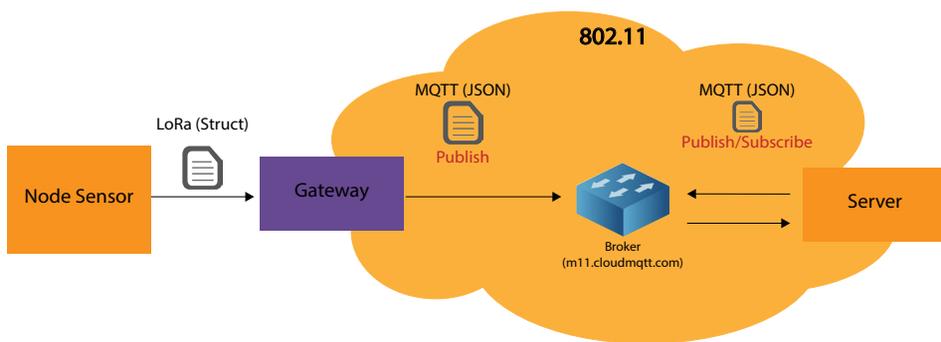
En el territorio nacional existen escasas investigaciones o proyectos sobre sistemas de monitoreo de ambiente orientados a la acuicultura. Una de ellas es la de Ríos Julcapoma y Yauri Rodríguez (2017), quienes realizaron la implementación de un nodo sensor que fue desplegado en la ciudad de Iquitos. Este dispositivo contaba con sensores de temperatura, oxígeno disuelto y pH, los cuales se encontraban conectados a un microcontrolador PIC24 que, a través de la red ZigBee, transmitía los datos recopilados. Este nodo fue construido sobre un armazón de tubos de PVC para su flotabilidad; además, se colocó un panel solar en la parte lateral para la alimentación de energía.

Zhu et al. (2010) y Shi et al. (2018) desarrollaron sistemas bastante similares utilizando una red inalámbrica de sensores (WSN, por sus siglas en inglés) y un *gateway*. Pero se diferencian en que Zhu et al. (2010) usan la red CDMA, mientras que Shi et al. (2018) la red GPRS (véase la Figura 2). Ambos proyectos buscaron no ser dependientes de una red alámbrica de internet para que puedan ser usados en las locaciones más lejanas. Shi et al. (2018) concluyen en su estudio que el uso de una topología de árbol genera una menor pérdida de paquetes en el envío de información,

en comparación con los patrones estrella y malla, así como en la observación se pudo notar un menor uso de energía. Por otro lado, Zhu et al. (2010) lograron implementar redes neuronales de retropropagación que sirvieron para pronosticar de forma correcta y estable el oxígeno disuelto (OD) en el sistema, culminando con un 92,5 % de consistencia y la posibilidad de brindar alertas sobre posibles caídas futuras en los parámetros medidos.

Figura 2

Arquitectura



Nota. Reproducido de "A Wireless Sensor Network-based Monitoring System for Freshwater Fishpond Aquaculture", por B. Shi, V. Sreeram, D. Zhao, S. Duana y J. Jiang, 2018, *Biosystems Engineering*, 172.

Yim et al. (2018), en su investigación, ponen a prueba la respuesta a la interferencia de la red LoRa en un bosque de árboles ubicado en el estado de Indiana, Estados Unidos. Los autores ubicaron un emisor en un extremo del bosque, e hicieron pruebas de recepción de paquetes con un tamaño de 9 bytes a 100 m, 150 m y 200 m de distancia, variando el *spreading factor* (SF), el ancho de banda (BW) y el *coding rate* (CR) de la transmisión. Se realizaron 12 combinaciones de los parámetros anteriormente mencionados y se logró concluir que se debe mantener el SF y el CR lo más alto posible para una mayor fiabilidad en la transmisión.

Encinas et al. (2017) señalan que en la acuicultura es esencial responder rápidamente a las variables cambiantes del entorno para el correcto desarrollo de los peces. Sin embargo, las mediciones suelen ser manuales, a cargo de personal que va directamente a medir la calidad del agua. El problema es una respuesta tardía a las variables del sistema; así, cuando se obtiene un valor alarmante, por lo general es demasiado tarde. Esto se ve reflejado en el estudio de Abbink et al. (2012), quienes alteraron distintos parámetros en un sistema acuícola de recirculación de agua para la especie *Seriola lalandi*. En esta investigación, se realizaron dos experimentos: el

primero analiza el efecto de la variación de la temperatura en los peces; y el segundo, el efecto del pH en la vida de los peces. Con estos experimentos se pudo concluir que la temperatura ideal para la especie es de 26,5 °C, ya que genera un crecimiento del 30 % del peso final luego de 30 días, en comparación con 21 °C. Asimismo, se dedujo que una baja en el pH estresa a los peces y los lleva a la muerte, por lo que su vida tiene una alta dependencia de este parámetro.

El estudio de Grados y Bedon (2020) busca plantear y documentar la arquitectura de un sistema de monitoreo de cultivos de quinua y de un sistema de predicción de la ubicación de peces en el mar. Dicha arquitectura comprende *hardware*, *software*, tecnología y servicios de *cloud*. En el *hardware*, el *gateway* utilizó un Raspberry Pi con el sistema operativo Raspbian, el cual se conectaba mediante XBee a las estaciones. El servicio *cloud* que se utilizó provino de Google Cloud Platform, en donde se realizaba el procesamiento y almacenamiento de la data. A través de este servicio en nube, la aplicación del usuario recupera la data y permite actuar sobre el sistema.

3. ANTECEDENTES

Existe un déficit tecnológico en la acuicultura a nivel nacional, el cual se encuentra enfocado en los productores de menor escala; por eso, es de suma urgencia introducir la innovación tecnológica a las zonas más alejadas del país (Ministerio de la Producción, 2018). Esto requiere que ciencia, tecnología e innovación converjan entre sí para que, en conjunto, se pueda diseñar un sistema con la mayor calidad posible.

3.1 Acuicultura

La acuicultura es la actividad de cultivar especies hidrobiológicas (peces, moluscos, crustáceos y plantas acuáticas) en lugares controlados (FAO, 1988). Esta actividad resulta bastante compleja, pues, en todos los casos, es necesario medir constantemente las condiciones del ambiente para lograr el mejor desarrollo de los animales y plantas. Asimismo, cada uno de los parámetros del ambiente afecta de cierta manera al animal o planta, generando efectos sobre ellos. Por ello, es necesario establecer la importancia de cada uno de estos parámetros para posteriormente determinar un método de medición y control de estos. Uno de los parámetros más importantes es el oxígeno disuelto (DO), ya que su disminución resulta fatal para la mayoría de los animales y bacterias marinas (Kramer, 1987). Le siguen otros como pH, temperatura, sal, nitratos, ácido sulfhídrico, carbonatos, bicarbonatos y amoníaco (Campbell, 1973; Manahan, 2000; Raju & Varma, 2017).

3.2 Internet de las cosas

Dorsemaine et al. (2015) definen internet de las cosas (IoT) como un grupo de infraestructuras basadas en sensores y actuadores que al comunicarse entre sí transportan, almacenan y procesan información. De la misma manera, al diseñar un sistema de IoT, se debe analizar ciertos pilares, que se detallan a continuación.

3.2.1 Fuente de energía

Bormann y Keranen (2014) presentan cuatro tipos de adquisición de energía: energía del ambiente, energía recargable, energía primaria no recargable y siempre conectado. De estas, las tres primeras requieren un manejo del consumo, ya que son limitadas y pueden afectar el tiempo de vida del dispositivo, así como su capacidad de procesamiento. En el caso de los dispositivos ubicados en el exterior, en zonas alejadas y con baja disponibilidad de corriente eléctrica, los paneles solares con baterías son bastante utilizados. Debido a esto, es de suma importancia calcular el requerimiento energético del dispositivo, con el fin de contar con una batería que permita alimentarlo durante las horas necesarias y con un panel solar para alimentar el dispositivo y cargar la batería instalada en un tiempo prudente. Para pequeños dispositivos, se recomienda el uso de un microcontrolador como un Arduino Nano, que tiene un consumo de 19 mA (Arduino, s. f.; Dorsemaine et al., 2015).

3.2.2 Redes de comunicación

Es importante escoger el tipo de red de comunicación, ya que esta puede variar el consumo energético mencionado en el punto anterior. Asimismo, esta elección depende de la funcionalidad que se le da al sistema, si se va a colocar uno o muchos sensores, o el tipo de arquitectura que se va a utilizar. Jawad et al. (2017) presentan las tecnologías LoRa, ZigBee, Bluetooth, wifi y GPRS. Entre estas tecnologías, la red LoRa es la que mejor se ajusta al presente proyecto debido a su amplio alcance (15 km aproximadamente), bajo consumo y flexibilidad.

3.2.3 Sensores y actuadores

Un sensor es un dispositivo que detecta eventos o cambios en el ambiente y provee una señal de salida (Rayes & Salam, 2016). Existe una amplia gama de sensores; Sehrawat y Gill (2019) los dividen en 13 tipos, entre los cuales se encuentran los sensores de proximidad, posicionamiento, presencia, movimiento, velocidad, temperatura, presión, químicos, humedad, calidad de agua, infrarrojo, giroscopio y ópticos.

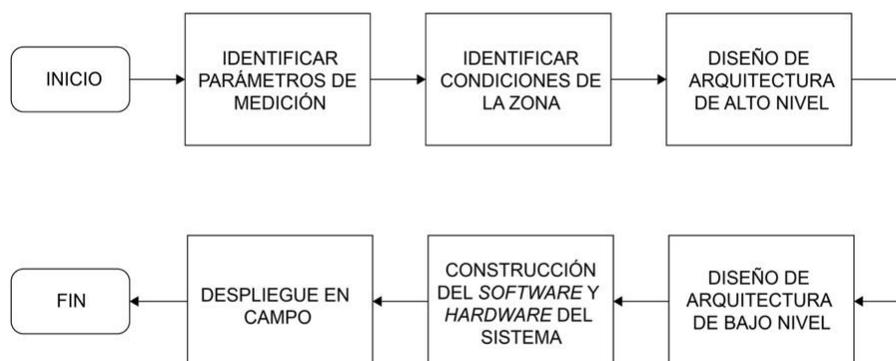
Un actuador es un dispositivo que toma acción sobre el sistema, afectando las condiciones de este (Rayas & Salam, 2016). Estos normalmente toman acción por los resultados que brinda un sensor, regulando las condiciones del sistema.

4. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

El objetivo de la presente investigación es desarrollar el *software* y el *hardware* de un sistema de monitoreo y control de ambiente que permita medir las condiciones ambientales de las granjas acuícolas de la zona oriental del Perú. Para ello, en la Figura 3 se detalla la metodología.

Figura 3

Metodología



4.1 Identificación de parámetros de medición

Como se mencionó anteriormente, existen ciertos parámetros que deben mantenerse en rangos óptimos para el correcto desempeño del animal. Sin embargo, algunos de ellos son más importantes que otros, por lo que es esencial clasificarlos. A continuación, se describe en detalle cada uno de los parámetros priorizados.

- *Oxígeno disuelto*. Es uno de los parámetros más importantes en una producción acuícola, pues una baja significativa del oxígeno disuelto puede llevar a los peces a sofocarse y, finalmente, a la muerte (Kramer, 1987). Por otro lado, variaciones no letales pueden ocasionar una mala alimentación y una tasa de conversión alimenticia deficiente (Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero, 2004).
- *Temperatura*. Afecta el metabolismo del animal; a mayor temperatura, mayor consumo de oxígeno y alimentación (Fondo Nacional de Desarrollo

Pesquero, 2004). Asimismo, la temperatura del aire afecta directamente a la temperatura del agua.

- *pH*. Una alteración en el pH del agua que sobrepase las condiciones normales de cultivo puede llevar a los peces al estrés y, finalmente, a la muerte (Abbink et al., 2012). Es recomendable medirlo de forma constante, pero no se considera esencial, debido a su poca volatilidad.
- *Luminosidad*. Afecta directamente a la producción de oxígeno natural en el agua a causa de fotosíntesis, por lo que se puede utilizar para relacionarlo con la producción de oxígeno.

4.2 Identificación de la zona

Para la identificación de las condiciones ambientales de la zona oriental del país, se realizó un viaje a la ciudad de Pucallpa del 30 de julio al 8 de agosto del 2021, en el que se visitaron diez productoras piscícolas ubicadas en el distrito de Campoverde. En estas inspecciones, se encontró que, debido a que el terreno es accidentado y con amplia vegetación, los productores limpian sus zonas y utilizan maquinaria para nivelarlas. A pesar de ello, una pequeña cantidad de productoras piscícolas presentan variaciones en altitud, por lo que construyen sus estanques de forma escalonada con el objetivo de aprovechar la gravedad para transferir el agua entre sus estanques. Los estanques observados cuentan con una profundidad de entre 1,60 m y 1,80 m, con medidas de 20 m × 10 m hasta los 50 m × 30 m, aproximadamente (véase la Figura 4). Por otro lado, en la ciudad de Pucallpa, se producen temperaturas elevadas a lo largo del año, que oscilan entre 19 °C y 33 °C (véase la Figura 5), según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi, 2021).

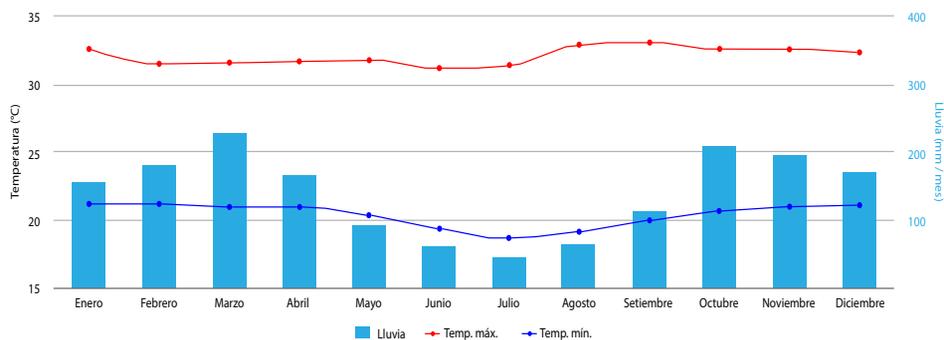
Figura 4

Piscinas construidas de forma escalonada



Figura 5

Clima promedio en Pucallpa



Nota. Reproducido de *Promedio de temperatura normal para Pucallpa*, por Senamhi, 2021 (<https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-detalle-turistico&localidad=0024>).

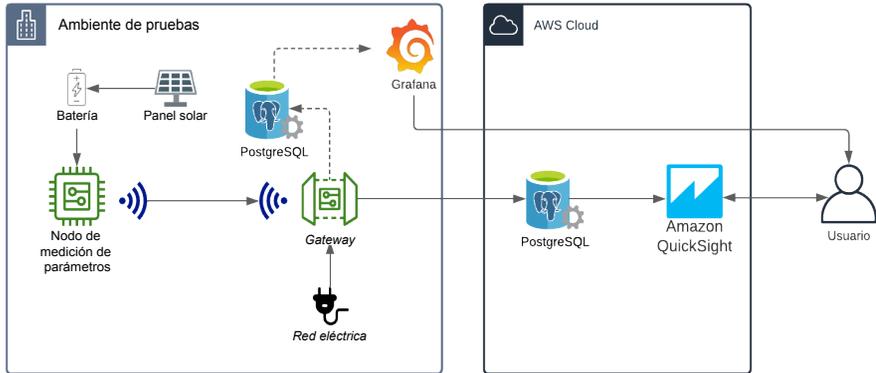
El 70 % de las productoras piscícolas visitadas en el distrito de Campoverde no cuentan con una conexión de red eléctrica constante, por lo que ciertos productores optan por el uso de paneles solares o de generadores a gasolina para manejar sus equipos. Además, la señal de celular en Campoverde no está implementada a lo largo de todo el distrito, por lo que la señal más estable se encuentra alrededor de la carretera. Debido a ello, algunos productores usan internet satelital, que es más costoso y no permite que puedan desplazarse a lo largo de todo su terreno con conectividad constante en sus dispositivos móviles.

4.3 Diseño de arquitectura de alto nivel

Para el diseño de la arquitectura, se planteó el uso de dos dispositivos físicos: un nodo de medición de parámetros y un *gateway*. En el caso del nodo de medición de parámetros, al ser un dispositivo que será ubicado dentro de una piscina, alejado de cualquier tipo de conexión eléctrica, se propone utilizar un panel solar acompañado de una batería que permita su funcionamiento durante las noches. Por otro lado, para el *gateway*, que es un dispositivo que se encontrará colocado en una zona administrativa, se considerará la disponibilidad de red eléctrica. Asimismo, el *gateway* se conectará a internet a través de una señal wifi o cableada, en caso de que se encuentre disponible, la cual puede provenir de distintas fuentes. Para el almacenamiento de los datos sin conexión, se implementará una base de datos y se utilizará el *software* Grafana para visualizar los datos *gateway*, ambos de forma local. Cabe mencionar que se mantendrá la misma estructura de Amazon Web Services (AWS) para la visualización de datos de forma remota. Dichos cambios se pueden apreciar en la Figura 6.

Figura 6

Arquitectura de alto nivel



4.4 Diseño de arquitectura de bajo nivel

4.4.1 Nodo de medición de parámetros

- *Componentes de hardware*

En la construcción del nodo de medición de parámetros, se utiliza como componente principal un Arduino Nano conectado a un módulo LoRa SX1268. Este módulo cumple las funciones de transmisor y receptor mediante la conexión SPI al Arduino Nano. Este módulo transmite a través de la red LoRa a 433 MHz con una potencia máxima de transmisión de 18 ± 1 dBm paquetes de hasta 256 bytes (Ai-Thinker, 2017). Asimismo, el nodo contará con los sensores descritos en la Tabla 1.

Tabla 1

Sensores

Parámetros	Sensor
Oxígeno disuelto	Sensor digital Atlas Scientific
Temperatura del aire	DS18B20
Temperatura del agua	DS18B20
pH	PH-4502C DIY-MORE
Luminosidad	BH1750

Debido a las condiciones extremas de la zona, se decidió utilizar como fuente de energía un panel solar sobredimensionado, ya que en los días nublados o con poca energía solar este sería capaz de compensarlo. En la Tabla 2 se muestra el detalle

de la fuente de energía y en la Figura 7 se observa el diagrama de circuitos de todo el sistema.

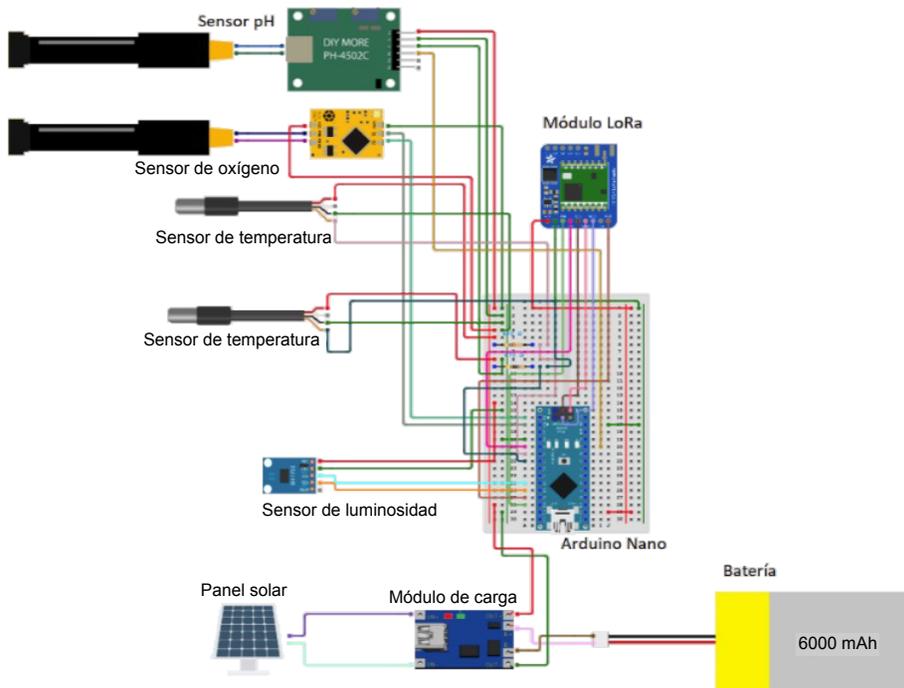
Tabla 2

Fuente de energía

Concepto	Valor
Voltaje máximo de salida	18,36 V
Amperaje máximo de salida	1,63 A
Amperaje mínimo requerido	140 mA
Batería del sistema	6000 mAh

Figura 7

Diagrama de circuitos del nodo de medición de parámetros



En línea con lo mencionado, se utilizaron dos cajas de derivación de 20 cm × 15,5 cm × 8 cm y de 10 cm × 10 cm × 7 cm para el dispositivo y componentes de alimentación de energía, implementando prensaestopas en las conexiones

salientes, de tal forma que el agua no pueda ingresar dentro del dispositivo (véase la Figura 8). Asimismo, se decidió construir una estructura flotante que soporte todos los componentes del nodo de medición de parámetros. De esta forma, los sensores pueden ser ubicados en el centro de la poza y mantienen una profundidad constante en el agua, aunque el nivel de esta cambie. La estructura fue construida con tubos de PVC de 4 pulgadas sellados con pegamento para evitar el ingreso del agua. Asimismo, en el interior de los tubos, se insertaron botellas de plástico para que, en caso de ingreso de agua, esta no pueda hundir al dispositivo. De igual forma, se colocó un tubo de 1 pulgada que soportaba los componentes y el panel solar se instaló en la parte superior. Esta estructura se puede observar en las Figuras 9 y 10.

Figura 8

Nodo de medición de parámetros



Figura 9

Estructura flotante



Figura 10

Estructura flotante (lateral)



- *Software*

El *software* desarrollado cumple la función de interactuar con los sensores conectados al nodo de medición de parámetros. Para ello, se utilizaron las librerías DallasTemperature, OneWire, BH1750, ArduinoJson y RH_RF95, las cuales permitieron al Arduino Nano interactuar con los módulos propuestos (Blanchon, 2021; Burton, 2021; Laws, 2021; Mistry, 2021; Studt et al., 2019). Asimismo, debido a la posibilidad de que los paquetes lleguen incompletos o con data errónea, el código desarrollado genera un *checksum* basado en la codificación de cada carácter del texto enviado, el cual se concatena con el paquete enviado, con el fin de que el *gateway*, al recibir la información, pueda hacer la verificación correspondiente.

Para el desarrollo del código se tomó como referencia el artículo de Raj (2019), publicado en el sitio web CircuitDigest. El código puede ser descargado en el siguiente repositorio: https://github.com/adrianlinov/nmp_inv.

4.4.2 Gateway

- *Hardware*

Para el *gateway* se utilizó un Raspberry Pi 4 Modelo B. Este dispositivo cuenta con un procesador Broadcom BCM2711 de 8 núcleos de 64 bits, 8 GB de RAM DDR4, puerto Ethernet, 4 puertos USB, pines GPIO, así como wifi y Bluetooth integrado. Esto lo vuelve un dispositivo muy capaz para desarrollar el proyecto (The Raspberry Pi Foundation, 2021).

El Raspberry Pi 4 Modelo B, por contar con pines GPIO, es factible de conectarse al módulo SX1268 mencionado anteriormente; esto le da la capacidad

de recibir los mensajes enviados por el Arduino Mega 2560 de forma inalámbrica a través de la red LoRa. Se puede observar el diagrama de circuitos en la Figura 11 y el *gateway* conectado al módulo SX1268 en la Figura 12.

Figura 11

Diagrama de circuitos gateway

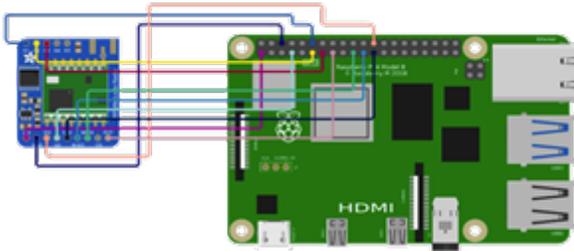


Figura 12

Gateway



- *Software*

Para el desarrollo del *software*, se utilizó un Raspberry Pi 4 con las características de *software* mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3*Características del gateway*

Concepto	Descripción
Computador	Raspberry Pi 4 Modelo B
Sistema operativo	Raspbian 10.8
Lenguaje de programación	Python 3.7.3
Base de datos	PostgreSQL

El nodo de medición de parámetros envía al *gateway* información cada 15 segundos, aproximadamente, de forma inalámbrica; esto lo vuelve susceptible a interferencias que ocasionan que la data llegue incompleta o errónea. Debido a ello, se aplicó un método de verificación basado en la suma de caracteres, también llamado *checksum*. Otra funcionalidad desarrollada es la replicación de la base de datos local en la nube (véase la Tabla 4), para la cual se verifica si la fila de información ha sido sincronizada previamente mediante la columna *synced* y, si fuera necesario, se replican las filas nuevas de la base de datos a la nube. Esta funcionalidad depende de una conexión a internet, por lo que se implementó la reiteración constante en caso de que los datos no se hayan subido por una desconexión. Para el desarrollo del código se tomó como referencia el artículo de Raj (2019). El código puede ser descargado del siguiente repositorio: <https://github.com/adrianlinov/gateway-inv>.

Tabla 4*Descripción de tablas*

Tabla	Descripción
Center	Datos del centro de producción
Measurement	Medidas capturadas por el sistema
Pool	Datos de la piscina dentro del centro de producción
Ms_type	Tipo de dato medido por el sistema

Cabe mencionar que, para alojar la base de datos en nube, se usó AWS mediante el servicio RDS en una instancia db.t2.micro con 20 GB de almacenamiento en discos de estado sólido.

5. RESULTADOS

La experimentación se llevó a cabo en una granja piscícola ubicada a 40 km de la ciudad de Pucallpa, en el distrito de Campoverde. El despliegue fue realizado desde

el jueves 21 de octubre del 2021 a las 2:00 p. m. hasta el lunes 25 de octubre del 2021 a las 11:00 a. m. aproximadamente. El dispositivo fue colocado en medio de una piscina con alrededor de 900 peces de la especie amazónica paco, anclado a una estaca en medio de la poza. El despliegue se puede observar en la Figura 13.

Figura 13

Despliegue del nodo de medición de parámetros



Durante el despliegue, el nodo de medición de parámetros envió información al *gateway* de forma constante; sin embargo, sufrió una interrupción por un corte de energía de aproximadamente 27 horas desde la mañana del sábado 23 hasta el domingo 24 de octubre. Este corte de energía hizo que el *gateway* no capture los datos enviados por el nodo de medición de parámetros, por lo que se perdió dicha información. A pesar de ello, el dispositivo registró 169 016 puntos de información, pero en un análisis posterior se pudo notar que se habían almacenado datos duplicados, por lo que se generó un total de 69 257 datos únicos. El detalle se puede observar en la Tabla 5. Además del corte de energía, el lunes 25 de octubre se produjo lluvia y viento, que fueron soportados sin problemas por el nodo de medición de parámetros, ya que este continuó operando y no se observó ingreso de agua dentro de las cajas de los componentes. Los datos obtenidos se encuentran en el siguiente enlace: <https://bit.ly/3L4lGq0>.

Tabla 5*Paquetes recibidos*

Parámetro	Paquetes recibidos con duplicados	Paquetes recibidos sin duplicados
Temperatura del aire	34 191	13 858
Luz del ambiente	34 191	13 858
Oxígeno disuelto	33 524	13 846
pH	33 524	13 846
Temperatura del agua	33 586	13 849

El corte de energía y la falta de internet ocasionaron que el Raspberry Pi perdiera el punto de referencia horaria, almacenando datos con una hora errónea. Por otro lado, si bien se implementó un sistema para sincronizar los datos almacenados de forma local con una base de datos remota alojada en AWS, el dispositivo no pudo ser conectado a internet, por lo que los datos únicamente fueron almacenados de forma local. Esto causó que los *dashboards* de Amazon Quicksight no se encontraran actualizados.

Adicionalmente, se pudo comprobar que una batería de 6000 mAh es suficiente para proveer de energía al dispositivo durante la noche y ser cargada durante el día, manteniendo la continuidad del envío de los datos al *gateway*.

A continuación, se exponen en detalle los datos obtenidos durante el periodo de despliegue. Cabe mencionar que se representará con una línea punteada verde el punto en el tiempo aproximado donde se generó el corte de energía, por lo cual los datos siguientes no están correctamente ubicados en el tiempo.

- *Temperatura del agua y del ambiente*

Figura 14

Mediciones de temperatura del agua y del ambiente

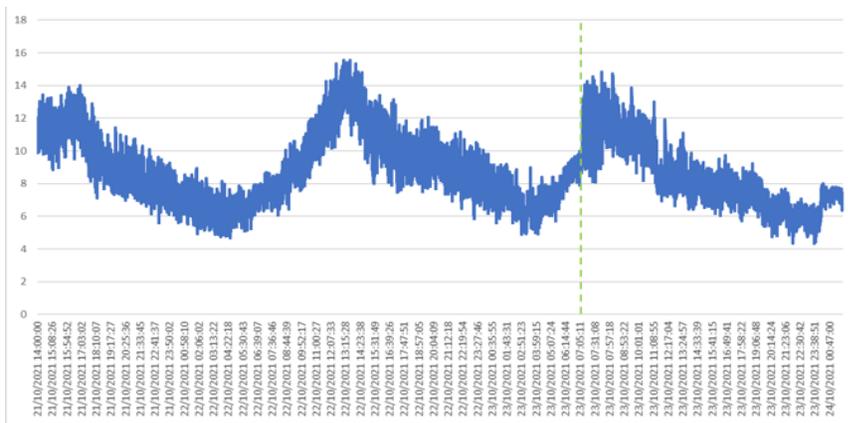


En la Figura 14 se observa que la temperatura del ambiente varía entre los 22 °C y los 36 °C, lo que genera una respuesta con la misma tendencia en la temperatura del agua, la cual varía en menor medida. Asimismo, se puede observar una drástica caída en la temperatura al final del gráfico, que pudo haberse ocasionado por la lluvia del lunes 25 de octubre por la mañana.

- Oxígeno disuelto

Figura 15

Mediciones de oxígeno disuelto

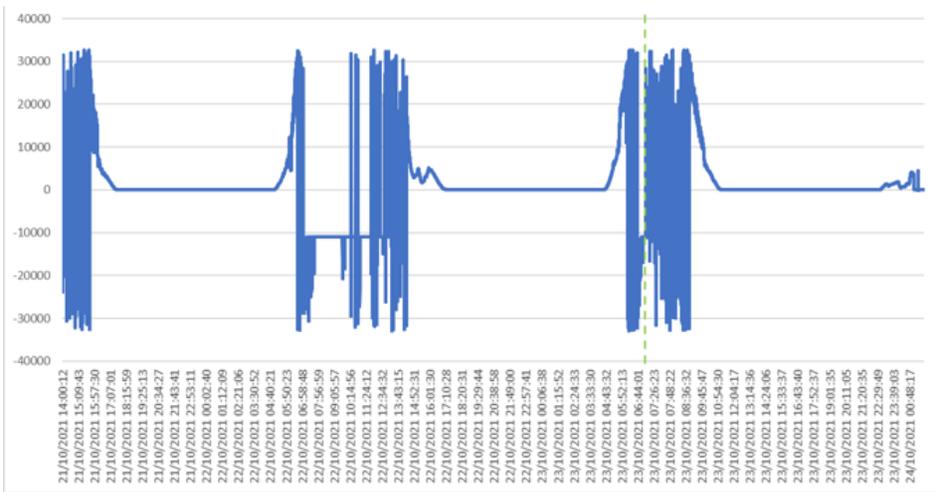


El oxígeno disuelto representado en la Figura 15 mostró el comportamiento esperado: se incrementa durante las horas con más luz y decrece por la tarde y noche, gracias a la fotosíntesis producida por los microorganismos en el agua (Hoganson & Babcock, 1997). Por otro lado, los datos tuvieron una desviación estándar de 2,16, representada con una alta variabilidad en los datos.

- *Luminosidad*

Figura 16

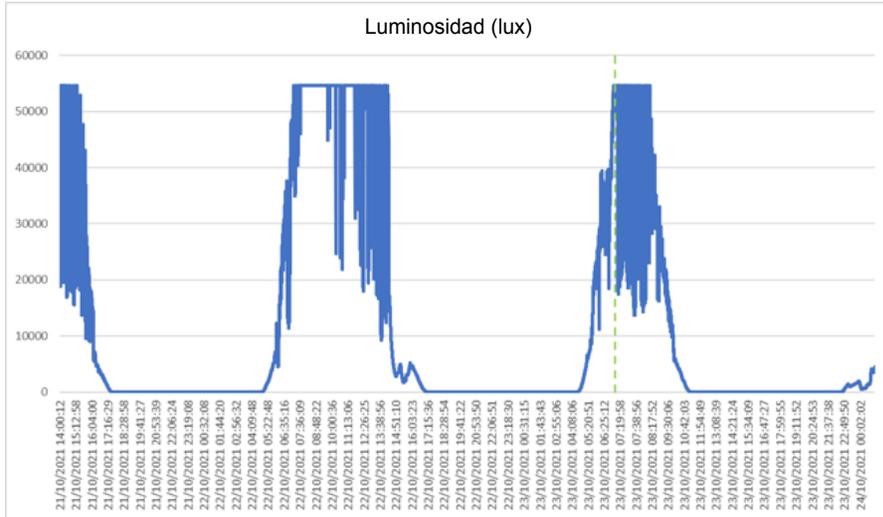
Mediciones de luminosidad



El sensor de luminosidad pudo medir la luz en el ambiente hasta los 32 766 lux; posterior a ello, se registraron datos negativos en la base de datos, los cuales se pueden ver en la Figura 16. A pesar de que el sensor de luminosidad BH1750 puede medir hasta 65 535 lux, los dispositivos Arduino basados en procesadores ATmega almacenan los números enteros o *integers* en un formato de 16 bits, con el bit en posición 16 como el signo que separa positivos y negativos. Esto genera que el rango de valores soportados sea de entre $-32\ 768$ a $32\ 768$, lo que provoca una pérdida de datos cuando este es superado. Sin embargo, es factible realizar la conversión de los valores almacenados como negativos sumándole 65 536 a dicho valor. Se pueden observar los datos con el rango corregido en la Figura 17.

Figura 17

Mediciones de luminosidad con rango corregido



Por otro lado, los datos presentaron una alta variabilidad en periodos con gran luminosidad, posiblemente debido al efecto de las nubes sobre el dispositivo, aunque no se podría confirmar esta afirmación. Asimismo, si bien el límite superior teórico del sensor es de 65 536 lux, se observa un corte a los 54 612 lux.

- pH

Figura 18

Mediciones de pH

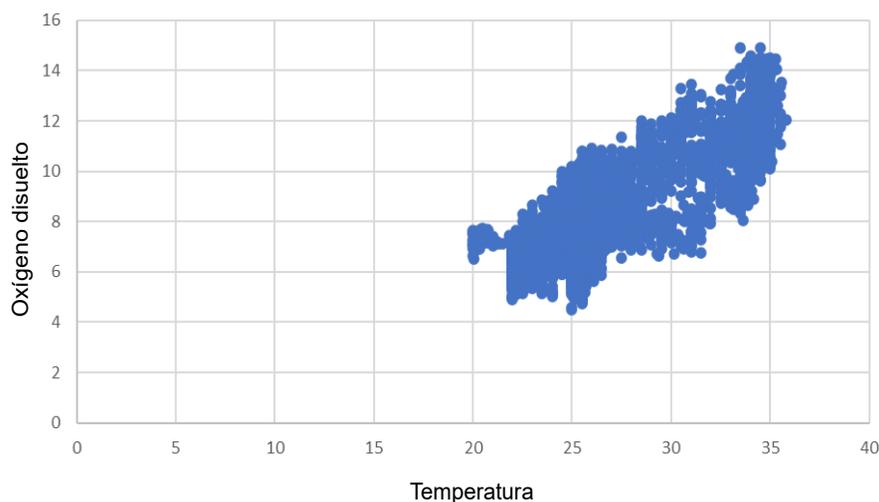


En la Figura 18 se observa que el sensor de pH muestra variaciones durante el primer día de medición. En los días posteriores, se mostraron datos estables hasta el fin del periodo de prueba. Estos datos se encontraron dentro del rango de 5,6 y 7,2 de pH.

Dentro de un ecosistema, es sabido que ciertas condiciones pueden afectar a otras; en este caso, se pudo observar que el oxígeno, la luminosidad y la temperatura aumentan durante el día y disminuyen durante la noche. La Figura 19 muestra una correlación de 0,81 entre la temperatura y el oxígeno disuelto, la cual, como una hipótesis, puede haberse dado a causa del proceso de fotosíntesis.

Figura 19

Relación entre temperatura y oxígeno disuelto



Con respecto a los *dashboards* generados con la data obtenida, se logró realizar los *dashboards* en el *software* Grafana y Amazon Quicksight. Sin embargo, debido a que en la zona no había disponibilidad de internet, la data fue representada únicamente en el *software* Grafana. A continuación, en las Figuras 20 y 21 se muestran algunos de los gráficos utilizados en los *dashboards* de Grafana.

Figura 20

Medidores de pH y oxígeno disuelto

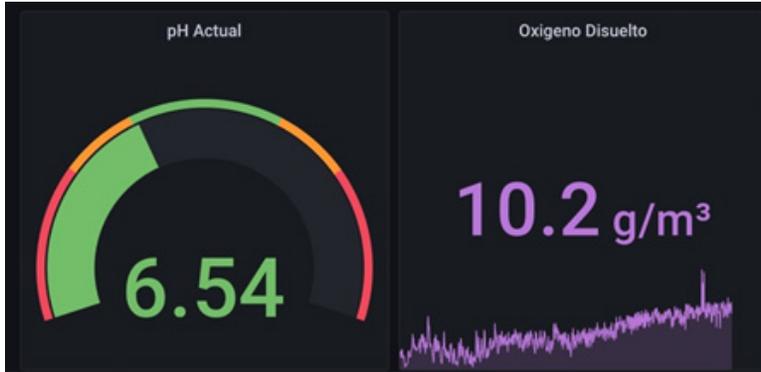


Figura 21

Temperatura del aire y del agua en el tiempo



6. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que el dispositivo desarrollado es capaz de monitorear las condiciones de la piscina en tiempo real en condiciones controladas y no controladas.

Para el despliegue se implementó una base de datos local que permitió al sistema trabajar sin internet de forma ininterrumpida. Por otro lado, se pudo aplicar un mecanismo que verifica si el paquete llega completo, y descarta los que llegan con errores; sin embargo, no reenvía los paquetes perdidos. Debido a ello, se

recomienda en trabajos futuros aplicar un sistema que realice esta verificación, así como contabilizar el número de paquetes perdidos y erróneos en distintas zonas y distancias.

Se han podido encontrar investigaciones, como la de Encinas et al. (2017), en las cuales la data es almacenada de forma local para luego ser replicada en la nube; sin embargo, también se tienen artículos que únicamente utilizan una base de datos en la nube (Shi et al., 2018). Sin embargo, el INEI (2021) señala que en las áreas rurales del territorio peruano únicamente el 34,4 % hace uso de internet, por lo que utilizar una base de datos local y replicar los datos en la nube, como lo hicieron Encinas et al. (2017), es lo más adecuado para la investigación.

Por otro lado, los resultados obtenidos de la temperatura del ambiente, la temperatura del agua y la luminosidad presentan valores que se encuentran relacionados con el comportamiento del clima en las horas y la ubicación seleccionada. Asimismo, para evitar distorsión en el registro de temperatura, Weather Works (2020) recomienda tomar mediciones de temperatura fuera de la luz solar, ya que se desea medir la temperatura del aire, mas no la temperatura a la cual el sol puede calentar el sensor. Debido a ello, en el despliegue, se colocó el sensor de temperatura por debajo del panel solar, ya que este le proporciona sombra y evita el error mencionado.

Durante la experimentación, se observó una tendencia relacionada con los efectos de la generación de oxígeno producida por fotosíntesis, mencionados por Hoganson y Babcock (1997), quienes sostienen que en horas con mayor luminosidad las algas del agua generan mayor cantidad de oxígeno, mientras que en la noche es consumido por los peces en el agua, lo que reduce la saturación de este gas.

Finalmente, el sensor de pH muestra un comportamiento bastante estable; sin embargo, se observaron picos o variaciones de forma agresiva. Estas variaciones pudieron ser causadas por un movimiento o golpe en el sensor, ya sea de algún pez en el agua, o por variaciones de voltaje. Cabe mencionar que estas son algunas hipótesis, y dicha variación pudo haberse generado por alguna otra variable.

7. CONCLUSIONES

El sistema fue capaz de capturar las condiciones ambientales dentro y fuera del agua a través de sensores conectados a un microcontrolador, cuya información fue luego enviada vía la red LoRa a un *gateway*. Este capturaba, almacenaba, presentaba reportes y generaba un respaldo casi en tiempo real en una base de datos PostgreSQL alojada en AWS.

Los sensores utilizados en la investigación son capaces de medir las condiciones ambientales de forma continua; sin embargo, sería conveniente que el sensor de luminosidad tenga un mayor rango para medir los picos correctamente. Por otro lado, se concluye que es necesario contar con una base de datos local que funcione como *buffer* en condiciones de baja e inestable conectividad. Aunque la red LoRa resulta bastante eficiente para la comunicación en zonas rurales, es común que ciertos paquetes lleguen incompletos o con errores en la transmisión, por lo que, a pesar de realizar una operación de *checksum*, se recomienda aplicar un método de comunicación bidireccional que permita reenviar paquetes en caso de error. De igual forma, es esencial contar con la facultad de ver los reportes sin conexión a internet, ya que esta es inestable y puede ocasionar problemas de forma recurrente.

Para trabajos futuros, se recomienda a los investigadores incrementar el periodo de medición a una cosecha (alrededor de cuatro meses). Por otro lado, al contar con un dispositivo capaz de medir las condiciones ambientales de un ambiente de producción acuícola las 24 horas del día, sería interesante analizar el desempeño de modelos de *machine learning* para establecer horarios de alimentación sobre la base de las condiciones ambientales actuales, y no en tablas de alimentación preestablecidas. De esta manera, se podría aprovechar más el alimento y ahorrar recursos productivos.

Finalmente, el sistema desarrollado brinda la facilidad a los productores de mantener un control constante de las condiciones de su producción de forma local y remota, así como almacenar su información para un posterior análisis que maximice sus herramientas para la toma de decisiones.

REFERENCIAS

- Abbink, W., Blanco Garcia, A., Roques, J. A. C., Partridge, G. J., Kloet, K., & Schneider, O. (2012). The effect of temperature and pH on the growth and physiological response of juvenile yellowtail kingfish *Seriola lalandi* in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 330-333, 130-135. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.043>
- Ai-Thinker. (2017). *Ra-02 LoRa Product Specification V1.1*. https://docs.ai-thinker.com/_media/lora/docs/c048ps01a1_ra-02_product_specification_v1.1.pdf
- Arduino. (s. f.). *Arduino Nano | Arduino Official Store*. *Arduino.cc*. Recuperado el 10 de mayo del 2021, de <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>
- Banco Central de Reserva del Perú. (2020). *Series trimestrales*. <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/trimestrales/pbi-millones-de-soles-constantes-de-2007>

- Blanchon, B. (2021). *JSON library for Arduino and embedded C++*. Simple and efficient. GitHub. <https://github.com/bblanchon/ArduinoJson>
- Bormann, M. E. C., & Keranen, A. (2014). *Terminology for constrained-node networks*. Ietf.org. <https://tools.ietf.org/html/rfc7228#section-4>
- Burton, M. (2021). *Arduino plug and go library for the Maxim (previously Dallas) DS18B20 (and similar) temperature ICs*. GitHub. <https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library>
- Campbell, J. W. (1973). Nitrogen excretion. En C. L. Prosser (Ed.), *Comparative animal physiology* (pp. 279-316). W. B. Saunders Company.
- Dorsemaine, B., Gaulier, J.-P., Wary, J.-P., Kheir, N., & Urien, P. (2015). Internet of Things: A definition & taxonomy. En *2015 9th International Conference on next Generation Mobile Applications, Services and Technologies* (pp. 72-77). <https://doi.org/10.1109/ngmast.2015.71>
- Encinas, C., Ruiz, E., Cortez, J., & Espinoza, A. (2017). Design and implementation of a distributed IoT system for the monitoring of water quality in aquaculture. En *2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)* (pp. 1-7). <https://doi.org/10.1109/wts.2017.7943540>
- Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero. (2004). *Manual de cultivo de tilapia*. http://www2.produce.gob.pe/RepositorioAPS/3/jer/ACUISUBMENU4/manual_tilapia.pdf
- Grados, B., & Bedon, H. (2020). Software components of an IoT monitoring platform in Google Cloud Platform: A descriptive research and an architectural proposal. En M. Botto-Tobar, M. Zambrano Vizueté, P. Torres-Carrión, S. Montes León, G. Pizarro Vásquez & B. Durakovic (Eds.), *Applied technologies. ICAT 2019. Communications in computer and information science* (vol. 1193, pp. 153-167). https://doi.org/10.1007/978-3-030-42517-3_12
- Hoganson, C. W., & Babcock, G. T. (1997). A metalloradical mechanism for the generation of oxygen from water in photosynthesis. *Science*, 277(5334), 1953-1956. <https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1953>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Producto bruto interno trimestral* [Informe técnico]. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin_pbi_trimestral_iit_2020.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2021). *Estadísticas de las tecnologías de información y comunicación en hogares* [Informe técnico]. <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/02-informe-tecnico-tic-i-trimestre-2021.pdf>

- Jawad, H., Nordin, R., Gharghan, S., Jawad, A., & Ismail, M. (2017). Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, 17(8), 1781. <https://doi.org/10.3390/s17081781>
- Kang, M.-S., Jung, Y.-G., & Jang, D.-H. (2017). A study on the search of optimal aquaculture farm condition based on machine learning. *The Journal of the Institute of Internet Broadcasting and Communication*, 17(2), 135-140. <https://doi.org/10.7236/jiibc.2017.17.2.135>
- Kramer, D. L. (1987). Dissolved oxygen and fish behavior. *Environmental Biology of Fishes*, 18(2), 81-92. <https://doi.org/10.1007/bf00002597>
- Laws, C. (2021, 17 de enero). *An Arduino library for the digital light sensor breakout boards containing the BH1750FVIIC*. GitHub. <https://github.com/claws/BH1750>
- Manahan, S. E. (2000). *Environmental chemistry* (7.ª ed.). Lewis Publishers.
- Ministerio de la Producción. (2018). *Sistema Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura. Fundamentos y propuesta 2017-2022*. <https://nipa.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/PESCA-Y-ACUICULTURA-3-1.pdf>
- Mistry, S. (2021). *An Arduino library for sending and receiving data using LoRa radios*. GitHub. <https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1988). *Rural aquaculture: Overview and framework for country reviews*. <http://www.fao.org/3/x6941e/x6941e04.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción*. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
- Raj, A. (2019, 7 de mayo). *LoRa with Raspberry Pi – Peer to Peer Communication with Arduino*. CircuitDigest. <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/raspberry-pi-with-lora-peer-to-peer-communication-with-arduino>
- Raju, K. R. S. R., & Varma, G. H. K. (2017). Knowledge based real time monitoring system for aquaculture using IoT. En *2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)* (pp. 318-321). <https://doi.org/10.1109/iacc.2017.0075>
- Rayas, A., & Salam, S. (2016). The things in IoT: Sensors and actuators. En *Internet of Things from hype to reality* (pp. 57-77). https://doi.org/10.1007/978-3-319-44860-2_3
- Ríos Julcapoma, M., & Yauri Rodríguez, R. (2017). *Internet de las cosas en el monitoreo de la calidad del agua para acuicultura en la Amazonía*. Instituto de investigaciones de la Amazonía Peruana; Universidad Nacional de Ingeniería.

- Salim, T. I., Haiyunnisa, T., & Alam, H. S. (2016). Design and implementation of water quality monitoring for eel fish aquaculture. En *2016 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)* (pp. 208-213). <https://doi.org/10.1109/isesd.2016.7886720>
- Sehrawat, D., & Gill, N. S. (2019). Smart sensors: Analysis of different types of IoT sensors. En *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)* (pp. 523-528). <https://doi.org/10.1109/icoei.2019.8862778>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *Promedio de temperatura normal para Pucallpa*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-detalle-turistico&localidad=0024>
- Shi, B., Sreeram, V., Zhao, D., Duan, S., & Jiang, J. (2018). A wireless sensor network-based monitoring system for freshwater fishpond aquaculture. *Biosystems Engineering*, *172*, 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.05.016>
- Studd, J., Pollard T., James, R., Trewitt, G., Dangel, J., Lovato, G., Stoffregen, P., Roberts, S., Sikken, B., Tillotson, M., Butcher, K., Clark, R., & Nystrom, L. (2019). *Library for Dallas/Maxim 1-Wire Chips*. GitHub. <https://github.com/PaulStoffregen/OneWire>
- Subasinghe, R. P. (2005). Epidemiological approach to aquatic animal health management: Opportunities and challenges for developing countries to increase aquatic production through aquaculture. *Preventive Veterinary Medicine*, *67*(2-3), 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2004.11.004>
- The Raspberry Pi Foundation. (2021). *Raspberry Pi 4 Model B specifications – Raspberry Pi*. Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>
- Weather Works. (2020, 3 de septiembre). *How to measure temperature correctly*. <https://weatherworksinc.com/news/temperature-measurement>
- Yim, D., Chung, J., Cho, Y., Song, H., Jin, D., Kim, S., Ko, S., Smith, A., & Riegsecker, A. (2018). An experimental LoRa performance evaluation in tree farm. En *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)* (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1109/sas.2018.8336764>
- Zhu, X., Li, D., He, D., Wang, J., Ma, D., & Li, F. (2010). A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *71*, S3-S9. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.10.004>