



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

Facultad de Ingeniería  
y Ciencias  
Ingeniería Electrónica

Diseño e implementación de un sistema predictivo de calidad del agua  
para piscicultura en Colombia, basado en tecnología IoT y aprendizaje  
automático

*Autores:*

Diego Alejandro Álvarez Bermúdez  
Kamilo Yani Vam Burbano Rincón

*Director:*

Dr. Alexánder Martínez Álvarez

*Codirector:*

Dr. Manuel Vicente Valencia Díaz

Pontificia Universidad Javeriana Cali  
Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Ingeniería Electrónica  
Proyecto de grado  
13 de enero de 2025

Santiago de Cali, 13 de enero de 2025

Señores:

**Pontificia Universidad Javeriana de Cali**

PhD. Luis Eduardo Tobón

Director Carrera de Ingeniería Electrónica

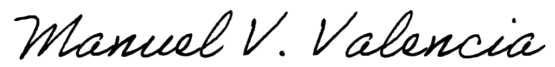
Cordial Saludo.

Nos permitimos informar que hemos revisado el trabajo de grado “Diseño e implementación de un sistema predictivo de calidad del agua para piscicultura en Colombia, basado en tecnología IoT y aprendizaje automático.” presentado por los estudiantes Kamilo Yani Vam Burbano Rincón y Diego Alejandro Álvarez Bermúdez, para optar por el título de Ingenieros Electrónicos, encontrando que el trabajo reúne los requisitos que permiten continuar con el trámite de evaluación y sustentación de su trabajo de grado.

Atentamente,



Dr. Alexander Martínez Álvarez



Dr. Manuel Vicente Valencia Díaz



Santiago de Cali, 13 de enero de 2025

Señores:

**Pontificia Universidad Javeriana de Cali**

PhD. Luis Eduardo Tobón

Director Carrera de Ingeniería Electrónica

Cordial Saludo.

Nos permitimos presentar a consideración el trabajo de grado “Diseño e implementación de un sistema predictivo de calidad del agua para piscicultura en Colombia, basado en tecnología IoT y aprendizaje automático” con el fin de cumplir con los requisitos exigidos por la universidad para optar por el título de Ingenieros Electrónicos.

Agradecemos de antemano su atención prestada.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink that reads 'yani'.

---

Kamilo Yani Vam Burbano Rincón  
Código: 8944067

A handwritten signature in black ink that reads 'Diego'.

---

Diego Alejandro Álvarez Bermúdez  
Código: 8918715

# Dedicatorias

Este trabajo de grado está dedicado en primer lugar a Dios, quien ha iluminado mi camino y me ha dado la fortaleza para avanzar. A mis padres, por su apoyo inquebrantable en todo momento. A mis tíos, Luz y Luis, por su constante respaldo. A mi pareja, quien ha estado a mi lado en este recorrido y ha sido un apoyo incondicional. A mi hermano, cuya compañía a lo largo de la vida ha sido invaluable.

- Kamilo -

A mi familia, por su amor incondicional y apoyo constante en cada etapa de mi vida. A mis profesores, por su guía y sabiduría, que han sido fundamentales en mi formación académica y profesional. A mis compañeros de clase, con quienes compartí innumerables horas de estudio y trabajo, forjando amistades y aprendiendo juntos. Y a mi compañero de proyecto, por su dedicación, colaboración y esfuerzo compartido en este importante camino.

- Diego -

# Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que fueron una parte fundamental de este viaje académico y personal. A mis queridos compañeros, cuya amistad y apoyo fueron un pilar esencial durante estos años de estudio. Compartimos no solo conocimientos, sino también risas, desafíos y alegrías, y eso hizo que este viaje fuera inolvidable. A mis profesores, a quienes expreso gratitud por su dedicación, sabiduría y paciencia. Sus enseñanzas han sido fundamentales para mi formación académica y personal. A mi familia, en especial a mis padres, hermano y demás familiares, por su apoyo incondicional a lo largo de esta travesía, a Don Carlos por su guía y orientación, siempre estuvieron ahí para alentarme y brindarme el amor necesario para superar obstáculos.

- Kamilo -

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, cuyo respaldo inquebrantable me ha permitido llegar hasta aquí. A los profesores, que con su dedicación y conocimiento han sido pilares esenciales en mi desarrollo académico. A mis compañeros de clase, por su camaradería y apoyo mutuo, que hicieron más llevadero el camino. Y especialmente a mi compañero de proyecto, por su compromiso y arduo trabajo, sin los cuales este proyecto no habría sido posible. Gracias a todos por ser parte de este viaje.

- Diego -

# Lista de abreviaturas

ML: Aprendizaje de máquina (Machine Learning)

IoT : El Internet de las cosas

TDS : Total de Sólidos Disueltos en el agua

CE: Conductividad del agua

PCB: Placa de circuito impreso (Printed Circuit Board)

MVC: Modelo-Vista-Controlador

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>12</b>
<b>Abstract</b>	<b>13</b>
<b>Introducción</b>	<b>14</b>
<b>1. Descripción del proyecto</b>	<b>15</b>
1.1. Línea de investigación . . . . .	15
1.1.1. Diagrama general producción piscícola . . . . .	15
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	16
1.2.1. Formulación . . . . .	17
1.2.2. Sistematización . . . . .	18
1.3. Justificación . . . . .	20
1.4. Objetivos . . . . .	22
1.4.1. Objetivo General . . . . .	22
1.4.2. Objetivos Específicos . . . . .	22
1.4.3. Áreas temáticas . . . . .	23
1.4.4. Trabajos relacionados . . . . .	23
1.4.5. Antecedentes . . . . .	24
<b>2. Identificación de las necesidades de los piscicultores</b>	<b>26</b>
2.1. Importancia del monitoreo en una producción piscícola . . . . .	26
2.2. Requisitos para la selección de la piscícola . . . . .	26
2.3. Necesidades identificadas de monitoreo en la piscícola . . . . .	29
2.3.1. Variables a medir . . . . .	30
2.4. Requisitos del sistema de monitoreo . . . . .	30
2.5. Conclusión del capítulo . . . . .	31
<b>3. Diseño del hardware y el software</b>	<b>32</b>
3.1. Diseño del sistema Hardware . . . . .	32
3.1.1. Diagrama de bloques del dispositivo . . . . .	32
3.1.2. Selección de componentes . . . . .	33
3.1.3. Alimentación del sistema . . . . .	36
3.1.4. Carcasas protectoras . . . . .	36
3.1.5. Protocolos de comunicación . . . . .	36
3.1.6. Diseño de PCB . . . . .	37
3.2. Diseño del software . . . . .	39
3.2.1. Diagrama de la plataforma web y estructura de las bases de datos . . . . .	40
3.2.2. Interfaz gráfica y elementos visuales . . . . .	41
3.3. Diseño de modelos predictivos . . . . .	45

3.4. Conclusión del capítulo . . . . .	49
<b>4. Implementación del hardware y el software</b>	<b>50</b>
4.1. Implementación del sistema hardware . . . . .	50
4.1.1. Programación, calibración y verificación de sensores. . . . .	51
4.1.2. Calibración de sensores . . . . .	52
4.1.2.1. Calibración sensor de pH . . . . .	53
4.1.2.2. Calibración sensor de conductividad y TDS . . . . .	56
4.1.2.3. Calibración sensor de temperatura del agua . . . . .	58
4.2. Implementación del software . . . . .	61
4.2.1. Protocolos de comunicación y tecnologías a utilizar . . . . .	61
4.2.2. Desarrollo del Backend . . . . .	62
4.2.3. Desarrollo del Frontend . . . . .	64
4.2.4. Alarmas del cultivo . . . . .	65
4.3. Despliegue en la nube - Amazon Web Service (AWS) . . . . .	66
4.4. Implementación de modelos predictivos . . . . .	71
4.5. Conclusión del capítulo . . . . .	75
<b>5. Pruebas y análisis de resultados</b>	<b>76</b>
<b>6. Análisis de costos</b>	<b>89</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>91</b>
<b>8. Trabajos Futuros</b>	<b>93</b>
<b>9. Anexos</b>	<b>97</b>
9.1. Selección de componentes . . . . .	97
9.2. Implementos utilizados . . . . .	104
9.3. Piscícolas visitadas . . . . .	107
9.4. Encuesta implementadas . . . . .	109
9.5. Gráficos de modelos de predicción . . . . .	127
9.5.1. Definiciones . . . . .	129
<b>Referencias</b>	<b>132</b>

## Índice de figuras

1.	Diagrama general producción piscícola . . . . .	15
2.	Diagrama de causa-efecto . . . . .	19
3.	Ubicación Piscicola San Mio . . . . .	28
4.	Piscicola San Mio . . . . .	29
5.	Diagrama general del sistema de monitoreo . . . . .	32
6.	Diagrama de bloques estación de medición . . . . .	33
7.	Diagrama esquemático . . . . .	38
8.	Vista superior, modelo 3D PCB . . . . .	39
9.	Diagrama de bloques de la plataforma web . . . . .	40
10.	Ventanas de conexión o registro para el usuario . . . . .	41
11.	Ejemplo de WireFrames para la interfaz de usuario. . . . .	43
12.	Diseño planteado de la plataforma web . . . . .	44
13.	PCB con componentes . . . . .	51
14.	Calibración de sensores . . . . .	59
15.	Prototipo de medición . . . . .	60
16.	Prototipo ubicado en el lago . . . . .	61
17.	Modelo de tablas en base de datos . . . . .	63
18.	Inicio de sesión . . . . .	64
19.	Página de visualización de mediciones . . . . .	65
20.	Alerta en plataforma web . . . . .	66
21.	Correo de alerta . . . . .	66
22.	Logo AWS, Java y Elastic Beanstalk, herramientas que se usaran para este despliegue. . . . .	67
23.	Captura de la consola de Elastic Beanstalk con las versiones desplegadas. . . . .	67
24.	Captura de la consola de Elastic Beanstalk con las versiones desplegadas. . . . .	68
25.	Configuración de la instancia RDS y sus parámetros. . . . .	68
26.	Arquitectura de la VPC con las subredes configuradas. . . . .	69
27.	Configuración del certificado SSL en Certificate Manager. . . . .	69
28.	Configuración de dominios en Route 53. . . . .	69
29.	Consola de Elastic Beanstalk con los modelos desplegados. . . . .	70
30.	Políticas IAM configuradas para los servicios. . . . .	71
31.	Información que retorna el metodo predecir . . . . .	72
32.	Modelos predictivos implementados en la interfaz web . . . . .	74
33.	Base de datos con información de los sensores . . . . .	78
34.	Visualización de datos en plataforma web diseñada . . . . .	79
35.	Comparación del valor medido de temperatura del agua vs valor predicho . . . . .	80
36.	Comparación del valor medido de pH vs valor predicho . . . . .	80
37.	Comparación del valor medido de TDS (Total de Solidos Disueltos) vs valor predicho . . . . .	81

38.	Capacitación al piscicultor sobre la plataforma desarrollada . . . . .	84
39.	Soluciones buffer de ph conocido . . . . .	104
40.	Muestras de agua de la piscicola . . . . .	105
41.	Instrumento Hanna HI9829 utilizado para calibrar los sensores . . . . .	106
42.	Piscicola de Candelaria . . . . .	107
43.	Piscicola de Candelaria . . . . .	108
44.	Piscicola de Jamundí . . . . .	109
45.	Comparación del valor medido de conductividad vs valor predicho . . . . .	127
46.	Comparación del valor medido de conductividad absoluta vs valor predicho	128

## Índice de tablas

1.	Sensores seleccionados . . . . .	34
2.	Características de placa de desarrollo escogida . . . . .	35
3.	Resultados del entrenamiento de modelos para la temperatura del agua . . .	47
4.	Resultados del entrenamiento de modelos para la conductividad del agua . .	47
5.	Resultados del entrenamiento de modelos para la conductividad absoluta . .	47
6.	Resultados del entrenamiento de modelos para TDS . . . . .	47
7.	Resultados del entrenamiento de modelos para pH . . . . .	48
8.	Hiperparámetros encontrados para las variables en el modelo de regresión de bosques aleatorios . . . . .	49
9.	Margen de error de los modelos de regresión de árboles de decisión . . . . .	49
10.	Especificaciones del medidor Hanna Instruments HI 9829 . . . . .	53
11.	Porcentaje de error para ecuación (3) . . . . .	54
12.	Porcentaje de error para ecuación (4) . . . . .	54
13.	Porcentaje de error para ecuación con tres puntos . . . . .	55
14.	Comparación de mediciones de conductividad de agua con medidor de referencia y sensor calibrado . . . . .	58
15.	Porcentaje de error temperatura del agua . . . . .	58
16.	Comparación de temperatura entre dispositivo diseñado y referencia . . . . .	76
17.	Comparación de pH entre dispositivo diseñado y referencia . . . . .	77
18.	Comparación de TDS entre dispositivo diseñado y referencia . . . . .	77
19.	Asertividad temperatura del agua . . . . .	81
20.	Asertividad pH . . . . .	82
21.	Asertividad TDS . . . . .	83
22.	Balance general de los resultados obtenidos . . . . .	86
23.	Tabla de recursos humanos y costos . . . . .	89
24.	Tabla de Componentes y Precios . . . . .	90
25.	Características sensores de pH . . . . .	97
26.	Características sensores de Temperatura . . . . .	98
27.	Características sensores de "TDS" total de solidos suspendidos . . . . .	99
28.	Comparación de características de placas de desarrollo . . . . .	100
29.	Matriz de selección sensor de pH . . . . .	101
30.	Matriz de selección sensor de temperatura . . . . .	102
31.	Matriz de selección sensor de TDS . . . . .	102
32.	Matriz de selección sistema embebido . . . . .	103
33.	Características de placa de desarrollo escogida . . . . .	129

## Resumen

La piscicultura en Colombia es crucial económica y socialmente. El control efectivo de las variables fisicoquímicas del agua es fundamental para su éxito. Este trabajo presenta el diseño, implementación y evaluación de un sistema IoT para monitorear estas variables en una piscicultura en Jamundí, Valle del Cauca. El sistema, que incluye hardware para medir temperatura del agua, pH y total de sólidos disueltos en el agua (TDS), transmite datos a una plataforma web cada 15 minutos. En el desarrollo del software de la plataforma web se empleó una arquitectura modelo-vista-controlador (MVC) con Java y Spring Boot, garantizando seguridad y usabilidad. Además, se aplicaron técnicas de machine learning para optimizar la gestión del agua, evaluando modelos como la regresión lineal, regresor de máquinas de soporte vectorial, regresor de k-vecinos más cercanos, regresor de árbol de decisión y regresor de bosque aleatorio. El modelo que obtuvo el menor MAE (Error absoluto medio) fue el regresor de árboles de decisión. En la plataforma web, los piscicultores pueden registrar las mediciones fisicoquímicas del agua de manera manual o utilizar el dispositivo diseñado para obtener las mediciones automáticamente. Las variables para las que se realizaron predicciones fueron la temperatura del agua, la conductividad del agua, los TDS y el pH. El sistema desarrollado permite a los operadores de pisciculturas acceder a datos actualizados en línea desde cualquier dispositivo con conexión a internet. Los datos recolectados se presentan de manera clara y comprensible mediante gráficos, facilitando su interpretación y análisis. Además, los modelos de aprendizaje automático implementados han demostrado ser efectivos en la predicción de la calidad del agua, lo que mejora significativamente la toma de decisiones y optimiza la gestión de mediciones en la piscícola.

## Abstract

Fish farming in Colombia is crucial both economically and socially. Effective control of the physicochemical variables of water is fundamental for its success. This work presents the design, implementation, and evaluation of an IoT system to monitor these variables in a fish farm in Jamundí, Valle del Cauca. The system, which includes hardware to measure water temperature, pH, and total dissolved solids in water (TDS), transmits data to a web platform every 15 minutes. In the development of the web platform software, a model-view-controller (MVC) architecture was used with Java and Spring Boot, ensuring security and usability. Additionally, machine learning techniques were applied to optimize water management, evaluating models such as linear regression, support vector machine regressor, k-nearest neighbors regressor, decision tree regressor, and random forest regressor. The model that obtained the lowest MAE (Mean Absolute Error) was the decision tree regressor. On the web platform, fish farmers can record water physicochemical measurements manually or use the designed device to obtain measurements automatically. The variables for which predictions were made were water temperature, water conductivity, TDS, and pH. The developed system allows fish farm operators to access updated data online from any device with an internet connection. The collected data is presented clearly and comprehensibly through graphs, facilitating its interpretation and analysis. Furthermore, the implemented machine learning models have proven effective in predicting water quality, which significantly improves decision-making and optimizes measurement management in the fish farm.

## Introducción

La piscicultura en Colombia representa una actividad crucial tanto desde el punto de vista económico como social, siendo una fuente significativa de empleo y suministro de alimentos de alta calidad nutricional para la población. La sostenibilidad y eficiencia de este proceso están estrechamente ligadas al manejo adecuado de las variables fisicoquímicas del agua en los sistemas de producción acuícola. Estas variables, como la temperatura, el pH y los sólidos disueltos totales (TDS), son críticas para el bienestar y el crecimiento óptimo de los peces que se cultivan.

La falta de un sistema eficiente para el monitoreo continuo y en línea de estas variables puede conllevar a pérdidas significativas debido a la falta de información precisa y oportuna. Estas pérdidas no solo afectan la productividad de las piscifactorías, sino que también tienen impactos negativos en el medio ambiente acuático circundante.

En respuesta a esta problemática, el presente proyecto se enfoca en el diseño, implementación y evaluación de un sistema IoT (Internet de las Cosas) destinado al monitoreo automatizado de variables fisicoquímicas en piscicultura. Este sistema no solo busca mejorar la eficiencia operativa de las pisciculturas al permitir tomar decisiones basadas en datos, sino también contribuir a la sostenibilidad ambiental mediante la optimización del uso de recursos hídricos y la reducción de impactos adversos.

El estudio se estructura en tres etapas principales: el desarrollo del hardware específico para las necesidades identificadas, la implementación de un software robusto basado en tecnología web para la visualización y análisis de datos, y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning) para la predicción y optimización de variables críticas del agua.

Siguiendo este enfoque, se espera poder contribuir al sector y ofrecer una solución que ayude a los piscicultores de Colombia a monitorear sus cultivos.

# 1 Descripción del proyecto

## 1.1 Línea de investigación

Sistemas de muestreo de variables físico - químicas en piscicultura.

### 1.1.1 Diagrama general producción piscícola

El siguiente diagrama describe el funcionamiento general de una piscícola, el cual puede variar dependiendo de las especies de peces a cultivar, o la ubicación geográfica entre otros.



Figura 1: Diagrama general producción piscícola

1. Selección de especies: El primer paso es la selección de las especies que se van a criar. Esto puede basarse en factores como la demanda del mercado, la disponibilidad de alimentos y la capacidad de adaptación de la especie a las condiciones locales.
2. Diseño y construcción de la piscicultura: Se diseña y construye la infraestructura necesaria para criar las especies seleccionadas. Esto puede incluir estanques de cultivo, sistemas de suministro de agua y sistemas de filtración.

3. Adquisición de alevines: Se adquieren los alevines, o crías jóvenes, de las especies seleccionadas para criar. Estos alevines se trasladan a la piscicultura y se colocan en los estanques de cultivo.
4. Alimentación: Los peces se alimentan con una dieta adecuada para su especie y etapa de desarrollo. La alimentación puede ser proporcionada a través de sistemas de alimentación automáticos o manuales
5. Monitoreo de la calidad del agua: Se monitorea la calidad del agua en los estanques de cultivo para asegurar que se mantenga dentro de los parámetros óptimos para la especie criada. Esto incluye el control de la temperatura del agua, el pH, la salinidad y la concentración de oxígeno disuelto, se ajustan los sistemas de aireación y ventilación según sea necesario.
6. Control de enfermedades: Los peces pueden ser vulnerables a enfermedades y parásitos, por lo que se monitorean y controlan para mantener una buena salud de los peces. Esto puede incluir el uso de productos químicos, técnicas de control biológico y prácticas de gestión adecuadas.
7. Cosecha: Cuando los peces han alcanzado su tamaño de venta, se cosechan y se transportan a los mercados o procesadores de alimentos.
8. Mantenimiento y limpieza: Se realizan tareas de mantenimiento y limpieza regularmente para asegurar que la infraestructura y el equipo estén en buen estado de funcionamiento.

## 1.2 Planteamiento del problema

La piscicultura y la acuicultura en Colombia se han convertido en dos importantes sectores de la producción de alimentos para el consumo nacional y de exportación y, a su vez, en dos actores que aumentan la economía local y contribuyen a superar la pobreza en las zonas rurales. En Colombia se aplica la piscicultura en los cultivos de tilapia roja “*Oreochromis SP*”, Cachama “*Colossoma macropomum*” y Trucha arcoíris “*Oncorhynchus mykiss*”, se ha probado que son especies que resisten a enfermedades, pueden ser manipulados genéticamente, resisten a condiciones ambientales adversas, entre otras características ventajosas [1]

Los factores que influyen en el crecimiento de la tilapia roja, cachama y trucha arcoíris están estrechamente relacionados con las buenas prácticas del manejo de estanques y/o criaderos. Dentro de estos se encuentran las condiciones fisicoquímicas de la calidad del agua, por esto se hace indispensable mantener estas condiciones dentro de los rangos admitidos por las especies, ya que las condiciones fisicoquímicas contribuyen con el crecimiento y desarrollo del pez y de esto depende del éxito o fracaso del cultivo [2]

### 1.2.1 Formulación

Colombia está actualmente implementando una política pública orientada hacia conseguir una seguridad alimentaria para su población [3], entre otras cosas porque se busca alcanzar las metas propuestas por los objetivos de desarrollo sostenible, en particular el objetivo número dos, Hambre cero: “Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible” [4]. Esa seguridad alimentaria implica un balance adecuado de alimentación de la población y entre ese balance se requiere tener una cierta proporción de hidratos de carbono, proteínas y verduras las cuales se deben incluir en cada una de las comidas que se ingieren [5], teniendo en cuenta que una fuente importante de proteína puede ser el pescado.

La producción de proteína de pescado posee dos componentes fundamentales, la primera es la pesca y la segunda es la acuicultura. La primera es captura y la segunda es cultivo [6]. Según su definición “La acuicultura es la encargada de la cría de organismos acuáticos, incluyendo peces, moluscos, crustáceos y plantas acuáticas, que implica la intervención del hombre en el proceso de cría para aumentar la producción, en operaciones como la siembra, la alimentación, la protección de los depredadores”[7], La piscicultura como parte de la acuicultura tiene como objetivo la reproducción y crecimiento controlado de animales acuáticos, bajo condiciones específicas, el objetivo de este trabajo se va a referir más a la cría de peces, por tanto vamos a referirnos más a la piscicultura que a la acuicultura.

Para el caso de la piscicultura, Colombia ha tenido un crecimiento anual cercano al 10 %, produciendo en 2019 cerca de 200 toneladas, y un crecimiento en la generación de empleo del 7 % (IAC, 2020). A nivel regional, el Huila es uno de los departamentos de mayor producción de peces, específicamente la especie tilapia y trucha, caracterizándose principalmente por la calidad del producto y siendo este sector un importante generador de empleos, además alcanza un aporte a la producción nacional de peces con un 46 %.

En el proceso de producción se ven reflejadas pérdidas económicas, cuyo promedio normal de pérdida está alrededor del 30 %. Entre los problemas más comunes para los piscicultores están el elevado gasto hídrico de la producción [6] y el alto índice de mortalidad, ya que alrededor del 23 % de los huevos no llegan a la etapa de engorde [8].

En varios departamentos de Colombia, se requiere fortalecer las buenas prácticas de producción en este campo, pudiendo utilizar recursos tecnológicos para hacer un aporte importante al fortalecimiento de estas prácticas.

Se observa una posibilidad de mejorar esas prácticas a través de la recopilación y gestión de información que permita tomar decisiones oportunas, que complementen los conocimientos ancestrales, tanto empíricos como teóricos, que tienen los piscicultores y potenciar este conocimiento de manera que se pueda fortalecer las buenas prácticas de producción.

Mediante el uso de tecnologías de IoT “Internet of Things”, se puede contribuir a mejorar estas prácticas de producción, haciendo uso de sensores interconectados que permitan intercambiar datos con otros dispositivos y sistemas a través de internet [9], permitiendo estar al tanto de la información de la calidad del agua en tiempo real, procesando los datos y realizando predicciones sobre variables fisicoquímicas del cultivo de peces con algoritmos de Machine Learning [10].

Con base al planteamiento del punto 1.2, se desglosan dos principales preguntas que dividen el problema, estas se muestran a continuación:

- ¿Cómo monitorear, transmitir y alertar de manera eficiente y segura parámetros fisicoquímicos del agua en la piscicultura?
- ¿Cómo fortalecer las buenas prácticas de producción piscícola empleando técnicas de IoT y Machine Learning?

### **1.2.2 Sistematización**

Con el objetivo de decantar el problema general planteado en la sección 1.2., se desarrolla un árbol de problemas o diagrama de causa y efecto donde se analizan las causas del problema y los efectos que este produce.

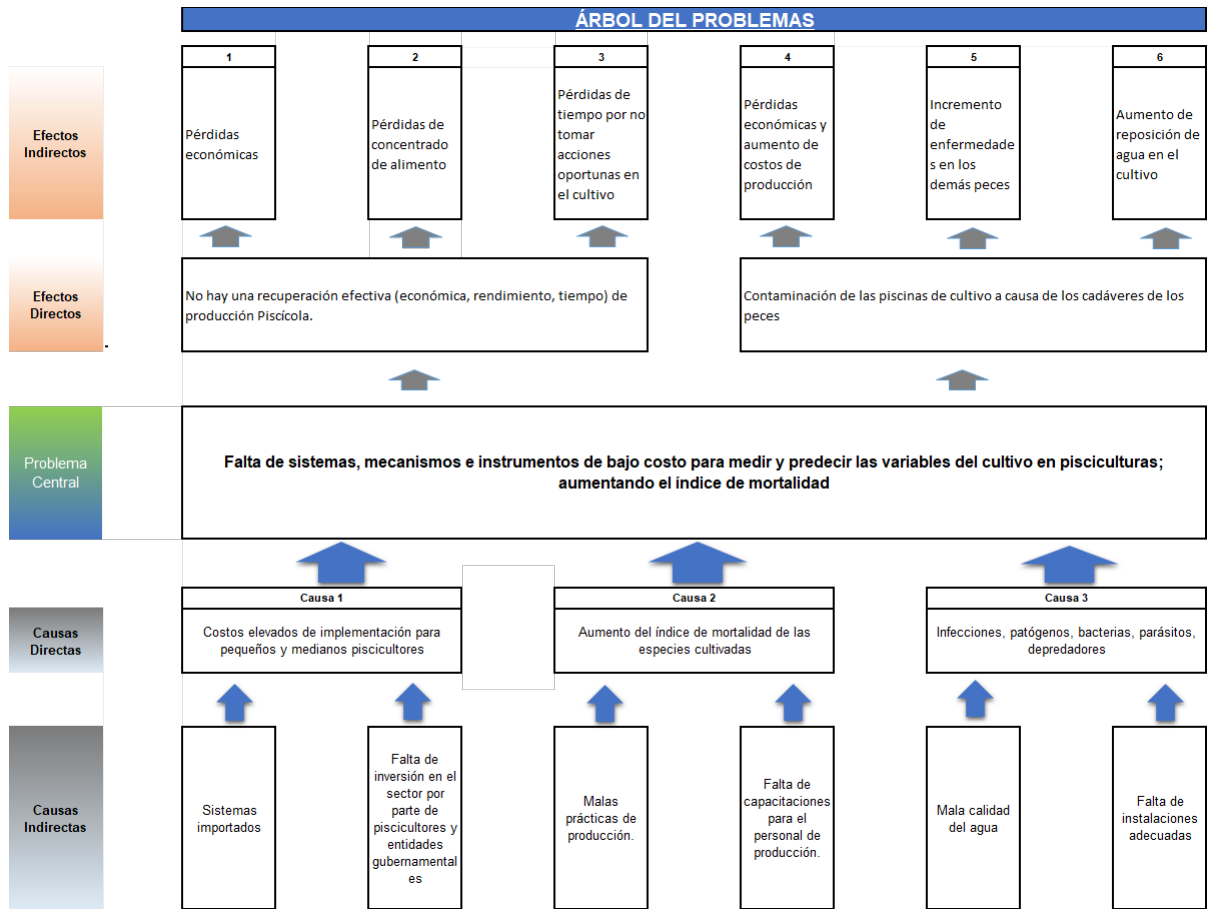


Figura 2: Diagrama de causa-efecto

### 1.3 Justificación

La producción pesquera en Colombia, que abarca tanto la pesca de captura como la acuicultura, alcanzó en 2022 un total de 319.104.6 toneladas, desarrollándose principalmente en tres frentes de actividades específicas: pesca marina, pesca continental y acuicultura. La pesca marina representó el 21,8 % de la producción total, aportando una parte significativa pero menor en comparación con otros sectores. La pesca continental contribuyó con el 14 % de la producción, centrada principalmente en los cuerpos de agua dulce del país. Por su parte, la acuicultura dominó el sector pesquero con un 64,2 % de la producción total, consolidándose como la actividad más relevante. Dentro de la acuicultura, la piscicultura es la principal actividad, destacándose en la zona continental. En 2022, el 97,58 % de la producción acuícola provino de la cría de diversas especies de peces como tilapias, una de las especies más cultivadas debido a su alta demanda y adaptabilidad; truchas, criadas principalmente en regiones con aguas frías y corrientes rápidas; cachamas, conocidas por su carne de buena calidad; y otras especies nativas que contribuyen a la diversidad de la producción piscícola[11].

Debido a que los productores piscícolas tradicionales siguen usando métodos convencionales, aún no han adoptado tecnologías avanzadas para monitorear la calidad de los productos derivados de los peces ni para gestionar datos cruciales sobre la calidad del agua, el crecimiento y la reproducción. Esto implica que los pequeños productores no tienen acceso a estas tecnologías esenciales que podrían mejorar tanto la productividad como la trazabilidad de sus productos a nivel local y regional. Además, estas tecnologías son clave para alcanzar los estándares de calidad necesarios para exportar carne de pescado[12].

A pesar de que la producción ha experimentado un notable incremento en comparación con años anteriores, Colombia continúa rezagada a nivel mundial en el campo de la piscicultura. Esta actividad se concentra principalmente en solo 7 de los 32 departamentos del país, entre los cuales Huila sobresale como el principal productor[13].

La brecha tecnológica es uno de los factores clave que contribuyen a este rezago. Mientras que en otros países la acuicultura ha avanzado hacia una dirección más intensiva e inteligente, impulsada por la automatización y las tecnologías inteligentes, en Colombia estos desarrollos aún no se han implementado ampliamente. Según [14], los desarrollos en automatización y tecnología inteligente han transformado la acuicultura a nivel mundial. China lidera este ámbito con 144 publicaciones sobre la aplicación de inteligencia artificial en acuicultura, correlacionándose con su posición como mayor productor mundial. Otros países también han hecho contribuciones significativas, como Estados Unidos con 41 publicaciones, Noruega con 24, Australia con 21 y Corea del Sur con 20 [15].

Esta desigualdad tecnológica se refleja en la capacidad productiva y eficiencia de la acuicultura en estos países, permitiéndoles mantener un liderazgo global en producción. En

contraste, Colombia necesita adoptar estas tecnologías avanzadas para mejorar su competitividad y cerrar la brecha con las naciones líderes. La inversión en investigación y desarrollo, junto con la implementación de sistemas de automatización, internet de las cosas iot e inteligencia artificial, puede ser crucial para impulsar el crecimiento sostenible de la acuicultura en Colombia y posicionarla mejor en el escenario internacional.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Desarrollar un prototipo electrónico de monitoreo de variables fisicoquímicas que favorezca las buenas prácticas de producción piscícola.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Detectar las necesidades de las pisciculturas asociadas al proyecto, en cuanto al monitoreo y el análisis de los datos sobre la calidad del agua usada en la producción piscícola.
- Diseñar un sistema electrónico de medición que permita obtener datos sobre calidad del agua del cultivo.
- Implementar el prototipo del sistema electrónico diseñado.
- Conectar el prototipo a una plataforma web y visualizar la información recolectada.
- Implementar algoritmos de Machine Learning con los datos recolectados, con el fin de favorecer la toma de decisiones en el proceso de producción (Predicción).
- Validar los resultados obtenidos en relación con los requerimientos establecidos.

### 1.4.3 Áreas temáticas

- Electrónica - Instrumentación
- Algoritmos matemáticos de aprendizaje automático.
- Inteligencia computacional y artificial, Aprendizaje automático.
- Acuicultura inteligente
- Internet de las cosas IoT

### 1.4.4 Trabajos relacionados

En los procesos de piscicultura actual se realizan mediciones de la calidad del agua presentes en los estanques de engorde y de cría, así como mediciones en diferentes zonas del cultivo por un operario cada cierto tiempo. Es por esto que la medición de la calidad del agua en línea se hace más determinante, para reducir los costos y mejorar la precisión de los análisis de la calidad del agua en los estanques de engorde. De igual manera se utilizan algoritmos predictivos sobre parámetros fisicoquímicos del agua utilizando Machine Learning. Algunas investigaciones se han puesto a la tarea de implementar prácticas que permiten la medición de la calidad del agua de manera no convencional, que permiten la medición en diferentes estanques de cultivo.

Basándonos en estudios realizados por diversos autores en distintos años, se han identificado algoritmos potencialmente satisfactorios para la base de datos recopilada por el prototipo de medición desarrollado. Para el diseño del dispositivo de IoT, revisamos estudios relevantes para determinar qué dispositivos y sensores fueron exitosos en sus investigaciones. Nos apoyamos en estos hallazgos para desarrollar un prototipo similar, incorporando las características que resultaron efectivas en sus respectivos estudios. Los estudios consultados para la realización del presente proyecto de grado fueron:

En 2015, Iván Darío López Gómez, en su trabajo sobre técnicas de inteligencia computacional para la predicción adaptativa de la calidad del agua, utilizó algoritmos aplicados a variables fisicoquímicas [16].

En 2021, Andrés Felipe Zambrano, Luis Felipe Giraldo, Julián Quimbayo, Brayan Medina y Eduardo Castillo propusieron técnicas de aprendizaje automático para modelar la dinámica de variables como oxígeno disuelto, pH y temperatura [17].

En 2022, Tingting Li, Jian Lu, Jun Wu, Zhenhua Zhang y Liwei Chen utilizaron redes neuronales y máquinas de vectores de soporte para predecir parámetros clave de calidad del agua en sistemas acuícolas industriales como oxígeno disuelto, pH, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N y NO<sub>2</sub>-N [18].

En 2021, Tito Manuel Piamba-Mamian y colaboradores implementaron un sistema de monitoreo utilizando IoT para la trucha arcoíris, mediante la vigilancia en tiempo real de variables como temperatura, oxígeno disuelto y pH [19].

En 2021, William Geovanny Valencia Astudillo y César Emmanuel Delgado Tapia crearon un prototipo de IoT para monitorear la calidad del agua en estanques de piscicultura en Ecuador[20].

En 2021, Al-Akhir Nayan y colaboradores desarrollaron un sistema basado en IoT para predecir la calidad del agua en cultivos piscícolas con tecnología Biofloc. Utiliza sensores para recopilar datos y modelos de aprendizaje automático para la toma de decisiones [21].

Basándonos en lo anterior, se analizaron los datos de temperatura del agua, TDS y pH. Se evaluaron algoritmos como regresión lineal, árboles de decisión y bosques aleatorios, seleccionando aquel que mejor se ajustara a la solución según las métricas establecidas.

En cuanto al dispositivo IoT, los datos captados por los sensores se envían a una plataforma intermedia llamada ThingSpeak, donde posteriormente se almacenan en la base de datos desarrollada.

#### **1.4.5 Antecedentes**

En el contexto de las soluciones existentes basadas en sistemas IoT y Machine Learning, es importante analizar algunas de las alternativas más destacadas en el mercado actual para el monitoreo de la calidad del agua en acuicultura. Dos de estas soluciones, Medusa [22] y Deepco [23], ofrecen sistemas de monitoreo avanzados pero con costos considerables. A continuación, se presenta un análisis detallado de estas alternativas, lo que nos permitirá contextualizar mejor nuestra propuesta y comprender el estado actual de la tecnología en este campo.

Medusa es una solución integral para el monitoreo de la calidad del agua en acuicultura, con un costo aproximado de 24,550,530 COP, más una mensualidad de 349 USD para acceder a la información y funcionalidades completas[22]. Como características principales cuenta con:

- Monitoreo en tiempo real de múltiples parámetros del agua: pH, temperatura, salinidad, conductividad, redox, turbidez, amonio.
- Interfaz de usuario intuitiva y accesible desde dispositivos móviles.

- Alertas automáticas cuando los parámetros están fuera de rango.
- Análisis de datos históricos y generación de informes.
- Gestión de alimentación: propone la cantidad exacta de alimento para cada unidad de producción, optimizando el uso del alimento.

Deepco ofrece una plataforma con dispositivo de monitoreo para la acuicultura, con un precio aproximado de 20,309,110 COP [23].

- Monitoreo continuo de variables físico-químicas del agua durante largos períodos de tiempo, abarcando parámetros como: temperatura, profundidad, pH, oxígeno disuelto, turbidez.
- Transmisión en línea de la información capturada, permitiendo una supervisión inmediata de las condiciones del agua.
- Capacidad de instalar múltiples dispositivos (1, 2 o más de 3) en diferentes puntos bajo el agua dentro de las jaulas, ofreciendo una cobertura detallada y precisa.
- Flexibilidad en la instalación de dispositivos, lo que permite una amplia cobertura de las áreas de cultivo, asegurando que todas las zonas críticas sean monitoreadas adecuadamente.

## **2 Identificación de las necesidades de los piscicultores**

En el diagrama general de la producción piscícola 1, se pueden identificar varias etapas en el proceso donde pueden surgir problemas, pero el monitoreo de la calidad del agua destaca como uno de los más importantes. Dado que el agua es el medio vital en el que viven los peces, su calidad afecta todos los aspectos de la producción piscícola. Por lo tanto, seleccionar y enfocar esfuerzos en el monitoreo de la calidad del agua es fundamental para asegurar la salud de los peces y la eficiencia de la producción piscícola. A continuación, se presenta la metodología empleada para identificar las necesidades de los piscicultores, que aborda desde la importancia del monitoreo en una producción piscícola hasta las variables a medir en el proyecto.

### **2.1 Importancia del monitoreo en una producción piscícola**

La calidad del agua es un factor crítico en la producción piscícola, ya que afecta directamente la salud, el crecimiento y la supervivencia de los peces. Parámetros como el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto, los sólidos disueltos totales (TDS) y la concentración de amoníaco deben ser estrictamente controlados para asegurar un ambiente óptimo para los peces. Un desequilibrio en cualquiera de estos parámetros puede llevar a enfermedades, estrés y mortalidad en la población de peces, lo que resulta en pérdidas económicas significativas.

Además, un buen manejo de la calidad del agua contribuye a una producción más eficiente y sostenible, reduciendo la necesidad de tratamientos químicos y mejorando la calidad del producto final. Por lo tanto, el monitoreo continuo y preciso de la calidad del agua es esencial para el éxito de cualquier operación piscícola, con la implementación de un sistema de monitoreo efectivo no solo se protege la salud de los peces sino que también promueve prácticas acuícolas responsables y sostenibles.

### **2.2 Requisitos para la selección de la piscícola**

Se realizaron reuniones con piscicultores de Jamundí y Candelaria, municipios del Departamento del Valle, Colombia, contactados a través de la secretaría de medio ambiente de ambas localidades, durante las reuniones se aplicaron encuestas para evaluar el porcentaje de cumplimiento de los siguientes requerimientos:

- El piscicultor toma muestras y monitorea continuamente las variables fisicoquímicas del agua.

- El piscicultor tiene registros históricos sobre mediciones realizadas durante un proceso de producción completo.
- El piscicultor está dispuesto a compartir con los desarrolladores del proyecto el histórico de mediciones fisicoquímicas de la piscícola, para apoyar el diseño e implementación del sistema de monitoreo.
- El piscicultor está dispuesto a participar en el presente proyecto.

**Selección de la piscícola para el proyecto:** Los resultados mostraron que la piscícola San Mio cumplía con los requerimientos mencionados y se seleccionó para trabajar con ella, a continuación se presenta la ubicación de la piscícola.

**Ubicación de la piscícola:** Las siguientes imágenes muestran la ubicación y el establecimiento de la piscícola seleccionada para el proyecto. La cual se encuentra en la vía a Río Claro, en Jamundí, a 20 minutos en vehículo del centro del municipio, a una altura de 975 metros sobre el nivel del mar. Produce aproximadamente 13,500 peces de tilapia roja por lago en un período de 6 a 7 meses. Los peces se crían en ocho lagos recubiertos con plástico, cada uno de 13 metros de largo y 1.2 metros de altura.

La piscícola dispone de un sistema de oxigenación las 24 horas del día, compuesto por dos aireadores tipo splash para cada lago. Estos aireadores cuentan con un sistema de respaldo energético que en caso de un corte de energía, una planta de energía que funciona con gasolina se activa automáticamente al detectar la interrupción, asegurando un suministro continuo de oxígeno para la piscícola.



**Jamundí**  
Valle del Cauca

---

3.216455, -76.553175



Figura 3: Ubicación Piscicola San Mio



Figura 4: Piscícola San Mio

### 2.3 Necesidades identificadas de monitoreo en la piscícola

En la Piscícola San Mio Agropecuario de Jamundí, los parámetros de pH, amonio, nitrito y nitrato se miden manualmente por un operario seis veces por semana, una vez al día en horas tempranas de la mañana. Para ello, se utilizan cintas tornasol, que son tiras de papel recubiertas con un indicador químico que cambia de color según el rango de medida de cada variable [24]. Este método manual presenta problemas de precisión y frecuencia de muestreo, ya que no se pueden detectar variaciones que ocurran fuera del horario de medición.

Dada la importancia de la frecuencia de medición de las variables del agua y las necesidades específicas de la piscícola, las variables de pH y temperatura deben ser medidas a lo largo del día, ya que cambian con las horas [25], lo que hace necesario un muestreo constante. Además, es crucial medir los sólidos disueltos totales (TDS), cuya variación es más lenta y cambia con los días [25]. Actualmente, las variables de temperatura y TDS no se miden en la piscícola, pero es esencial su medición debido a su impacto en la calidad del agua y la salud de los peces. Para solucionar estos problemas, se propone la implementación de un sistema de monitoreo automatizado con sensores IoT que midan continuamente estos parámetros, asegurando datos precisos en línea.

Por otra parte, los piscicultores necesitan una herramienta que les permita acceder a la información desde cualquier dispositivo con conexión a internet, facilitando la toma de decisiones rápidas y efectivas. La solución a esta necesidad es desarrollar una

plataforma web que presente los datos mediante gráficos comprensibles, permitiendo a los usuarios interpretar y analizar la información fácilmente.

Finalmente, se necesitan herramientas que no solo proporcionen datos históricos y actuales, sino que también les ayuden a predecir futuros cambios en la calidad del agua. La solución es desarrollar algoritmos de aprendizaje automático que analicen los datos recolectados y hagan predicciones precisas sobre la evolución de las variables de calidad del agua. Esto permitirá a los piscicultores tomar decisiones proactivas, mejorando la salud de los peces y la productividad de la piscicultura.

### **2.3.1 Variables a medir**

Luego de reunirnos con los responsables de la piscícola, visitar las instalaciones y estudiar sobre los parámetros más importantes para la producción, se seleccionaron las variables de temperatura del agua, pH y TDS del agua. Estas variables influyen en el bienestar de los peces de las siguientes maneras:

La temperatura del agua es un factor crítico en la acuicultura, ya que influye en el crecimiento, metabolismo la reproducción y la alimentación de los peces[26]. Para el caso de la tilapia roja el rango de temperatura optima debe estar en el rango de 28°C - 32°C[27].

Los TDS, medidos en partes por millón (ppm), representan la concentración de minerales, sales y otros compuestos inorgánicos presentes en el agua. Estos elementos, si bien son esenciales en pequeñas cantidades para la vida acuática, en niveles excesivos o deficientes pueden generar graves consecuencias para la salud de los peces [28]. El rango optimo de TDS para tilapia roja debe estar comprendido entre 20 y 450 ppm [29].

El pH, los peces tienen un rango óptimo de pH en el que pueden vivir y reproducirse de manera saludable. Si el pH del agua está fuera de este rango, puede provocar problemas de salud, como estrés, crecimiento deficiente, reproducción reducida y muerte.[26]. el rango optimo de pH para tilapia roja debe estar comprendido entre 6.5 - 9.0 [30].

## **2.4 Requisitos del sistema de monitoreo**

De acuerdo con las necesidades de la piscícola, el sistema de monitoreo remoto de variables del agua debe cumplir con los siguientes requisitos:

- **Resistencia a la intemperie:** El dispositivo debe ser capaz de operar eficientemente bajo condiciones climáticas adversas, garantizando su durabilidad y funcionalidad a largo plazo.
- **Mediciones continuas:** El sistema debe realizar mediciones de cada variable como mínimo cada hora, para asegurar una monitorización precisa y constante.
- **Transmisión de datos:** Los datos deben ser transmitidos vía internet, permitiendo acceso remoto a través de una plataforma web. Esto facilita la detección y respuesta rápida a condiciones adversas.
- **Precisión en las mediciones:** Es fundamental que el sistema ofrezca mediciones precisas para garantizar que las decisiones basadas en estos datos sean correctas y efectivas.
- **Operación autónoma:** El sistema debe ser capaz de realizar las mediciones sin la necesidad de un operario, permitiendo una automatización completa del proceso de monitoreo.
- **Modelos Predictivos:** El modelo de machine learning debe predecir futuros cambios en los parámetros de calidad del agua.
- **Visualización de Datos:** Los gráficos deben ser comprensibles para el piscicultor y deben mostrar las mediciones de calidad del agua en línea.

Estos requisitos son esenciales para asegurar que el sistema de monitoreo remoto sea eficiente, fiable y capaz de proporcionar datos críticos para la gestión de la piscícola.

## 2.5 Conclusión del capítulo

En conclusión, el monitoreo continuo y preciso de la calidad del agua es crucial para garantizar la salud y el óptimo rendimiento de los peces en la producción piscícola. Factores como la temperatura, el pH y los sólidos disueltos totales (TDS) juegan roles fundamentales en el bienestar acuático. Implementar un sistema de monitoreo remoto que cumpla con requerimientos mencionados en el capítulo, no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también promueve prácticas sostenibles y responsables en la piscícola. La capacidad de obtener datos en línea y tomar decisiones informadas reduce riesgos, optimiza recursos y fortalece la gestión integral de la piscícola.

### 3 Diseño del hardware y el software

En el presente capítulo se abordan los diseños del hardware, desde la selección de componentes hasta el diseño de la PCB. Luego, se detalla el diseño de la página web y la base de datos. Finalmente, se explica el diseño de los modelos de machine learning para las predicciones de las variables. En la figura 5 se ilustra de manera general el funcionamiento del sistema de monitoreo.

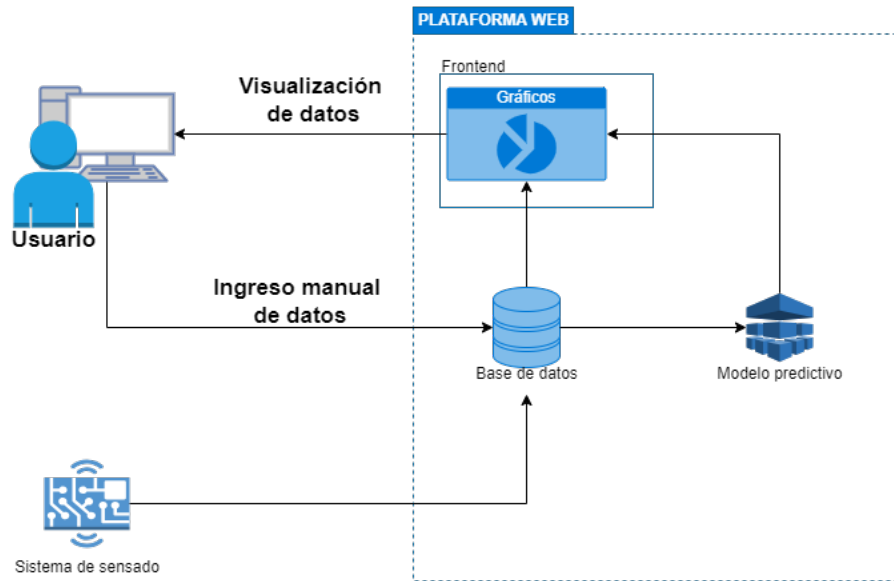


Figura 5: Diagrama general del sistema de monitoreo

#### 3.1 Diseño del sistema Hardware

##### 3.1.1 Diagrama de bloques del dispositivo

A continuación se presenta el diagrama de bloques del prototipo de medición, con el objetivo de facilitar la comprensión del diseño.

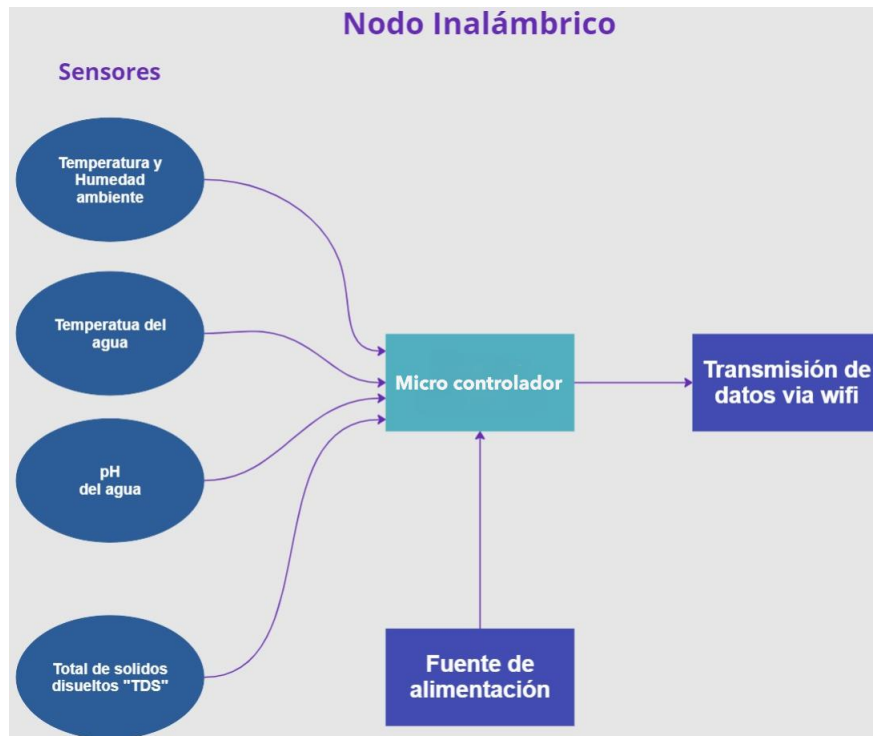


Figura 6: Diagrama de bloques estación de medición

### 3.1.2 Selección de componentes

Luego de la selección de las variables a medir, se establecieron criterios específicos para elegir los sensores más adecuados para cada una de ellas:

#### Rangos de medición específicos:

- **Temperatura del agua:** El sistema debe medir la temperatura del agua en un rango mínimo de 20°C a 32°C, asegurando la optimización de las condiciones térmicas para los peces.
- **pH del agua:** El sistema debe medir el pH del agua en un rango mínimo de 6.0 a 9.5, para mantener un ambiente adecuado para el bienestar de los peces.
- **TDS (Total de Sólidos Disueltos):** El sistema debe medir los TDS en un rango mínimo de 25 a 100 ppm, para garantizar la calidad del agua y la salud de los peces.

A continuación, las tablas 1 y 33 presentan los sensores y el sistema embebido seleccionados para este proyecto, respectivamente. Para obtener información detallada sobre

los criterios empleados en el proceso de selección de estos componentes, se remite al lector al apartado de anexos 9.1 "Selección de componentes".

El sensor SEN0244 mide la conductividad del agua, lo cual permite calcular los sólidos disueltos totales (TDS) a partir de la conductividad, esto se explica en el apartado 4.1.2

Tabla 1: Sensores seleccionados

<b>Características</b>	<b>Ph-4502c, Sonda E201</b>	<b>Temperatura del agua, DS18B20</b>	<b>Conductividad del agua, SEN0244</b>
<b>Tipo de aplicación</b>	Laboratorio	Sistemas industriales	aguas hidropónicas-acuapónicas
<b>Precisión</b>	$\pm 0.1$ pH	$\pm 0,5$ °C	$\pm 10$ FS
<b>Rango de medición</b>	0 a 14	-55 a 125 °C	0 a 1000 ppm
<b>Tiempo de respuesta</b>	5s <	<750 ms	<10 s
<b>Longitud del cable</b>	92 cm	92 cm	83cm
<b>Rango de funcionamiento</b>	0 a 80 °C	-55 a 125 °C	-
<b>Rango de alimentación</b>	5 V	3,3 a 5 V	3.3V/5V
<b>Consumo de corriente</b>	5-10mA	15 $\mu$ A	3-6mA
<b>Sumergible</b>	Si	Si	Si
<b>Salida</b>	analógica	Digital	analógica de 0 a 2.3 V
<b>Necesita transductor</b>	Si	No	Si
<b>Costo</b>	COP 140.000	COP 9.000	COP 90.000

## Sistema embebido

Tabla 2: Características de placa de desarrollo escogida

Características	Raspberry Pi 3B+
Frecuencia del procesador	1.4 GHz
Núcleos del procesador	4
Memoria RAM	1 GB
Almacenamiento	8 GB eMMC
Conectividad	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth
Dimensiones	8,5 x 5,6 cm
Peso	28 g
Software	Linux, Android, Windows 10 IoT Core
Costo	COP 250.000
Consumo	2,5 W
Puertos GPIO	40

## ADC

El convertor analógico a digital seleccionado fue el ADS115 el cual fue suministrado por la universidad, esta basado en el chip ADS1115 es un ADC delta-sigma de 16 bits con ganancia programable (PGA), que permite un rango de medición ajustable y una resolución mejorada; puede configurarse para rangos de entrada de  $\pm 6,144V$  a  $\pm 0,256V$ , proporcionando factores de escala desde  $0,1875mV$  hasta  $0,0078mV$  por LSB, respectivamente; esto facilita la lectura precisa de variaciones de voltaje muy pequeñas; en aplicaciones típicas, se programa mediante la interfaz I2C, soportando velocidades de muestreo de hasta 860 muestras/segundo, y permite la conexión de hasta 4 dispositivos en el mismo bus, gracias a su capacidad de direccionamiento I2C configurable.

La selección de estos dispositivos se basa en su precisión, consumo energético, bajo costo y compatibilidad con los sistemas de producción piscícola, asegurando un monitoreo efectivo de las condiciones ambientales del agua

### 3.1.3 Alimentación del sistema

A continuación, se presentan las ecuaciones que describen el consumo de los componentes principales del sistema:

Para la Raspberry Pi:

$$P_{\text{Raspberry Pi}} = 5V \times 0,55A = 2,75W \quad (1)$$

Para sensores y ADC:

$$P_{\text{sensores}} = 5V \times 0,02A = 0,1W \quad (2)$$

Para la Raspberry Pi, que constituye el núcleo del sistema, se empleó su cargador original USB de 5V y 2A, superando ampliamente los requerimientos de consumo estimados en la ecuación (1). Esta elección proporciona un margen de seguridad considerable, ya que el consumo real de la Raspberry Pi en operación es de aproximadamente 0.55A [31].

Por otro lado, para alimentar los sensores y el ADC, cuyo consumo conjunto no supera los 20 mA, se implementó una solución separada utilizando un cargador de 9V a 1A conectado a un regulador de voltaje de 5V. Esta configuración dual asegura una alimentación estable y adecuada para todos los componentes del sistema. Al separar la alimentación de la Raspberry Pi y los sensores/ADC, se previenen posibles interferencias, mejorando así la fiabilidad y el rendimiento del sistema en su conjunto.

El suministro de energía a los sensores se gestiona mediante dos MOSFET de canal N: uno activa los sensores digitales y el otro los sensores analógicos.

### 3.1.4 Carcasas protectoras

Se instaló un sensor de temperatura y humedad ambiente con el objetivo de monitorizar la temperatura y humedad del entorno. Para proteger este sensor ATH10 de los agentes externos, se adquirió una carcasa protectora diseñada específicamente para resistir los rayos UV, los cuales pueden alterar las mediciones de temperatura, adicionalmente se adquirió una caja con certificación ip65 para proteger la electrónica de la PCB y la raspberry.

### 3.1.5 Protocolos de comunicación

Teniendo en cuenta que los sensores seleccionados tienen una salida analógica, es necesario agregar un convertidor analógico a digital para poder leer sus señales. Esto se debe a que la Raspberry Pi 3B+ no cuenta con un ADC, para lecturas de señales analógicas para el sensor de TDS y pH.

Tanto el sensor de temperatura y humedad como el conversor analógico digital se comunican con la Raspberry Pi 3B+ a través del protocolo I2C. El sensor de temperatura del agua tiene una salida digital que se conecta directamente a uno de los pines GPIO de la Raspberry Pi 3B+.

Debido a que este es un proyecto de Internet de las cosas y los lagos de engorde están ubicados cerca de la oficina del propietario, el cual cuenta con un router con comunicación Wi-Fi, se opta por utilizar este protocolo de comunicación inalámbrica, para comunicar la Raspberry Pi 3B+ con la página web.

### **3.1.6 Diseño de PCB**

Se presenta a continuación, en la figura 7, el diagrama esquemático del sistema electrónico y la placa de circuito impreso (PCB).

La placa de circuito impreso (PCB) del sistema de medición se diseñó en el programa Altium 23.31 Designer. La PCB se acopla a la Raspberry Pi 3B+ por medio de Header SH hembra y macho.

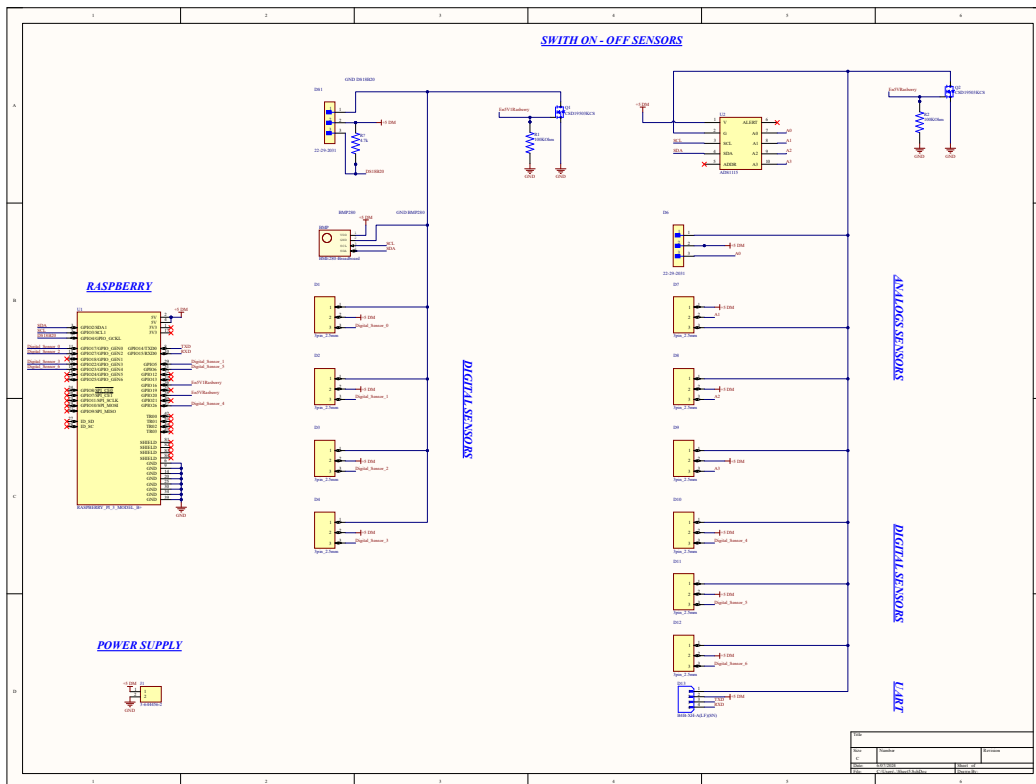


Figura 7: Diagrama esquemático

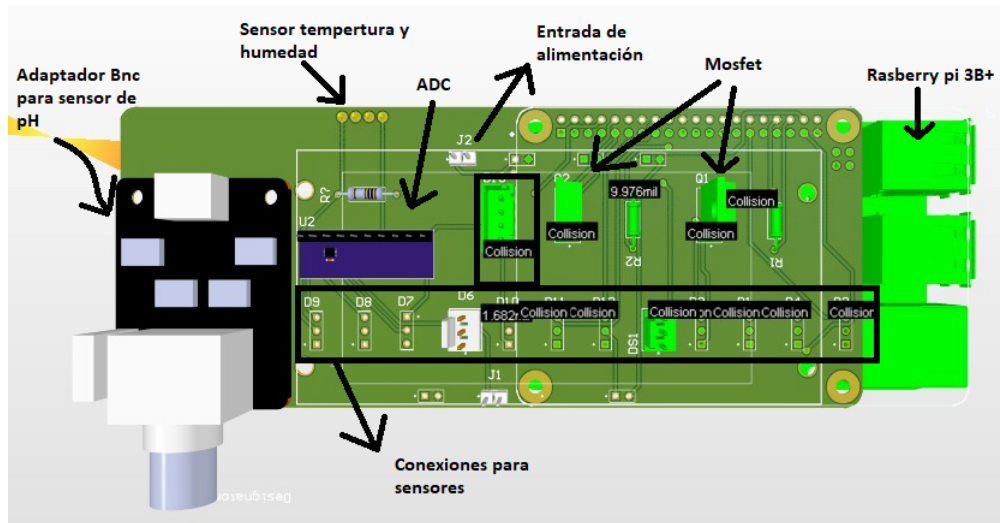


Figura 8: Vista superior, modelo 3D PCB

### 3.2 Diseño del software

En la consecución de este objetivo específico del proyecto, nos centramos en establecer una comunicación eficiente entre el prototipo electrónico y una plataforma web desarrollada integralmente. Además, creamos una interfaz web que permite visualizar los datos sobre la calidad del agua en la piscícola. Este componente es esencial para proporcionar a los piscicultores una herramienta integral que les permita monitorear y gestionar sus cultivos de manera remota y efectiva.

### 3.2.1 Diagrama de la plataforma web y estructura de las bases de datos

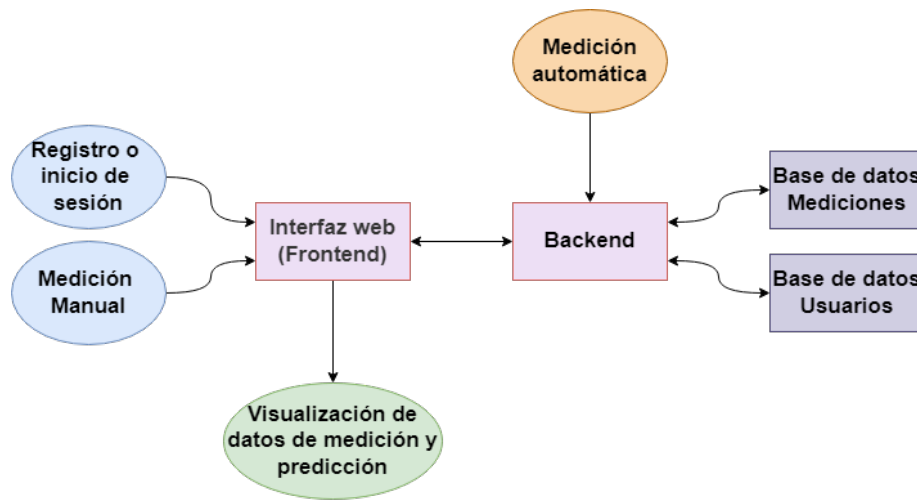


Figura 9: Diagrama de bloques de la plataforma web

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 9 ilustra la arquitectura del software para el sistema de monitoreo de calidad del agua en la piscícola. A continuación, se detalla cada uno de los componentes:

- **Registro o inicio de sesión:** Los usuarios pueden registrarse o iniciar sesión en la interfaz web para acceder al sistema.
- **Medición Manual:** Esta funcionalidad permite a los usuarios ingresar manualmente las mediciones de los parámetros del agua en la plataforma web. Se incluye como alternativa para piscicultores que aún no han implementado el dispositivo electrónico de medición automática, permitiéndoles beneficiarse de los modelos predicción de las variables fisicoquímicas del agua, así como de un histórico de datos y visualización gráfica.
- **Interfaz web (Frontend):** Es la parte visual del sistema con la que interactúan los usuarios. Permite la visualización de datos, el registro de mediciones manuales y el inicio de sesión.
- **Medición automática:** Recoge automáticamente las mediciones de los parámetros del agua a través de sensores conectados.
- **Backend:** Procesa y almacena los datos recibidos tanto de la medición automática como de la manual. Gestiona las bases de datos y se comunica con el frontend para proporcionar datos en línea.

- **Base de datos Mediciones:** Almacena todas las mediciones de los parámetros del agua.
- **Base de datos Usuarios:** Almacena la información de los usuarios registrados en el sistema.
- **Visualización de datos de medición y predicción:** Los usuarios pueden visualizar los datos recogidos y los resultados de las predicciones realizadas mediante algoritmos de machine learning.

Este diseño asegura que los usuarios puedan interactuar de manera efectiva con el sistema, registrar datos manualmente si es necesario, y acceder a información sobre la calidad del agua, mejorando así la gestión y la toma de decisiones en la piscicultura.

### 3.2.2 Interfaz gráfica y elementos visuales

#### Diseño preliminar mediante wireframes

Para iniciar el proceso de diseño de la interfaz gráfica de usuario, se crearon distribuciones preliminares utilizando WireFrames [32]. Estos esquemas proporcionan una representación visual simplificada de la disposición de los elementos en la interfaz, sin detalles de diseño gráfico o estilo visual. Este enfoque inicial fue fundamental para establecer un diseño estructural coherente y funcional antes de avanzar a etapas más detalladas del diseño visual. En la figura 10 continuación se ilustra la interacción del usuario entre las diferentes vistas de inicio de sesión.



Figura 10: Ventanas de conexión o registro para el usuario

Posteriormente, se procedió al desarrollo de maquetas en Figma [33], una etapa crucial para la visualización y planificación del diseño de la interfaz de usuario de la aplicación

de monitoreo para la piscícola. Utilizando Figma, se pudieron crear prototipos interactivos que permiten simular la experiencia del usuario antes de la implementación final.

Este proceso incluyó la definición de la estructura de navegación, la disposición de los elementos visuales y la interacción del usuario con la aplicación. Las maquetas debían reflejar tanto la funcionalidad del sistema como su apariencia estética, asegurando que todas las características esenciales estuvieran representadas de manera clara y efectiva.

En conjunto, los WireFrames proporcionaron una guía clara para el desarrollo posterior tal como se muestra en la figura 11, asegurando que la estructura y la disposición de los elementos en la interfaz cumplieran con los requisitos de usabilidad y funcionalidad del proyecto. La transición a Figma permitió detallar y perfeccionar el diseño, facilitando la creación de un prototipo interactivo que mejoró la comprensión y validación de la experiencia del usuario antes de su implementación final.

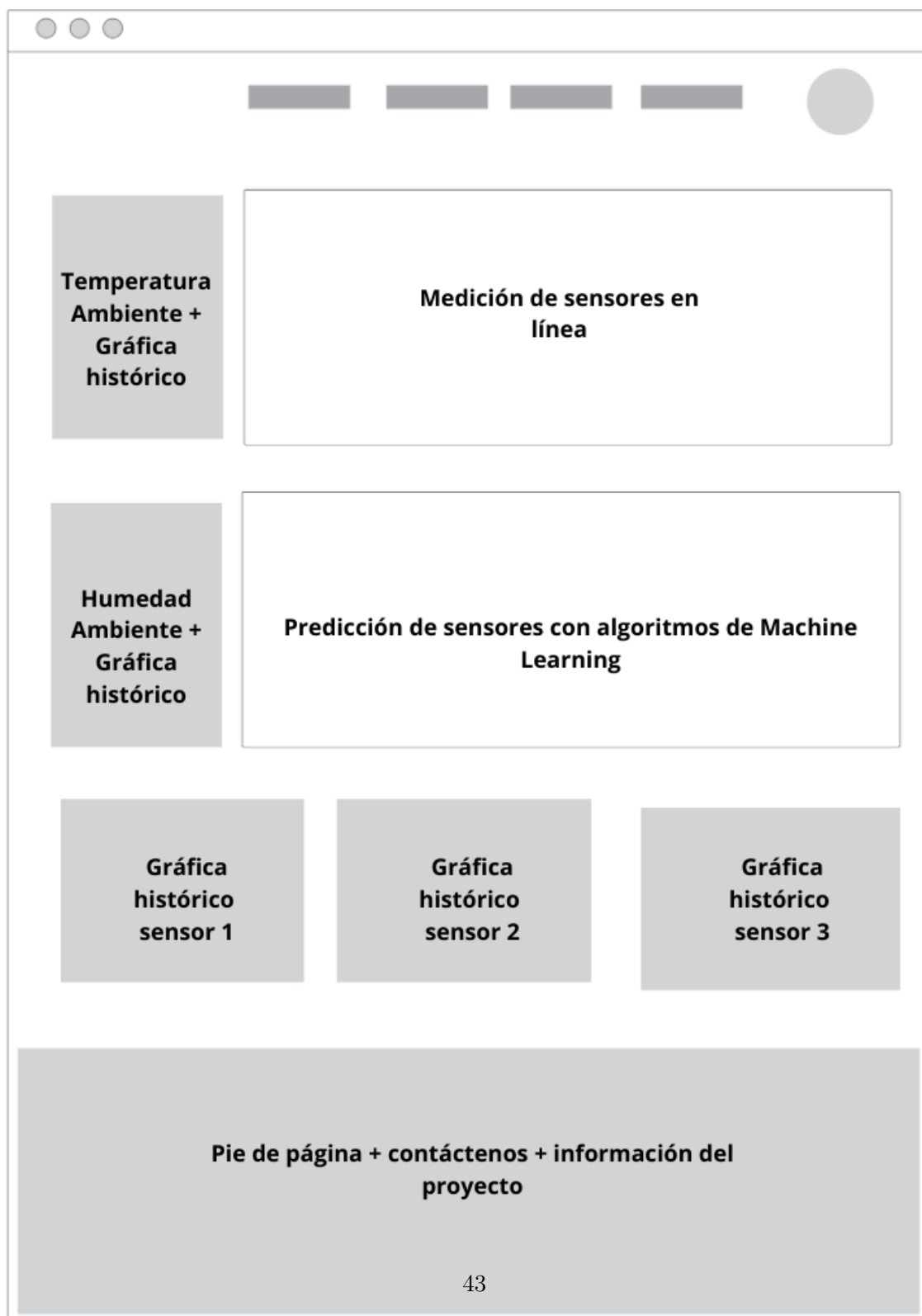


Figura 11: Ejemplo de WireFrames para la interfaz de usuario.

## Diseño final de la plataforma web

A continuación se ilustra la disposición final que tuvieron los elementos en esta etapa de desarrollo de la plataforma web:

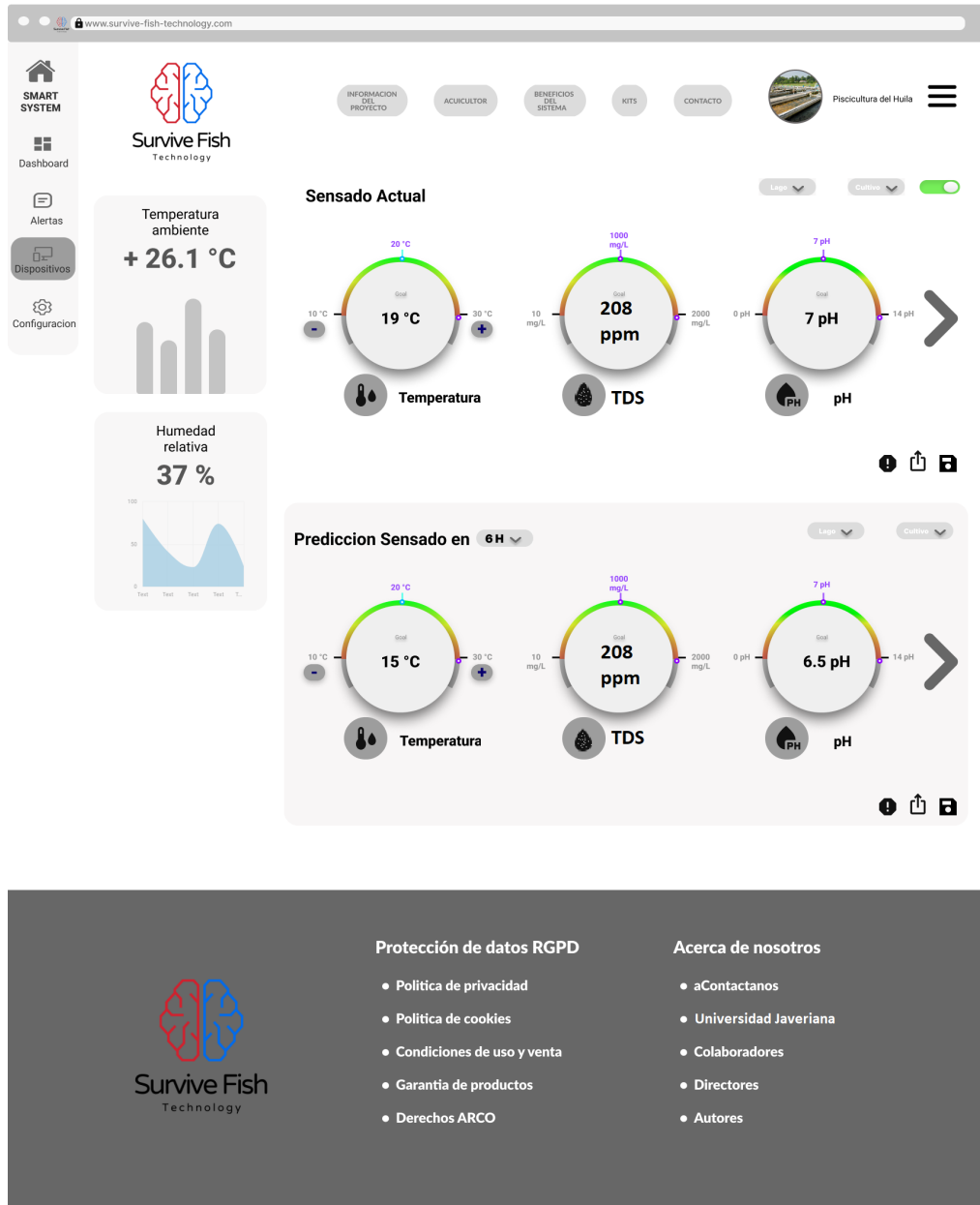


Figura 12: Diseño planteado de la plataforma web

### 3.3 Diseño de modelos predictivos

La implementación de modelos de machine learning para la predicción de variables fisicoquímicas del agua en la piscicultura representa un avance significativo en la gestión proactiva de estos sistemas de producción. Esta capacidad predictiva es importante por que dota a los piscicultores de una herramienta para la toma de decisiones informadas, proporcionándoles datos anticipados que les permiten planificar intervenciones oportunas y realizar ajustes en el manejo del cultivo antes de que se materialicen.

Para el diseño de los modelos de machine learning, se tuvo en cuenta la predicción de las siguientes variables: temperatura del agua, conductividad del agua, conductividad absoluta, pH y TDS.

Esta estrategia permite mantener los modelos separados, lo cual es beneficioso en caso de que se dañe un sensor. Al aislar cada resultado, se garantiza que, si un sensor falla, aún se podrán obtener las predicciones de las otras variables. Si se hubiera utilizado un modelo multivariable, la falla de un sensor impediría la predicción de todas las variables. Además, se optó por este método debido al menor costo computacional, ya que entrenar un modelo de menor dimensionalidad es más rápido que uno con mayor dimensionalidad.

Para cada variable, se probaron varios modelos de machine learning clásicos para predicciones, como la regresión lineal, máquina de vectores de soporte, regresor de k-vecinos más cercanos, regresor de árbol de decisión y regresor de Bosque Aleatorio. Se seleccionó el modelo que obtuvo el porcentaje de error más bajo, según la métrica MAE (Mean Absolute Error).

Los modelos fueron entrenados utilizando la base de datos recopilada por el sistema de medición automática diseñado para el presente proyecto, con un total de 2192 registros.

Con el modelo seleccionado para cada variable, se añadió un lag. En el análisis de series temporales, un lag representa un desplazamiento temporal que permite utilizar observaciones pasadas para predecir valores futuros. En este modelo específico, se emplean las dos últimas observaciones como base predictiva, una técnica estándar que permite captar la dependencia temporal y evolución de los datos. Este enfoque mejora significativamente la precisión de las predicciones al incorporar la "memoria histórica" de la serie, permitiendo al modelo identificar patrones y tendencias que van más allá de un único punto de observación.

La técnica de lags funciona esencialmente como un mecanismo de aprendizaje retrospectivo, donde cada nueva predicción se nutre de la información contenida en los estados anteriores del sistema. Al considerar múltiples observaciones anteriores, el modelo puede detectar variaciones, ciclos y comportamientos subyacentes que serán imperceptibles si solo se analiza el último dato, lo que resulta fundamental para construir predicciones más robustas y contextualizadas.

Adicionalmente en el proceso de diseño de los modelos se hizo uso de transformaciones trigonométricas, las cuales son esenciales para capturar patrones cíclicos en los datos, especialmente cuando estos presentan comportamientos recurrentes basados en el tiempo, como variaciones diarias u horarias. Transformar la información de horas y minutos en valores sinusoidales y cosinusoidales ayuda a representar la posición del tiempo en un ciclo de 24 horas (día) o de 60 minutos (hora). Por ejemplo, las variables Hour sin y Hour cos capturan la naturaleza cíclica diaria, mientras que Minute sin y Minute cos hacen lo mismo para los minutos. Estas transformaciones convierten la hora y los minutos en puntos de un círculo unitario, capturando la naturaleza cíclica del tiempo, como la transición de la medianoche al amanecer.

Durante el flujo de entrenamiento, primero se cargan y procesan los datos. Posteriormente, se crean las variables rezagadas y trigonométricas, las cuales se combinan para enriquecer las entradas al modelo y permitirle aprender patrones temporales más complejos. Después, se divide el conjunto de datos en entradas (features) y objetivos (targets), y finalmente, se entrena un modelo para cada variable del sistema.

Para el flujo de predicción, cuando se necesita predecir un valor en un momento dado, se utilizan las últimas predicciones realizadas por el modelo junto con las transformaciones trigonométricas calculadas para la hora y el minuto actuales. El modelo genera una predicción, la cual se utiliza como entrada para predicciones futuras, garantizando así que el sistema se adapte continuamente a los patrones temporales.

A continuación, se presentan las tablas con los puntajes alcanzados por los modelos y se especifica que modelo fue seleccionado para cada variable, luego se muestra la sintonización de los modelos y los hiperparámetros que mejor resultados dieron a los modelos.

Tabla 3: Resultados del entrenamiento de modelos para la temperatura del agua

Variable	Modelo	MAE
Temperatura del agua	Random Forest Regressor	0.3109
	Linear Regression	0.6243
	Support Vector Machine	0.4555
	k-Nearest Neighbors Regressor	0.4995
	Decision Tree Regressor	0.2037

Tabla 4: Resultados del entrenamiento de modelos para la conductividad del agua

Variable	Modelo	MAE
Conductividad del agua	Random Forest Regressor	2.2706
	Linear Regression	5.0731
	Support Vector Machine	6.9750
	k-Nearest Neighbors Regressor	4.5734
	Decision Tree Regressor	0.4569

Tabla 5: Resultados del entrenamiento de modelos para la conductividad absoluta

Variable	Modelo	MAE
Conductividad absoluta	Random Forest Regressor	1.9690
	Linear Regression	4.6245
	Support Vector Machine	6.4656
	k-Nearest Neighbors Regressor	4.1335
	Decision Tree Regressor	0.0957

Tabla 6: Resultados del entrenamiento de modelos para TDS

Variable	Modelo	MAE
TDS	Random Forest Regressor	1.1324
	Linear Regression	2.5365
	Support Vector Machine	2.6205
	k-Nearest Neighbors Regressor	2.2867
	Decision Tree Regressor	0.2284

Tabla 7: Resultados del entrenamiento de modelos para pH

Variable	Modelo	MAE
pH	Random Forest Regressor	0.2020
	Linear Regression	0.3438
	Support Vector Machine	0.3110
	k-Nearest Neighbors Regressor	0.2961
	Decision Tree Regressor	0.1408

Con base en las tablas anteriores, se observa que el modelo de árboles de decisión obtuvo el menor MAE entre todos los modelos de aprendizaje automático evaluados para las cinco variables que se desean predecir. Esto motiva la optimización del modelo mediante la sintonización de hiperparámetros, los cuales son clave para reducir el MAE.

Se utilizó el método `RandomizedSearchCV` de la biblioteca `scikit-learn` [34], una herramienta poderosa que permite explorar eficientemente un espacio de hiperparámetros mediante una búsqueda aleatoria. `RandomizedSearchCV` selecciona combinaciones aleatorias de valores de hiperparámetros y evalúa el rendimiento del modelo utilizando validación cruzada para encontrar la configuración óptima.

Durante el proceso, se ajustaron los hiperparámetros del modelo, incluyendo:

`max depth` : Controla la profundidad máxima del árbol de decisión, probando valores de 10 a 100 en incrementos de 10.

`min samples split`: Define el número mínimo de muestras requeridas para dividir un nodo interno, con valores probados de 2, 5 y 10.

`min samples leaf`: Especifica el número mínimo de muestras en un nodo hoja del árbol, evaluando opciones de 1, 2 y 4.

`max features`: Limita el número máximo de características consideradas en cada división, explorando 'auto', 'sqrt' y 'log2'.

`criterion`: Define la métrica para evaluar la calidad de la división del árbol, incluyendo squared error, friedman mse, poisson y absolute error.

Este proceso implicó ajustar 300 combinaciones de hiperparámetros, seleccionando aquellas que maximizan el rendimiento del modelo en la predicción de las variables objetivo. A continuación, en la tabla 8, se presenta una tabla con los mejores hiperparámetros encontrados mediante el método RandomizedSearchCV para cada variable y la siguiente tabla los errores obtenidos luego de reentrenar los modelos con los mejores hiperparámetros. Las predicciones se realizaron para predecir un instante de tiempo futuro, es decir, un intervalo de una hora, teniendo en cuenta que a medida que nos alejemos más en el tiempo el error incrementa.

Tabla 8: Hiperparámetros encontrados para las variables en el modelo de regresión de bosques aleatorios

Variable	min_samples_split	min_samples_leaf	max_features	max_depth
water_temperature	5	4	1	20
conductivity	2	4	sqrt	50
conductivity_absolute	2	2	log2	100
tds	2	4	sqrt	70
ph	5	4	1	20

Tabla 9: Margen de error de los modelos de regresión de árboles de decisión

Modelo	Margen de Error % ( $\pm$ )
Decision_tree_regressor_water	0.25
Decision_tree_regressor_conductivity	4.1
Decision_tree_regressor_conductivity_absolute	4.4
Decision_tree_regressor_tds	2.0
Decision_tree_regressor_ph	0.5

### 3.4 Conclusión del capítulo

En este capítulo, se abordaron las necesidades de los piscicultores en el monitoreo de variables fisicoquímicas del agua. Se definieron las variables a medir y la ubicación de la piscícola. En cuanto al hardware, se diseñó un sistema detallando la selección de componentes y el diseño de la PCB. Para el software, se diseñó una plataforma web para visualizar los datos recolectados y se diseñaron modelos predictivos para el análisis de estos datos con el fin dotar a los piscicultores de una herramienta predictiva para la toma de decisiones informadas. El siguiente capítulo se centrará en la implementación práctica del hardware y el software.

## 4 Implementación del hardware y el software

En el presente capítulo se detalla el proceso de implementación tanto del sistema hardware como del software, fundamentales para el correcto funcionamiento del proyecto. La implementación del sistema hardware incluye la programación, calibración y verificación de los sensores utilizados para medir pH, conductividad, TDS (Total de Sólidos Disueltos) y temperatura del agua. Cada uno de estos sensores es calibrado individualmente, para asegurar la precisión de las mediciones se compararon los resultados con el instrumento Hanna Instruments HI 9829, el cual es un medidor portátil multiparamétrico diseñado para monitorear la calidad del agua.

En la sección de software, se describe el desarrollo de la página web y la base de datos, que permiten la visualización y almacenamiento de los datos recolectados por los sensores. Además, se expone la implementación del modelo de Machine Learning, una pieza clave del sistema, que se utiliza para realizar predicciones basadas en los datos obtenidos. Este capítulo proporciona una visión de cada etapa del proceso, desde la configuración inicial hasta la integración final de todos los componentes.

### 4.1 Implementación del sistema hardware

De acuerdo con el diagrama esquemático de la figura 7 ,se realizaron las conexiones de los componentes y sensores en la PCB, para verificar el correcto funcionamiento del sistema. Se comprobó la continuidad, la alimentación de los componentes y que sus conexiones correspondieran correctamente al diagrama esquemático. En la figura 13 se puede apreciar el resultado obtenido de este objetivo.

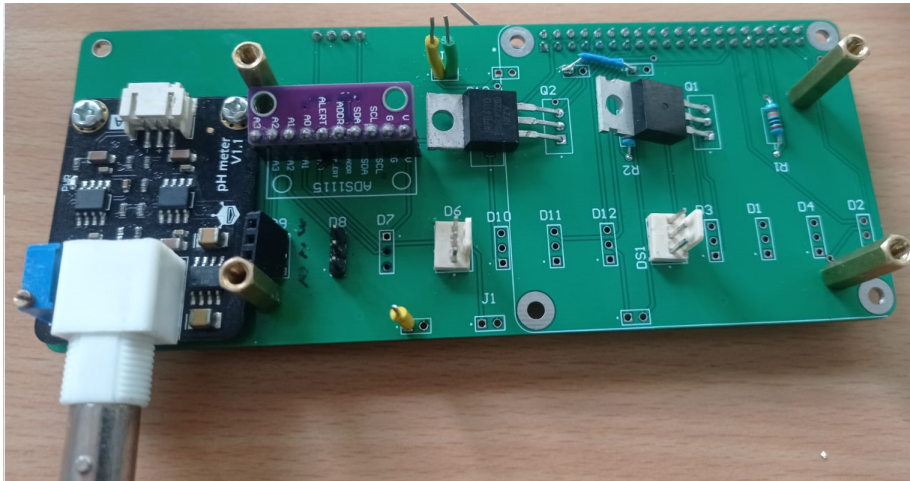


Figura 13: PCB con componentes

#### 4.1.1 Programación, calibración y verificación de sensores.

- La alimentación permanece activa de forma constante para la Raspberry Pi 3B +, no obstante, solo se suministra energía a los sensores cada 15 minutos. Durante estos lapsos, se capturan y transmiten los datos a la base de datos y se muestran en la página web.
- Se integró un sensor de temperatura y humedad ambiental en la placa de circuito impreso (PCB) del prototipo. El objetivo de este sensor es proteger el dispositivo de posibles daños.

En caso de que la temperatura interna del dispositivo alcance los 70°C o más, el sistema se apagará automáticamente. Esto evita el sobrecalentamiento y posibles fallos. Si la humedad ambiental interna supera el 60 % Humedad relativa durante un período prolongado de tiempo, esto indica la presencia de humedad excesiva en la estación y la necesidad de realizar una inspección manual, actualmente el sistema genera una alarma para esto.

- Se implementó un servicio en el sistema operativo de la Raspberry Pi configurado para que en caso de reinicio del dispositivo, al encenderse nuevamente, la Raspberry Pi ejecute automáticamente el script que recolecta datos de los sensores y los envía a la página web.
- Para la programación en la Raspberry Pi, se utilizó la herramienta VNC Viewer [35], la cual permite controlar de manera remota otro ordenador a través de una red utilizando el protocolo Virtual Network Computing (VNC). Con esta herramienta, se logró acceder al sistema operativo de la Raspberry Pi y programar en

Python toda la parte de las mediciones de variables físico químicas medidas del agua y ambiente. Para acceder, es necesario tener instalada la aplicación VNC en el ordenador y utilizar las credenciales correspondientes, permitiendo acceso a la Raspberry Pi y accesibilidad del código en cualquier momento siempre que esté conectada a internet.

- Se creó un archivo CSV en la Raspberry Pi para guardar localmente los datos recopilados por los sensores en la tarjeta SD. Este archivo registra la fecha, la hora y las mediciones de cada sensor. Cada vez que se escriben datos en este archivo CSV, se utilizan 308 bytes por escritura. Con un promedio de 96 mediciones diarias, esto suma un total de 29,568 bytes por día. Esta cantidad es mínima en términos de consumo de almacenamiento, asegurando que la información pueda ser fácilmente guardada en la tarjeta SD. La capacidad de la tarjeta SD de la Raspberry Pi es de 32 GB, con 28 GB disponibles específicamente para escritura, lo que garantiza un almacenamiento adecuado durante varios años. Esta solución proporciona un respaldo eficiente a la base de datos desarrollada.
- En caso de que alguno de los sensores de la estación no haya sido reconocido por la estación, este reintentará leerlo individualmente durante cinco intentos. Para cada reintento, se realizará un ciclo de reinicio de energía.

#### 4.1.2 Calibración de sensores

Para la calibración de los sensores, se tomaron seis muestras de agua de los lagos de la piscícola asociada al proyecto en botellas plásticas y se refrigeraron para que las muestras no se descompusieran, posteriormente se llevaron las muestras al laboratorio para realizar la calibración y el procedimiento a seguir fue el siguiente.

Para asegurar la precisión de las mediciones, se compararon los resultados con el instrumento Hanna Instruments HI 9829 [36], utilizado como medidor de referencia debido a su alta precisión y confiabilidad en las variables críticas para este proyecto. Este dispositivo, está diseñado para monitorear la calidad del agua, puede medir hasta 14 parámetros diferentes. Hanna Instruments es una empresa multinacional dedicada a la fabricación y distribución de tecnologías para el control de la calidad del agua, lo cual respalda la confiabilidad de sus dispositivos.

Aunque el medidor es muy eficaz para medir los parámetros del agua, solo puede tomar mediciones cuando es operado manualmente, lo que significa que no se puede dejar en el sitio para realizar mediciones continuas. Además, no cuenta con protecciones para estar a la intemperie ni puede transmitir los datos vía internet, por lo anterior es necesario desarrollar un dispositivo que cumpla con los requerimientos definidos en el apartado 2, del documento.

En la tabla 10 se presentan las especificaciones técnicas del medidor con respecto a las variables de interés del presente proyecto.

Tabla 10: Especificaciones del medidor Hanna Instruments HI 9829

Parámetro	Rango	Resolución	Precisión
pH	0.00 a 14.00 pH	0.01 pH	±0.02 pH
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	0 a 400,000 ppm (mg/L)	1 mg/L (ppm)	± 1 ppm (mg/L)
Temperatura	-5.00 a 55.00 °C	0.01 °C	±0.15 °C

#### 4.1.2.1 Calibración sensor de pH

Para calibrar el sensor de pH, se utilizaron soluciones buffer de pH conocido (4.0, 7.0 y 10.0). La sonda del sensor se introdujo en cada solución y se aplicó un filtrado digital a los datos obtenidos. Se registraron los valores en bits para cada solución. Se crearon tres ecuaciones lineales: dos con dos puntos (para pH 4.0-7.0 y 7.0-10.0) y una con tres puntos (para Ph 4.0-7.0 y 10.0). Posteriormente, se midieron las muestras con un medidor multiparámetro Hanna Instruments HI 9829 [36] para verificar la similitud entre las medidas del prototipo y las del medidor de referencia. Se observó que la ecuación con tres puntos no era lo suficientemente precisa.

A continuación se presentan las ecuaciones empleadas para la medición del pH, en el cual “y” representa el valor de pH y “x” es la medición del sensor en bits.

$$y = -0,0012x + 24,192 \quad (3)$$

$$y = -0,0011x + 22,428 \quad (4)$$

El sistema selecciona la ecuación apropiada para la medición de pH basándose en la proximidad de la lectura en bits a tres valores de referencia: 16,827 bits (pH 4.0), 14,025 bits (pH 7.0) y 11,827 bits (pH 10.0). El proceso inicia con la obtención de la medición en bits del sensor de pH, seguido por el cálculo de la diferencia absoluta entre esta medición y cada valor de referencia. Se identifica entonces el valor de referencia más cercano, es decir, aquel con la menor diferencia calculada. Si el valor más cercano corresponde a pH 4.0 o pH 10.0, el sistema emplea la ecuación (3), si el valor más cercano es el de pH 7.0, se utiliza la ecuación (4). Este método asegura una selección precisa y adaptativa de la ecuación según la lectura del sensor.

Para la medición de pH se implementó una rutina de adquisición de datos que opera a una frecuencia de muestreo de 2.5 Hz (una muestra cada 400 ms), recolectando un conjunto de 10 mediciones consecutivas por ciclo. El algoritmo implementa un filtro estadístico para la exclusión de valores atípicos, eliminando los extremos (máximos y mínimos) del conjunto de datos, seguido del cálculo del valor medio aritmético sobre las muestras filtradas. Para garantizar la reproducibilidad y robustez estadística del método, se ejecutaron tres ciclos completos de medición para cada valor de pH bajo estudio, registrando los promedios resultantes en la tablas 11 y 12

Tabla 11: Porcentaje de error para ecuación (3)

Valor Real	Valor Medido	Promedio de las mediciones	Error (%)
4,0	3,97	3,97	0,75
	3,98		
	3,96		
7,0	7,36	7,45	6,44
	7,59		
	7,4		
10,0	10,13	10,19	1,93
	10,21		
	10,24		

Tabla 12: Porcentaje de error para ecuación (4)

Valor Real	Valor Medido	Promedio de las mediciones	Error (%)
4,0	3,86	3,89	2,83
	3,90		
	3,90		
7,0	6,97	6,95	0,43
	6,96		
	6,91		
10,0	9,62	9,62	3,83
	9,60		
	9,63		

Tabla 13: Porcentaje de error para ecuación con tres puntos

Valor Real	Valor promedio de las mediciones	Error (%)
4.0	4.98	24.5
7.0	8.00	14.35
10.0	10.72	7.17

#### 4.1.2.2 Calibración sensor de conductividad y TDS

##### Compensación de la temperatura para los valores medidos de conductividad eléctrica en bits:

Para calibrar el sensor de conductividad eléctrica (CE), es esencial tener en cuenta que la conductividad de una solución varía con la temperatura. La conductividad de una muestra se mide a una temperatura especificada, generalmente 25°C, y para obtener lecturas precisas, es necesario ajustar las mediciones utilizando un coeficiente de temperatura conocido como beta. Este coeficiente permite corregir las variaciones en la conductividad debidas a cambios en la temperatura, asegurando así la precisión de los datos obtenidos.

A continuación se presenta la fórmula para calcular la conductividad eléctrica [37].

$$EC_{25} = EC_x / (1 + b(T_x - 25)) \quad (5)$$

donde:

- EC<sub>25</sub>: Es el valor de la conductividad eléctrica que tendría la muestra si estuviera a la temperatura de referencia de 25 °C.
- EC<sub>x</sub>: Representa la conductividad eléctrica medida en la muestra.
- b: Es el coeficiente de temperatura que indica cómo cambia la CE con la temperatura. Este valor depende de la composición de la solución que se está midiendo. Para muestras de agua dulce, se utiliza comúnmente un valor de beta de 1.90
- T<sub>x</sub>: Es la temperatura actual de la muestra en grados Celsius.

##### Conversión del valor en bits a $\mu\text{S}/\text{cm}$ :

De acuerdo con la documentación sobre el sensor de conductividad SEN0244 [37], se utilizó la ecuación recomendada para convertir los valores de bits a valores de conductividad:

CT = Compensación de temperatura

$$EC = 133,42 * CT^3 - 255,86 * CT^2 + 857,39 * CT \quad (6)$$

Al verificar la similitud entre las mediciones del prototipo y las del medidor de referencia HI9829, se observó que la ecuación recomendada 6 no era lo suficientemente precisa.

Debido a esto, se procedió a realizar una calibración del sensor basada en el medidor de referencia, ya que no se contaba con soluciones buffer de conductividad conocidas. El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Se tomaron seis muestras de agua de los lagos de la piscícola.
2. Cada muestra de agua se midió con el instrumento de referencia y con el sensor de conductividad, almacenando la información obtenida.

Para el sensor de conductividad, se realizó un filtrado digital de los datos y se construyeron tres ecuaciones específicas. Este enfoque se implementó con el fin de minimizar el error de medición.

A continuación se presentan las ecuaciones para el sensor de CE, donde “y” representa el valor de conductividad y “x” es la medición del sensor en bits.

$$y = 0,038x - 1,566 \quad (7)$$

$$y = 0,2034x - 468,8 \quad (8)$$

$$y = 0,2098x - 494,25 \quad (9)$$

- Una ecuación para valores de conductividad en el rango:  $0 \leq CE \leq 96,2 \mu\text{S}/\text{cm}$
- Otra para el intervalo de medición:  $96,2 < CE \leq 340 \mu\text{S}/\text{cm}$
- Y una tercera para el rango:  $340 < CE \leq 653 \mu\text{S}/\text{cm}$

Se seleccionaron las ecuaciones que presentaban el menor porcentaje de error dentro de los rangos de bits leídos por el sensor.

- Cuando el sensor de CE está en un rango de medición de  $0 \leq \text{bits} \leq 2835$ , el sistema toma la ecuación 9.
- Para valores en el rango  $2835 < \text{bits} \leq 2896$ , el sistema toma la ecuación 7.
- Para valores en el rango  $2896 < \text{bits} \leq 4085$ , el sistema toma la ecuación 8.
- Finalmente, para valores en el rango  $4085 < \text{bits} \leq 5701$ , el sistema toma la ecuación 7.

A continuación, la tabla 14, muestra las mediciones de las muestras de agua tomadas con el instrumento de referencia y con el sensor de conductividad, utilizando las tres ecuaciones desarrolladas y sus respectivos porcentajes de error.

Tabla 14: Comparación de mediciones de conductividad de agua con medidor de referencia y sensor calibrado

Muestras de agua	Valor leído HI 9829 uS/cm	Ec1 uS/cm	Ec2 uS/cm	Ec3 uS/cm	Error Ec1	Error Ec2	Error Ec3
1	0	2	2	3,3	0	0	0
2	96.2	87	112	104	9.6	16.42	8,11
3	114	115	126	107.5	0,9	10,53	5,70
4	340	407	363	159	19.7	6,76	53,24
5	434	456	526	161,5	5,1	21,20	62,79
6	653	604	789	210	7,5	20,83	67,84

Para calcular la conductividad absoluta se utiliza la misma ecuación 5, pero sin la compensación de la temperatura.

#### Cálculo del total de sólidos disueltos (TDS):

Para determinar el TDS, se mide la conductividad eléctrica (EC) del agua a 25°C 5 y se multiplica por un factor de conversión. Este factor varía según la composición iónica del agua, oscilando entre 0,00 y 1,00. Soluciones iónicas fuertes: se utiliza un factor de conversión de 0,5. Soluciones iónicas débiles: se emplea un factor de 0,7, en este caso se ha utilizado el factor de 0,5[36], a continuación se presenta la ecuación empleada.

$$\text{TDS} = \text{EC}_{25} \times 0,5 \quad (10)$$

#### 4.1.2.3 Calibración sensor de temperatura del agua

El sensor de temperatura del agua DS18B20 no requirió calibración adicional, ya que su salida digital coincidió con alta precisión con las mediciones del instrumento Hanna Instruments HI 9829 [36]. A continuación, se presenta el porcentaje de error del sensor en comparación con las mediciones del HI 9829 [36].

Muestras de agua	Valor leído H 9829 °C	Valor medido DS18280 °C	Error %
1	21.4	21.3	0,5
2	22.06	22.1	0,2
3	19.16	19.2	0,2
4	17.55	17.6	0,3
5	17.88	17.9	0,1
6	21.11	21.0	0,5

Tabla 15: Porcentaje de error temperatura del agua

De acuerdo con la tabla 15, se puede apreciar que el error en el peor de los casos alcanza un valor del 0.5 %, lo que indica una alta precisión del sensor.

A continuación se muestra una imagen representativa del proceso de calibración de los sensores, así como imágenes del prototipo de estación y su ubicación dentro de la piscícola.

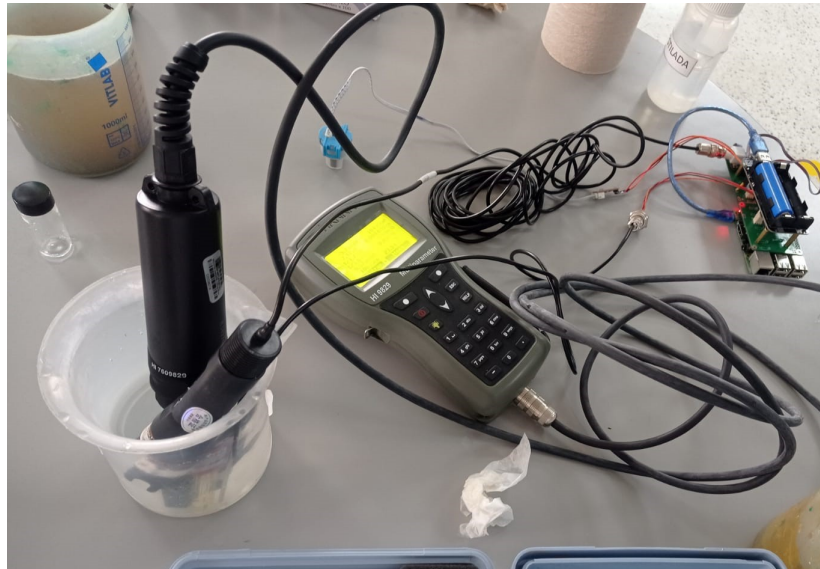


Figura 14: Calibración de sensores



Figura 15: Prototipo de medición

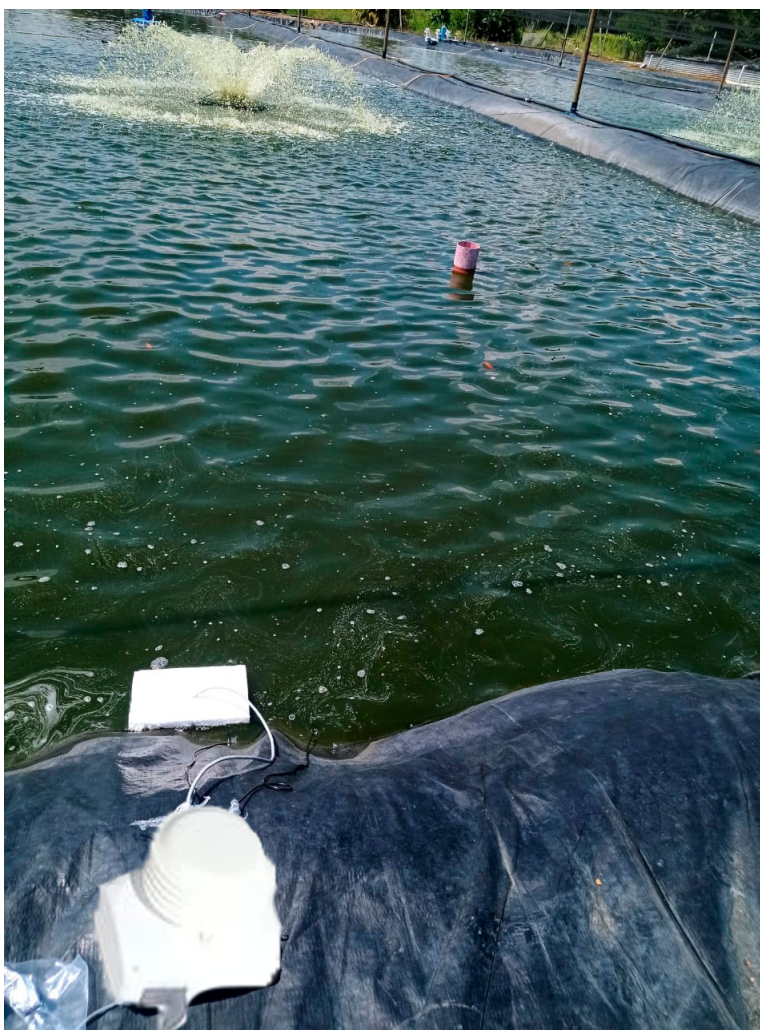


Figura 16: Prototipo ubicado en el lago

## 4.2 Implementación del software

### 4.2.1 Protocolos de comunicación y tecnologías a utilizar

El flujo de datos comienza con un prototipo electrónico que recolecta información sobre la calidad del agua en la piscícola. Estos datos son enviados a una base de datos MySQL [38]. El backend, alojado en un servidor AWS [39], realiza solicitudes JSON para obtener estos datos. Finalmente, una API conecta el backend con el frontend, donde los usuarios autenticados pueden visualizar los datos en línea y gestionar sus

cultivos piscícolas.

Para lograr una gestión eficiente y segura de la información recolectada en estos entornos, se han implementado diversos protocolos de comunicación y tecnologías que aseguran la integridad, seguridad y funcionalidad del sistema de monitoreo. A continuación, se describen las principales herramientas y tecnologías empleadas en el desarrollo del software:

1. **HTTPS (hypertext transfer protocol secure)**: Implementado para asegurar la comunicación segura entre el backend y el frontend, utilizando un api restful [40].
2. **SSH (Secure Shell)**: Empleado para la conexión segura entre el servidor Debian y GitHub, facilitando despliegues seguros y eficientes [41].
3. **Java**: Utilizado para el desarrollo del backend del sistema de monitoreo piscícola, junto con el framework Spring Boot [42].
4. **Spring Boot**: Framework de Java utilizado para simplificar y agilizar el desarrollo del backend [42].
5. **HTML**: Lenguaje de marcado utilizado para la estructura básica de las páginas web [43].
6. **CSS**: Lenguaje de estilo utilizado para el diseño y presentación visual de las páginas web [44].
7. **JavaScript**: Utilizado para la lógica de interacción del frontend, incluyendo animaciones y dinamismo en la interfaz de usuario [45].
8. **MySQL**: Sistema de gestión de bases de datos relacional utilizado inicialmente para almacenar datos.
9. **Docker**: Utilizado para la contenerización de la aplicación y sus dependencias, facilitando la portabilidad y gestión eficiente de recursos [46].
10. **Maven**: Herramienta utilizada para la gestión de dependencias y la construcción del proyecto Java [47].
11. **GitHub**: Utilizado como repositorio de código fuente y para la integración continua del desarrollo [48].
12. **VMWare Workstation Pro**: Empleado para la creación de un entorno virtualizado de pruebas y validación [49].

#### 4.2.2 Desarrollo del Backend

El backend del sistema de monitoreo de calidad del agua para la piscícola se diseñó y desarrolló utilizando Java y el framework Spring Boot, siguiendo la arquitectura Modelo-Vista-Controlador (MVC) [50]. A continuación, se describen los componentes clave y su funcionalidad.

- **Modelo (Model)** El modelo se ocupa de las interacciones con la base de datos. Incluye la definición de entidades y repositorios para gestionar los datos de usuarios y mediciones de calidad del agua. Se implementaron módulos específicos para la creación y gestión de usuarios, así como para registrar las mediciones recibidas del prototipo electrónico.
- **Vista (View)**  
La vista en este contexto se refiere a la interfaz web que se presenta al usuario. En el backend, se maneja mediante plantillas y páginas HTML que se generan dinámicamente utilizando Thymeleaf, un motor de plantillas de Spring Boot.
- **Controlador (Controller)** El controlador actúa como intermediario entre el modelo y la vista. Gestiona las solicitudes HTTPS entrantes, interactúa con el modelo para obtener o almacenar datos y actualiza la vista en consecuencia a la solicitud HTTPS. Además, se implementaron controladores REST que exponen endpoints para las operaciones CRUD (crear, leer, actualizar y eliminar) de usuarios y mediciones.

### Gestión de usuarios y datos de mediciones

Para la implementación de la base de datos, se desarrollaron dos tablas en la base de datos. La primera tabla para almacenar la información básica de los usuarios, y se relacionó con la segunda tabla que almacena la información de medición de los sensores:

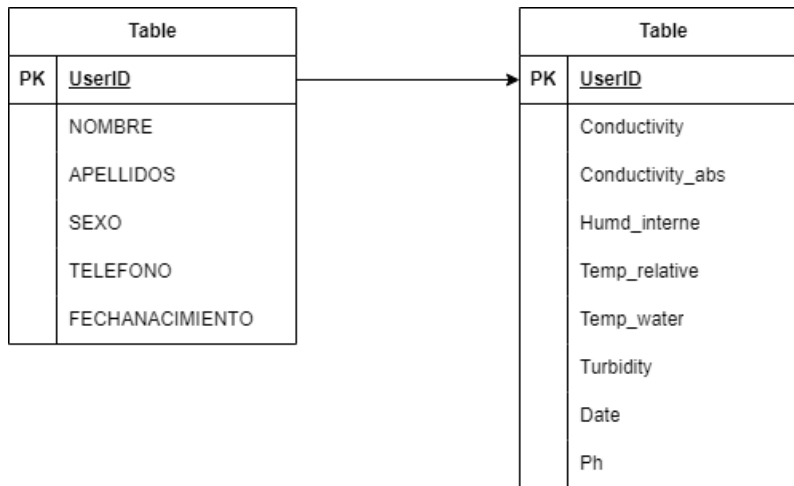


Diagrama 17: Modelo de tablas en base de datos

### 4.2.3 Desarrollo del Frontend

#### Estructuración del Contenido:

Se crearon diversas páginas web, incluyendo el formulario de inicio de sesión, la página principal del tablero, y las páginas de visualización de datos. Se utilizaron etiquetas HTML5 semánticas como <header>, <nav>, <main>, <section>, y <footer> para organizar el contenido de manera lógica y accesible.

#### Diseño y estilo visual

A continuación se ilustra el resultado de las diferentes páginas que fueron desarrolladas para la plataforma web de visualización de datos:

- Inicio de sesión:

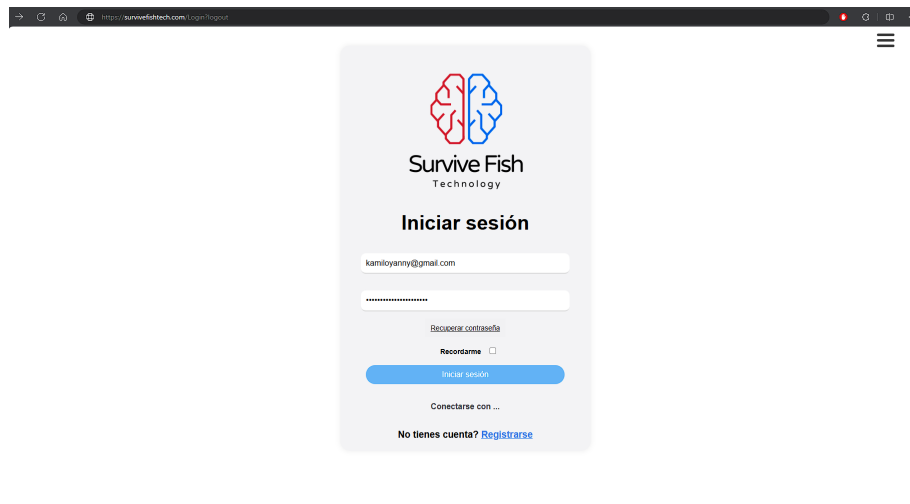


Figura 18: Inicio de sesión

- Página Principal:



Figura 19: Página de visualización de mediciones

#### 4.2.4 Alarmas del cultivo

Se implementó un sistema de alertas que notifica al piscicultor cuando alguna de las variables fisicoquímicas clave se encuentra fuera de los rangos óptimos recomendados. Específicamente, se establecieron alertas para los parámetros de temperatura del agua, pH y sólidos disueltos totales (TDS).

Cuando los sensores instalados detectan que alguno de estos valores se desvía de los umbrales predefinidos, el sistema envía automáticamente un correo electrónico al piscicultor registrado, alertándolo sobre la situación. Esto con el fin de que el piscicultor pueda tomar acción de manera oportuna y realizar los ajustes necesarios para mantener las condiciones idóneas para el cultivo.

El envío de alertas por correo electrónico se considera una de las formas más oportunas de notificación, ya que los correos pueden ser recibidos en cualquier dispositivo con acceso a internet. Incluso si el piscicultor no está conectado a la plataforma web en ese momento, el correo electrónico garantiza que la notificación llegue a todos los usuarios registrados en la aplicación y vinculados con el dispositivo de la piscícola. Esto introduce una redundancia en la comunicación, disminuyendo el riesgo de que el cultivo se vea comprometido en caso de que alguno de los usuarios notificados no se percate de las alertas.

Adicionalmente, las alertas también se visualizan en la plataforma web, donde se puede acceder a un historial de alertas enviadas para su revisión en cualquier momento.

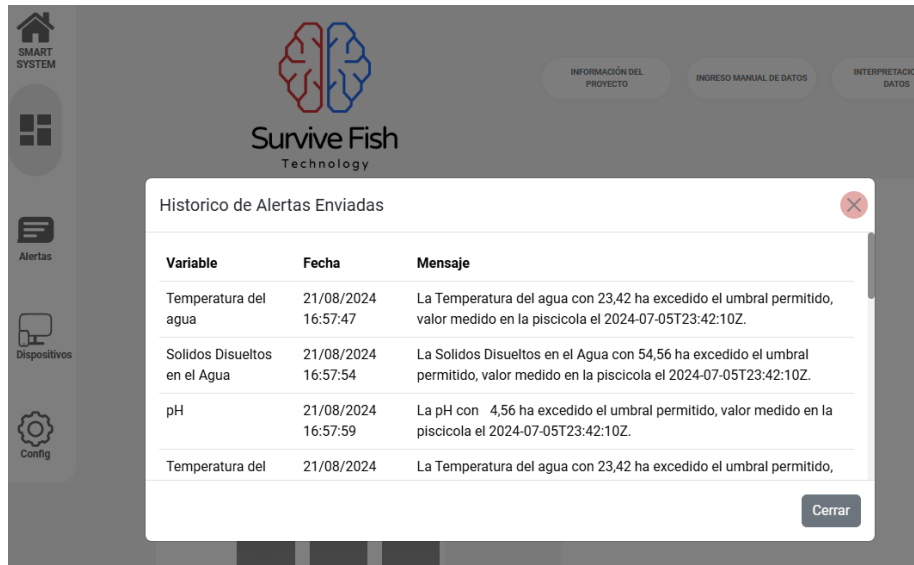


Figura 20: Alerta en plataforma web

En la siguiente figura se muestra un ejemplo del formato en el que se reciben las alertas por correo electrónico cuando alguna o algunas de las variables fisicoquímicas del cultivo no estan en el rango adecuado, mostrando la medición actual de la variable.

## Alert: Survive Fish: Valores fuera de rango

Alerta: Valores fuera de rango detectados en Survive Fish:  
 Temperatura del agua fuera de rango: 30.80  
 pH fuera de rango: 10.30

Figura 21: Correo de alerta

### 4.3 Despliegue en la nube - Amazon Web Service (AWS)

Este apartado detalla el proceso de despliegue de la aplicación en Amazon Web Services (AWS), abordando tanto los servicios utilizados como las configuraciones ne-

cesarias para garantizar el correcto funcionamiento y la seguridad del sistema. La infraestructura incluye varias instancias, servicios de almacenamiento, configuraciones de red, balanceadores de carga y un dominio personalizado. A continuación, se presentan los detalles de cada componente y su rol en el despliegue.



Figura 22: Logo AWS, Java y Elastic Beanstalk, herramientas que se usaran para este despliegue.

- **Elastic Beanstalk para la Aplicación Principal** Se utilizó AWS Elastic Beanstalk para desplegar el archivo ejecutable .jar de la aplicación Java principal. Este servicio permitió la gestión automática de recursos, asegurando la escalabilidad y la alta disponibilidad. Durante este proceso:

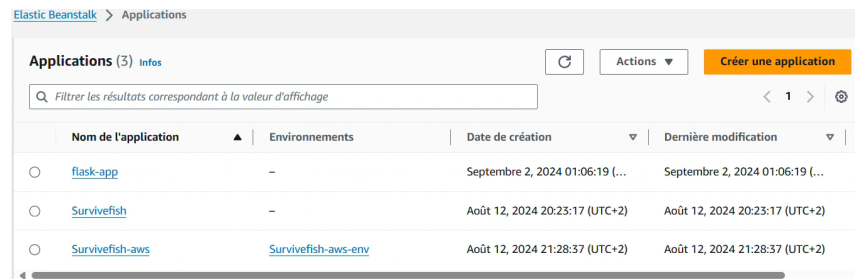


Figura 23: Captura de la consola de Elastic Beanstalk con las versiones desplegadas.

Se configuraron varias versiones de la aplicación, permitiendo probar y seleccionar la versión más estable.

Se habilitó un balanceador de carga para distribuir el tráfico entrante entre las instancias de la aplicación.

Objets (26) Info

Les objets sont les entités fondamentales stockées dans Amazon S3. Vous pouvez utiliser l'[inventaire Amazon S3](#) pour obtenir une liste de tous les objets de votre compartiment. Pour que d'autres personnes puissent accéder à vos objets, vous devez leur accorder explicitement des autorisations. [En savoir plus](#)

Rechercher des objets en fonction du pr. < 1 > ⚙️

<input type="checkbox"/>	Nom	Type	Dernière modification	Taille	Classe de stockage
<input type="checkbox"/>	<a href="#">Survive_Fish_App-3.0.1-SNAPSHOT.jar</a>	jar	13 Aug 2024 11:40:05 PM CEST	66.7 Mo	Standard
<input type="checkbox"/>	<a href="#">1723585782017-Survive_Fish_App-3.0.1-SNAPSHOT.jar</a>	jar	13 Aug 2024 11:49:43 PM CEST	66.7 Mo	Standard
<input type="checkbox"/>	<a href="#">1723586074033-Survive_Fish_App-3.0.1-SNAPSHOT.jar</a>	jar	13 Aug 2024 11:54:35 PM CEST	66.7 Mo	Standard
<input type="checkbox"/>	<a href="#">1723816215854-Survive_Fish_App-3.0.1-SNAPSHOT.jar</a>	jar	16 Aug 2024 03:50:17 PM CEST	67.0 Mo	Standard
<input type="checkbox"/>	<a href="#">1724277556975-Survive_Fish_App-3.0.1-SNAPSHOT.jar</a>	jar	21 Aug 2024 11:59:18 PM CEST	65.6 Mo	Standard
<input type="checkbox"/>	<a href="#">1724279789199-Survive_Fish_App-3.0.1-SNAPSHOT.jar</a>	jar	22 Aug 2024 12:36:30 AM CEST	65.7 Mo	Standard

Figura 24: Captura de la consola de Elastic Beanstalk con las versiones desplegadas.

- **Base de Datos RDS** Se utilizó **AWS RDS (Relational Database Service)** como base de datos para la aplicación. Se configuró una instancia de base de datos compatible con MySQL/PostgreSQL (según la necesidad del proyecto), asegurándose de:
  - Aislar la base de datos dentro de una **VPC** para mayor seguridad.
  - Configurar accesos mediante **grupos de seguridad** que permitieran solo conexiones desde la aplicación desplegada en Elastic Beanstalk.

RDS > Bases de données > awseb-e-3pkvknq6ym-stack-awsebrdsdatabase-2u9kbsawzegw

awseb-e-3pkvknq6ym-stack-awsebrdsdatabase-2u9kbsawzegw

**Récapitulatif**

Identifiant de base de données awseb-e-3pkvknq6ym-stack-awsebrdsdatabase-2u9kbsawzegw	Statut 🟢 Disponible Classe db.t3.small	Rôle Instance Activité actuelle 0 Connexions	Moteur MySQL Community Région et AZ us-east-2b	Recommandations
Processeur 3.52%				

Figura 25: Configuración de la instancia RDS y sus parámetros.

- **Configuración de VPC** Para garantizar una comunicación segura entre los componentes de la infraestructura, se configuró una **Virtual Private Cloud (VPC)** que incluyó:

- Subredes públicas y privadas para segmentar el tráfico.
- **Rutas** que dirigieran el tráfico hacia los balanceadores de carga y las instancias correspondientes.
- **Grupos de seguridad** para limitar el acceso basado en IP y puertos.

Name	ID de VPC	État	CIDR IPv4	CIDR IPv6
Survivefish-vpc	vpc-0e446fb9766ea90d	Available	10.0.0.0/16	-
-	vpc-0b1ec66f025519f74	Available	172.31.0.0/16	-

Figura 26: Arquitectura de la VPC con las subredes configuradas.

- **Certificados SSL y Dominio Personalizado** Se utilizó **AWS Certificate Manager** para generar certificados SSL que habilitaran conexiones seguras mediante HTTPS. Adicionalmente, se:
  - Compró un dominio personalizado en **Route 53** y se asoció a la dirección IP pública del balanceador de carga.
  - Configuró la resolución DNS para dirigir el tráfico al dominio comprado.

Nom de domaine	Type	Statut	En cours d'utilisation	Éligibilité au renouvellement	Algorithme de clé
survivefish.com	Émis par Amazon	Émis	Oui	Éligible	RSA 2048

Figura 27: Configuración del certificado SSL en Certificate Manager.

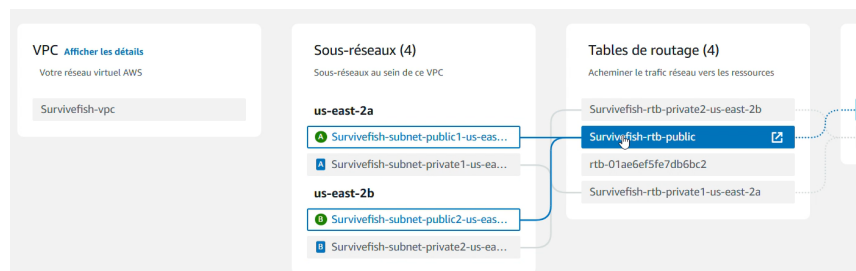
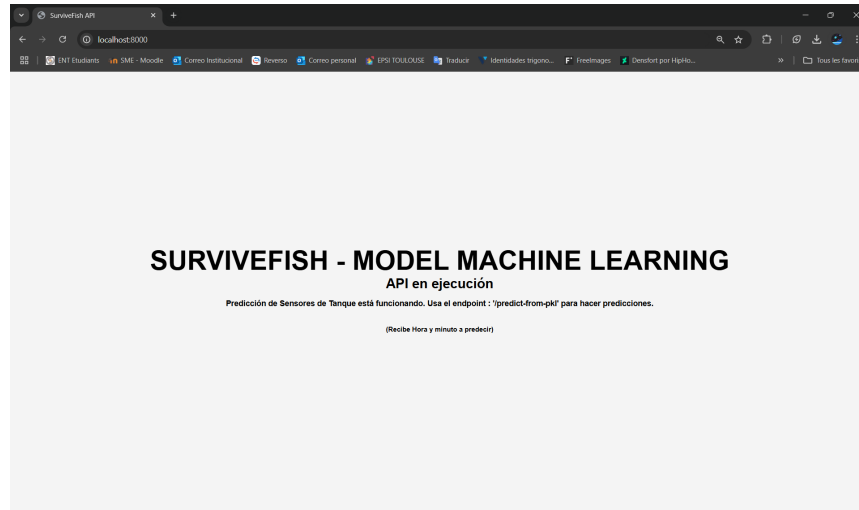


Figura 28: Configuración de dominios en Route 53.

- **Elastic Beanstalk para Modelos de Machine Learning** Una segunda aplicación fue desplegada en Elastic Beanstalk, dedicada a alojar los modelos de Machine Learning. Este despliegue incluyó:

- Creación de un **endpoint** para consumir los modelos desde la aplicación principal.
- Implementación de una pequeña página HTML para verificar el estado de los servicios.



- **Roles y Permisos IAM** Para gestionar el acceso a los recursos, se configuraron roles y permisos a través de AWS Identity and Access Management (IAM). Esto aseguró que:

Cada servicio tuviera los permisos mínimos necesarios para operar.

Se gestionaran roles específicos para tareas como acceso a RDS, S3 o Elastic Beanstalk.

**Rôles (10) Infos** 🔄 Supprimer Créer un rôle

Un rôle IAM est une identité que vous pouvez créer et qui dispose d'autorisations spécifiques avec des informations d'identification valides pendant de courtes durées. Les rôles peuvent être endossés par des entités de confiance.

🔍 Rechercher < 1 > ⚙️

<input type="checkbox"/>	Nom du rôle ▲	Entités de confiance	Dernière activité ▼
<input type="checkbox"/>	<a href="#">aws-elastic-beanstalk-ec2-role</a>	Service AWS: ec2	Il y a 15 minutes
<input type="checkbox"/>	<a href="#">aws-elasticbeanstalk-ec2-role</a>	Service AWS: elasticbeanstalk	-
<input type="checkbox"/>	<a href="#">aws-elasticbeanstalk-service-role</a>	Service AWS: elasticbeanstalk	Il y a 17 minutes
<input type="checkbox"/>	<a href="#">AWSServiceRoleForAutoScaling</a>	Service AWS: autoscaling (Rôle lié à un s	Il y a 14 minutes
<input type="checkbox"/>	<a href="#">AWSServiceRoleForElasticBeanstalk</a>	Service AWS: elasticbeanstalk (Rôle l	-
<input type="checkbox"/>	<a href="#">AWSServiceRoleForElasticLoadBalancing</a>	Service AWS: elasticloadbalancing (R	Il y a 9 heures
<input type="checkbox"/>	<a href="#">AWSServiceRoleForRDS</a>	Service AWS: rds (Rôle lié à un servic	Il y a 8 minutes
<input type="checkbox"/>	<a href="#">AWSServiceRoleForSupport</a>	Service AWS: support (Rôle lié à un s	-
<input type="checkbox"/>	<a href="#">AWSServiceRoleForTrustedAdvisor</a>	Service AWS: trustedadvisor (Rôle lié	-
<input type="checkbox"/>	<a href="#">rds-monitoring-role</a>	Service AWS: monitoring.rds	-

Figura 30: Políticas IAM configuradas para los servicios.

El despliegue en AWS garantizó una infraestructura robusta, escalable y segura para la aplicación principal y los modelos de Machine Learning. Los servicios como Elastic Beanstalk, RDS y VPC jugaron un rol clave en la integración y el rendimiento del sistema. Las configuraciones adicionales, como los certificados SSL y el dominio personalizado, reforzaron la seguridad y la accesibilidad del sistema.

#### 4.4 Implementación de modelos predictivos

Para mejorar la capacidad de monitoreo y control de la calidad del agua en la piscicultura, se ha implementado un modelo de predicción basado en técnicas de *machine learning*. El desarrollo de este modelo se llevó a cabo utilizando el lenguaje de programación Python y varias librerías especializadas como Scikit-learn, Pandas, NumPy y SQLAlchemy, que facilitaron tanto el tratamiento de datos como las solicitudes a la base de datos SQL.

Siguiendo principios de programación orientada a objetos, se implementó una clase llamada TankPredictor, la cual encapsula toda la lógica necesaria para realizar predicciones sobre las variables fisicoquímicas del agua. Esta clase constituye el núcleo del sistema de predicción. Contiene los modelos entrenados para cada variable crítica del sistema, como la temperatura, conductividad, pH y sólidos disueltos totales (TDS). Además, incluye métodos para procesar los datos de entrada, generar predicciones y entrenar los modelos.

Los métodos principales de la clase `TankPredictor` son:

**`obtener_datos_desde_sql()`**

Función encargada de realizar consultas a la base de datos SQL para extraer la información necesaria que alimentará los modelos predictivos.

**`predecir()`**

Encargado de generar las predicciones de las variables fisicoquímicas utilizando modelos previamente entrenados, retornando un diccionario que contiene dichas predicciones.

A continuación se presenta una imagen con la información que retorna el método `predecir` y el error de cada variable (%).

```
----- Predicción en hora=1 , minuto=4 -----  
DecisionTreeRegressor_water_temperature: 24.10 (Error Margin: 0.248214)  
DecisionTreeRegressor_conductivity: 4.10 (Error Margin: 4.096994)  
DecisionTreeRegressor_conductivity_absolute: 89.30 (Error Margin: 4.440956)  
DecisionTreeRegressor_tds: 45.35 (Error Margin: 2.028480)  
DecisionTreeRegressor_ph: 6.60 (Error Margin: 0.514975)
```

Figura 31: Información que retorna el método `predecir`

Para hacer que estas predicciones sean accesibles y útiles para los usuarios, se ha integrado el sistema de predicción con la plataforma web. El proceso de integración funciona de la siguiente manera:

- Preparación y configuración del servidor Flask: Se especifican el puerto y las direcciones IP en las cuales el servidor escuchará, además de las rutas necesarias para cargar el modelo previamente entrenado. También se configura una página raíz para verificar que el servidor y el modelo están funcionando correctamente y se establece un endpoint para solicitar el servicio de predicción.
- Despliegue en un servidor de AWS (Amazon Web Services): Se exponen los puertos de escucha y se establece comunicación con la base de datos.
- Solicitud de predicciones: Cuando se realiza una solicitud a la ruta `/predict-from-pkl` con el método POST, indicando la hora a predecir, el servidor ejecuta el método de predicción y obtiene un diccionario con los resultados.
- Este diccionario se convierte a formato lista para poder ser utilizado en un JSON, facilitando su transmisión y uso por la plataforma web.
- El servidor envía esta respuesta JSON al cliente web.

- En el lado del cliente, un script JavaScript realiza solicitudes periódicas a esta ruta del servidor.
- Cuando recibe la respuesta JSON, el script JavaScript del front-end actualiza la interfaz de usuario de forma asincrónica con las nuevas predicciones.
- El usuario puede hacer uso del botón *Horas* para especificar las horas hacia las que desea predecir las variables fisicoquímicas del agua.

En la figura 32 se presentan los modelos predictivos implementados en la plataforma web.

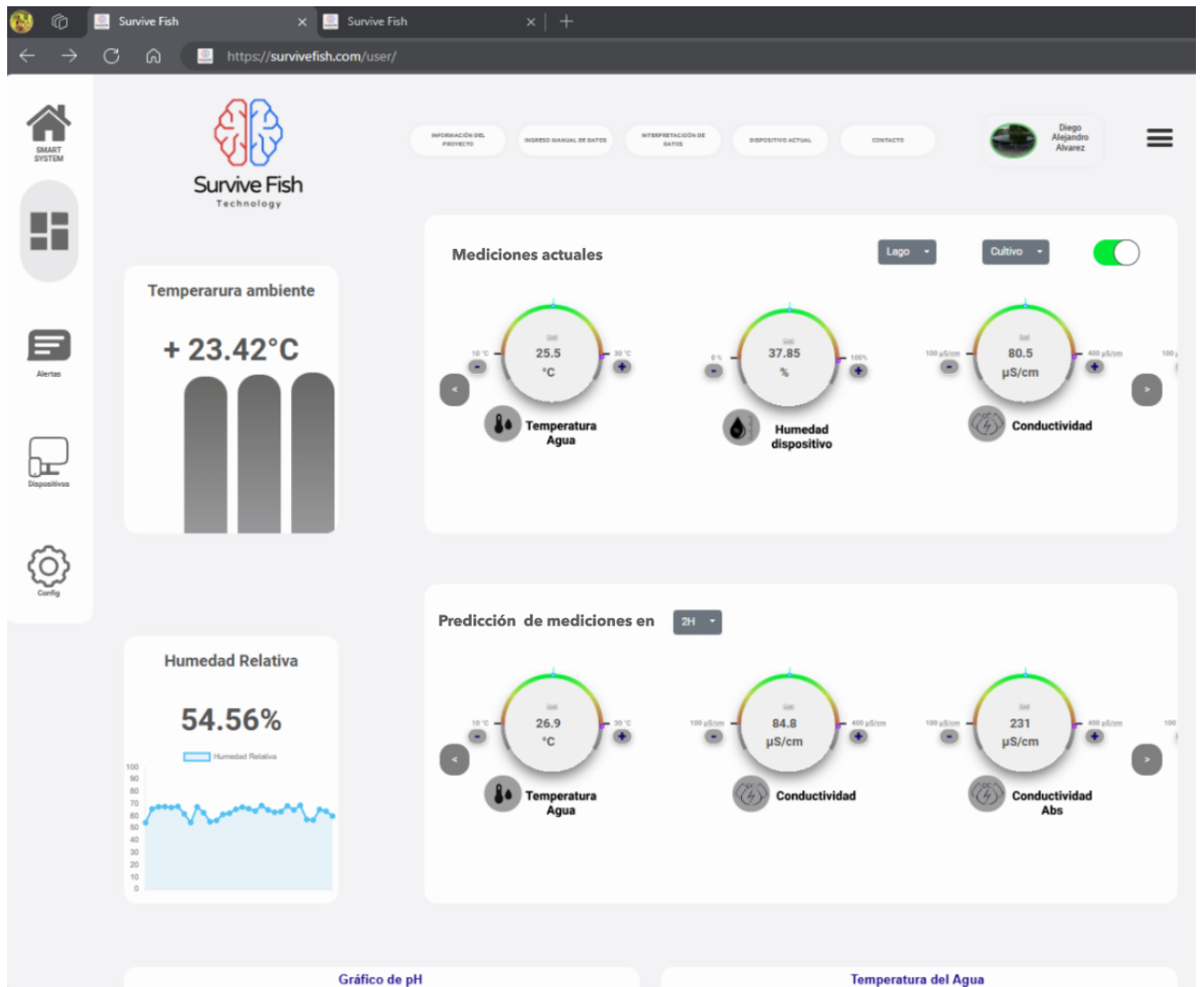


Figura 32: Modelos predictivos implementados en la interfaz web

## 4.5 Conclusión del capítulo

La implementación del sistema de monitoreo de calidad del agua logró integrar con éxito hardware y software, combinando sensores precisamente calibrados de pH, conductividad, TDS y temperatura con una plataforma robusta de recolección y visualización de datos. El sistema demuestra adaptabilidad en sus mediciones, particularmente en pH y conductividad, mediante el uso de ecuaciones específicas y compensación de temperatura. Se incorporaron medidas de protección del hardware y eficiencia energética, junto con mecanismos de redundancia en el almacenamiento de datos y robustez ante fallos. La integración de una interfaz web y una base de datos facilita el acceso y análisis de la información recolectada, mientras que la preparación para la incorporación de modelos de machine learning sienta las bases para análisis predictivos. En conjunto, estas características resultan en un sistema versátil y confiable, capaz de proporcionar monitoreo preciso y continuo de la calidad del agua.

## 5 Pruebas y análisis de resultados

En este capítulo, abordaremos la fase de evaluación del proyecto. Nuestro objetivo es validar los resultados obtenidos frente a los requerimientos establecidos, garantizando así su cumplimiento. Para ello, presentaremos la información de manera estructurada, abarcando el hardware, el software y los modelos predictivos desarrollados. Además, se incluye una tabla con los resultados obtenidos comparados con los requerimientos establecidos.

### Hardware

Para asegurar la precisión de las mediciones realizadas por el dispositivo diseñado, se llevaron a cabo pruebas en la piscícola, comparando las mediciones del dispositivo diseñado con las del instrumento de referencia mencionado en el apartado 4.1.2 del documento, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 16: Comparación de temperatura entre dispositivo diseñado y referencia

Día	Temperatura Referencia (°C)	Temperatura Dispositivo (°C)	Error (%)
2024-03-22	27.0	27.2	0.7
2024-03-23	24.5	24.6	0.4
2024-03-24	26.2	26.1	0.4
2024-03-25	26.1	25.9	0.8
2024-03-26	26.8	26.9	0.4
2024-03-27	27.0	26.8	0.7

En la tabla 16 se presenta el error porcentual que varía entre 0.4% y 0.8%, lo que indica una alta precisión del dispositivo diseñado en comparación con el dispositivo de referencia, esta consistencia sugiere que el dispositivo diseñado es fiable y adecuado para mediciones de temperatura del agua en la piscícola, también se puede mencionar que la temperatura medida durante esa semana estuvo dentro del rango óptimo para la tilapia roja.

Tabla 17: Comparación de pH entre dispositivo diseñado y referencia

<b>Día</b>	<b>pH Referencia</b>	<b>pH Dispositivo</b>	<b>Error (%)</b>
2024-03-22	6.70	6.57	1.9
2024-03-23	6.86	6.73	1.9
2024-03-24	7,23	7,37	2,0
2024-03-25	7,80	7,68	1,6
2024-03-26	8,46	8,29	2,0
2024-03-27	9,41	9,64	2,4

En la tabla 17 se puede observar que el error porcentual varía entre 1.6% y 2.4%, lo que indica una precisión aceptable del dispositivo diseñado en comparación con la referencia. Esta estabilidad sugiere que el dispositivo diseñado es fiable y puede ser utilizado para mediciones de pH con una precisión razonable dentro de la piscícola. Cabe resaltar que el pH durante esa semana estuvo en condiciones óptimas para la especie, excepto el último día, cuando superó los límites aceptables para esta variable.

Tabla 18: Comparación de TDS entre dispositivo diseñado y referencia

<b>Día</b>	<b>TDS Referencia</b>	<b>TDS Dispositivo</b>	<b>Error (%)</b>
2024-03-22	264.3	246.4	6.8
2024-03-23	267.8	249.1	7.0
2024-03-24	268.2	248.1	7.5
2024-03-25	270.7	253.9	6.2
2024-03-26	273.1	250.4	8.3
2024-03-27	280.3	263.5	6.0

La Tabla 18 presenta una comparación detallada entre las mediciones de TDS (Sólidos Disueltos Totales) obtenidas por el dispositivo diseñado y el dispositivo de referencia. El sensor empleado en nuestro dispositivo, con una precisión especificada de  $\pm 10\%$  FS (escala completa), exhibe un error máximo del 8.3% en las mediciones realizadas, lo cual no solo se encuentra dentro de los parámetros técnicos establecidos, sino que también proporciona un nivel de precisión suficiente para las aplicaciones prácticas en acuicultura. Significativamente, los valores de TDS registrados por nuestro dispositivo (rango de 246.4-263.5 ppm) se sitúan cómodamente dentro del intervalo aceptable de 20-450 ppm establecido para la acuicultura de tilapia [29], reforzando así la idoneidad y eficacia del dispositivo para el monitoreo confiable de la condición del agua.

Es fundamental comprender que entre las variables TDS y temperatura no existe una relación lineal directa. El TDS se obtiene a partir de la conductividad eléctrica normalizada a 25°C (EC25), mediante un proceso de dos etapas: primero, se aplica una compensación térmica utilizando la ecuación 5 para normalizar la conductividad; posteriormente, se calcula el TDS aplicando un factor de conversión de 0.5 según la ecuación 10. En este proceso, la temperatura funciona como un parámetro de corrección en el cálculo de la conductividad normalizada (EC25), y no como una constante que afecte directamente la determinación del TDS.

### Software

En las figuras 33 y 34 se presenta la llegada de los datos de los sensores a la base de datos construida en SQL y plataforma web diseñada. La interfaz web permite ver las mediciones de los sensores en línea, facilitando el monitoreo continuo del estado del agua. Los datos recolectados se almacenan en la base de datos y se pueden visualizar en gráficos históricos, lo que ayuda a identificar tendencias y patrones a lo largo del tiempo, Las figuras 33 y 34 evidencian la correcta integración de todos los componentes del sistema.

	id	conductivity	conductivity_abs	humd_interne	humd_relative	temp_relative	temp_water	turbidity	date	ph
<input type="checkbox"/>	1	243.2	234.1	63.26	57.1	29.1	27	121.6	NULL	8.7
<input type="checkbox"/>	2	245.3	236.3	63.08	56.8	29.3	27	122.65	NULL	8.8
<input type="checkbox"/>	3	245.3	236.3	63.08	56.8	29.3	27	122.65	NULL	8.8
<input type="checkbox"/>	4	242.4	233.5	62.93	56.5	29.3	27	121.2	NULL	8.6
<input type="checkbox"/>	5	245.3	236.7	63.07	56.5	29.3	26.9	122.65	NULL	9.1
<input type="checkbox"/>	6	245.3	236.7	63.07	56.5	29.3	26.9	122.65	NULL	9.1
<input type="checkbox"/>	7	245.3	236.7	63.07	56.5	29.3	26.9	122.65	NULL	9.1
<input type="checkbox"/>	8	245.3	236.7	63.07	56.5	29.3	26.9	122.65	NULL	9.1
<input type="checkbox"/>	9	245.3	236.7	63.07	56.5	29.3	26.9	122.65	NULL	9.1
<input type="checkbox"/>	10	245.3	236.7	63.07	56.5	29.3	26.9	122.65	NULL	9.1
<input type="checkbox"/>	11	245.3	236.7	63.07	56.5	29.3	26.9	122.65	NULL	9.1
<input type="checkbox"/>	12	245.3	236.7	63.07	56.5	29.3	26.9	122.65	NULL	9.1
<input type="checkbox"/>	13	238.1	229.8	61.11	58.5	28.6	26.8	119.05	NULL	7.2
<input type="checkbox"/>	14	238.1	229.8	61.11	58.5	28.6	26.8	119.05	NULL	7.2
<input type="checkbox"/>	15	238.1	229.8	61.11	58.5	28.6	26.8	119.05	NULL	7.2
<input type="checkbox"/>	16	238.1	229.8	61.11	58.5	28.6	26.8	119.05	NULL	7.2
<input type="checkbox"/>	17	238.1	229.8	61.11	58.5	28.6	26.8	119.05	NULL	7.2
<input type="checkbox"/>	18	238.1	229.8	61.11	58.5	28.6	26.8	119.05	NULL	7.2
<input type="checkbox"/>	19	238.1	229.8	61.11	58.5	28.6	26.8	119.05	NULL	7.2
<input type="checkbox"/>	20	238.1	229.8	61.11	58.5	28.6	26.8	119.05	NULL	7.2

Figura 33: Base de datos con información de los sensores

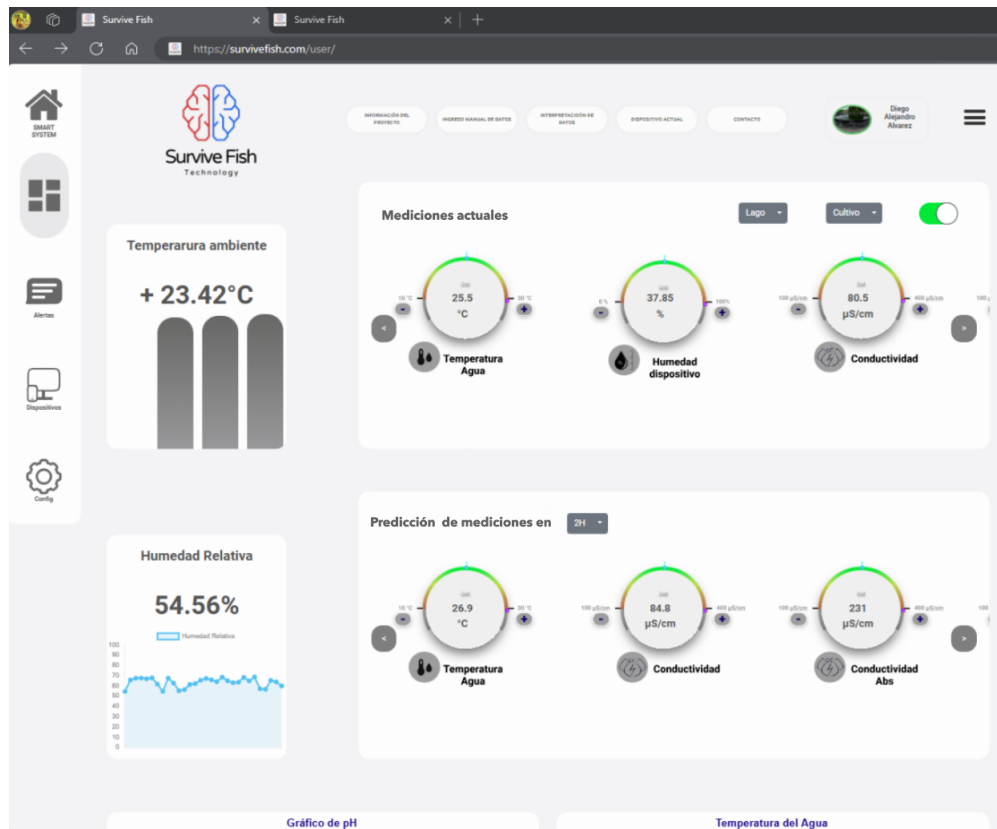


Figura 34: Visualización de datos en plataforma web diseñada

### Modelos predictivos

De acuerdo con las predicciones del modelo desarrollado, se realizó una prueba comparativa entre los valores predichos y las mediciones tomadas por los sensores. Para ello, se seleccionó un día operativo de la piscícola y se analizaron las mediciones y predicciones durante un período de 7 horas, con intervalos de aproximadamente 1 hora. Es importante destacar que las mediciones se realizaron en los momentos exactos para los cuales se habían hecho las predicciones, asegurando así una comparación directa y precisa entre los valores predichos y los medidos. A continuación, se presentan los gráficos obtenidos y una tabla para cada variable resumiendo los resultados.

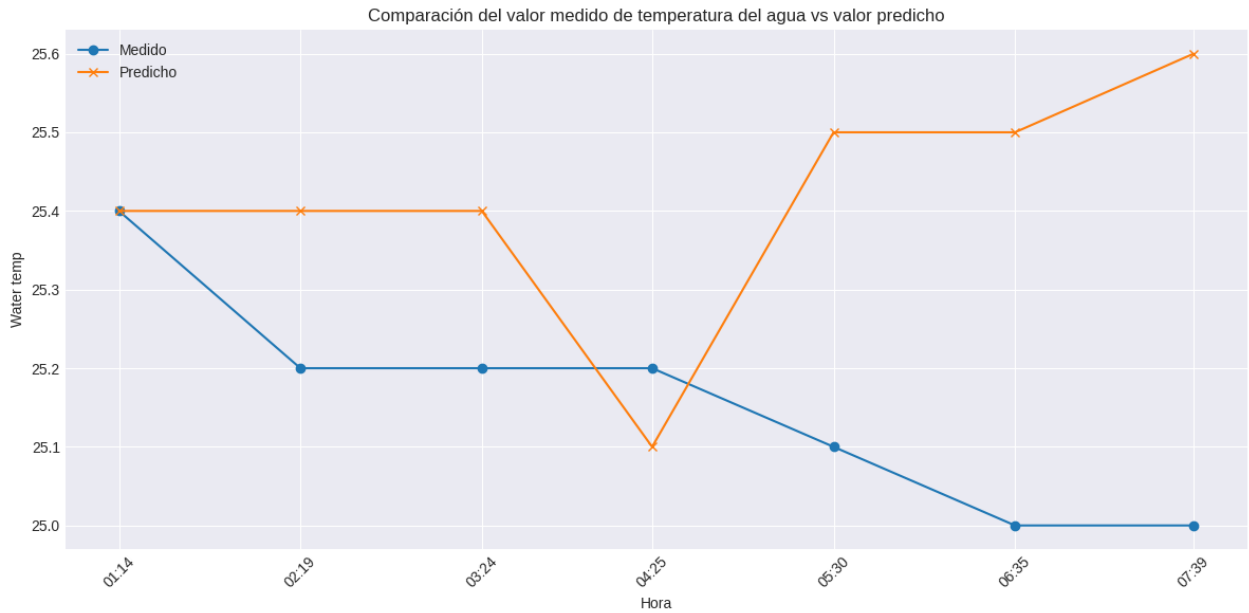


Figura 35: Comparación del valor medido de temperatura del agua vs valor predicho

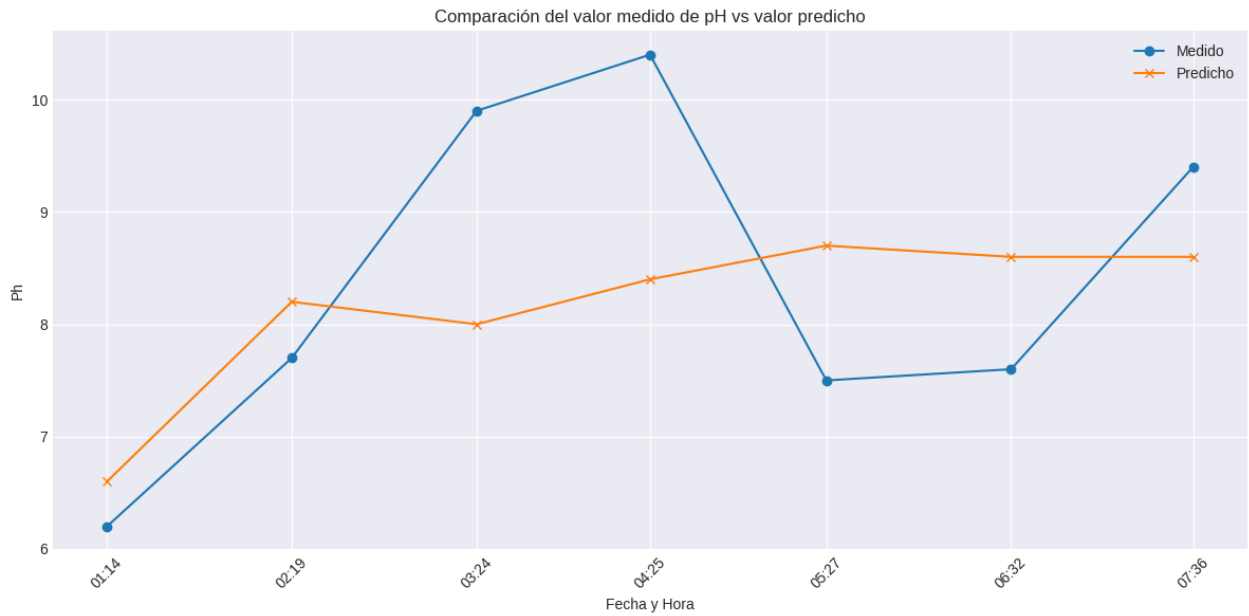


Figura 36: Comparación del valor medido de pH vs valor predicho

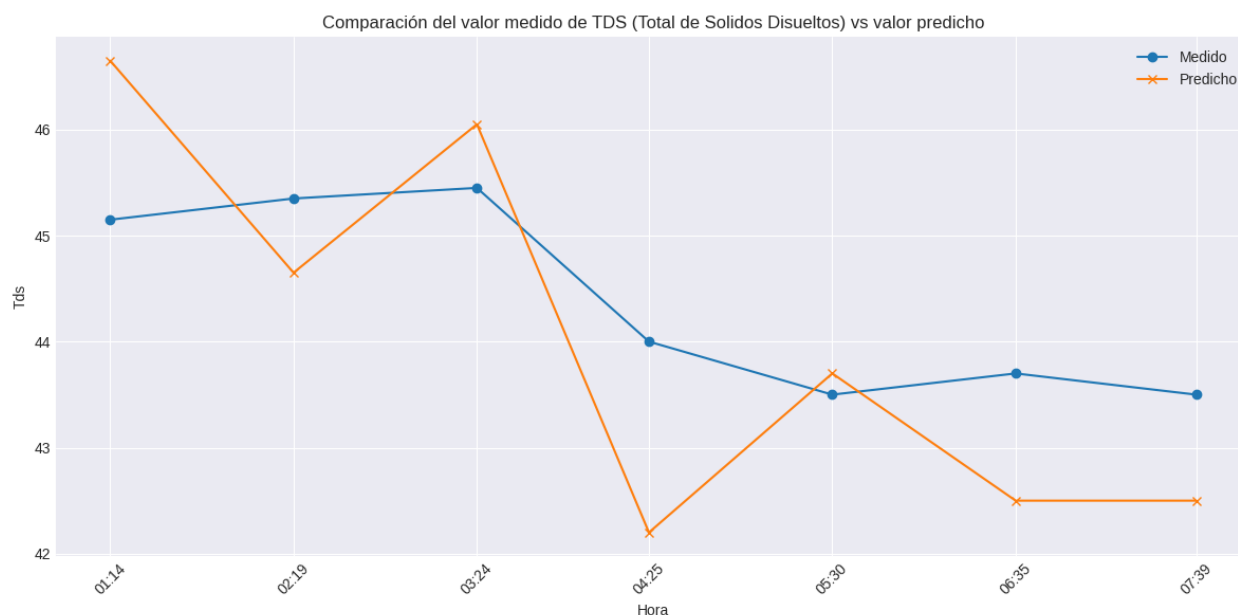


Figura 37: Comparación del valor medido de TDS (Total de Solidos Disueltos) vs valor predicho

Las figuras 35, 36 y 37 ilustran la relación entre los valores medidos y predichos de las variables analizadas. En cada figura, el eje x representa las horas específicas de medición y predicción, mientras que el eje y muestra la magnitud de la variable. La línea azul indica los valores medidos, y la naranja, los predichos.

Tabla 19: Asertividad temperatura del agua

Hora (pm)	Temperatura medida	Temperatura predicha	Asertividad
1:14	25,4	25,4	100,0 %
2:19	25,2	25,4	99,6 %
3:24	25,2	25,4	99,2 %
4:25	25,2	25,1	99,6 %
5:27	25,1	25,5	98,4 %
6:32	25	25,5	98,4 %
7:36	25	25,6	97,6 %

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 19 en las primeras 4 horas, el error de predicción está por debajo del 1%, lo cual es excelente. Esto indica que el modelo está logrando predecir la temperatura del agua con mucha precisión a corto plazo. A medida que aumenta el horizonte de predicción, el error va incrementándose ligeramente, llegando a un 2.4% para la predicción a 7 horas. Esto sigue siendo un error muy bajo, lo que demuestra que el modelo mantiene un buen desempeño incluso a mediano plazo. La comparación entre los valores medidos y predichos, mostrada en la figura 31, confirma la estabilidad y precisión del modelo.

Tabla 20: Asertividad pH

Hora (pm)	pH	pH predicho	Asertividad
1:14	6,2	6,6	93,5 %
2:19	7,7	8,2	93,5 %
3:24	9,9	8	80,8 %
4:25	10,4	9,9	95,2 %
5:27	7,5	8,4	88,0 %
6:32	7,6	8,7	85,5 %
7:36	9,4	8,6	91,5 %

En la tabla 20, se puede observar que la asertividad del pH mantiene valores altos, por encima del 80% en la mayoría de los horarios. Esto indica que el modelo de predicción de pH tiene un buen desempeño y es capaz de pronosticar los valores de pH, con lo cual también se destaca que tiene oportunidad de mejora del modelo para esta variable, la comparación del valor medido versus el predicho se puede apreciar en la figura 36

Tabla 21: Asertividad TDS

Hora (pm)	TDS medido	TDS predicho	Asertividad
1:14	45,15	46,65	96,7 %
2:19	45,35	44,65	98,5 %
3:24	45,45	46,05	98,7 %
4:25	44	42,2	95,9 %
5:27	43,5	43,7	99,5 %
6:32	43,7	42,5	97,3 %
7:36	43,5	42,5	97,7 %

Los resultados de la tabla 21 muestran que el modelo de predicción de TDS tiene un excelente desempeño, con una asertividad superior al 95 % en todas las siete horas de predicción. Esto indica que el piscicultor puede confiar en las predicciones de TDS para tomar decisiones informadas sobre el manejo del cultivo, ya que estas estimaciones reflejan con alta precisión las condiciones reales del agua. El gráfico de comparación del valor medido versus el predicho se puede apreciar en la figura 37.

Los resultados obtenidos muestran que los modelos predictivos desarrollados tienen un buen desempeño en la predicción de la temperatura del agua y el TDS, con un porcentaje de asertividad por encima del 98 % para la temperatura del agua y un porcentaje superior al 96 % para los TDS, ambos consistentemente altos. Sin embargo, hay margen de mejora en la predicción del pH, que alcanzó un porcentaje de asertividad mínimo del 80,8 %. A medida que se extienden las horas de predicción, el error tiende a aumentar para todos los modelos.

Durante estas pruebas, se contó con la presencia del encargado de la piscícola, con el fin de brindar capacitación sobre el funcionamiento del sistema, la visualización de los datos y las predicciones en línea de las variables fisicoquímicas del agua medidas, lo cual se evidencia en la figura 38.



Figura 38: Capacitación al piscicultor sobre la plataforma desarrollada

### **Opiniones de los usuarios que probaron la plataforma**

Para validar la eficacia y usabilidad de la plataforma web desarrollada, se realizó una encuesta a once personas, incluyendo al piscicultor que implementó el sistema en su explotación piscícola, el resumen de esta encuesta se encuentra en la sección de anexos en el apartado 9.4. El objetivo principal fue evaluar la facilidad de uso, la claridad en la presentación de la información y la disposición a recomendar la plataforma. La encuesta se diseñó con dos niveles de profundidad, un conjunto general de preguntas para todos los participantes y un cuestionario más detallado para el piscicultor, enfocado en aspectos específicos del uso del sistema en su entorno de producción.

Los resultados de la encuesta revelaron los siguientes resultados:

- **Presentación de datos:** La presentación de los datos (gráficos, mediciones) y la claridad de la información sobre las variables fisicoquímicas fue calificada positivamente. El 54.5% la consideró “excelente”, el 36.4% “buena”, y el 9.1% “adecuada”. Esto indica que el sistema comunica eficazmente datos de manera comprensible para la gran mayoría de los usuarios.
- **Facilidad de uso:** Los usuarios encontraron que la plataforma web es fácil e intuitiva de usar. El 45.5% la calificó como “muy fácil” (5 de 5), otro 45.5%

como “fácil” (4 de 5), y solo el 9.1 % como “neutral” (3 de 5). Esto sugiere que la interfaz es intuitiva y amigable para la mayoría de los usuarios.

- Recomendación: Todos los usuarios (100 %) indicaron que recomendarían esta plataforma a otros usuarios. Este alto nivel de recomendación indica una satisfacción general del sistema.

### **Análisis específico del piscicultor**

- Frecuencia de uso: El piscicultor utiliza la plataforma web con frecuencia, específicamente 2-3 veces por semana. Esto indica un compromiso regular con el sistema y sugiere que lo encuentra útil para sus operaciones.
- Efectividad: El piscicultor concuerda en que el sistema ofrece una solución eficaz para el monitoreo de variables fisicoquímicas en su piscícola. Esta funcionalidad se alinea con el propósito del proyecto de proporcionar herramientas que permitan mejorar la gestión en entornos piscícolas.
- Efectividad: El piscicultor está de acuerdo en que el sistema proporciona una solución efectiva para el monitoreo de variables fisicoquímicas en su piscícola. Esto se alinea con el objetivo del proyecto de mejorar la eficiencia operativa en las explotaciones piscícolas.
- Sistema de alertas: El piscicultor está satisfecho con el sistema de alertas que notifica cuando las variables fisicoquímicas se salen del rango apropiado. Esta característica contribuye a intervenciones más oportunas y una mejor gestión del ambiente acuícola.
- Modelos predictivos: El usuario ha utilizado la función de predicción de las variables y está de acuerdo en que los modelos predictivos de variables fisicoquímicas del agua han proporcionado una herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Esto valida la utilidad del componente de aprendizaje automático del proyecto y su aplicación práctica en el campo.

### **Retroalimentación del sistema**

Como retroalimentación brindada por los usuarios se destacan los siguientes puntos, los cuales se tendrán en cuenta para trabajos futuros debido a que los objetivos planteados inicialmente ya se han alcanzado exitosamente.

- Interfaz: Simplificar visualización, mejorar indicadores y gráficos.
- Técnico: Optimizar velocidad y compatibilidad entre dispositivos móviles.
- Características: Ampliar detalles de predicciones y tipos de mediciones.
- Experiencia de usuario: Facilitar aun más la interpretación de datos.

A continuación se presenta una tabla que resume los resultados obtenidos del proyecto frente a los requerimientos establecidos.

Tabla 22: Balance general de los resultados obtenidos

<b>Objetivo Específico</b>	<b>Realización (%)</b>
<b>Identificar las necesidades sobre la calidad del agua del cultivo piscícola.</b>	100 %
T1.1 Identificación de necesidades y requerimientos del trabajo de campo.	100 %
T1.2 Reuniones con piscicultores para ajustar la solución propuesta según los requerimientos, basadas en trabajos de campo.	100 %
T1.3 Revisión de investigaciones y trabajos de grado para identificar avances y aplicar recomendaciones relevantes al proyecto.	100 %
T1.4 Identificación y reconocimiento del terreno para futura instalación del prototipo	100 %
T1.5 Identificación y reconocimiento del terreno para futura instalación del prototipo	100 %
T1.6 Obtención de datos históricos de parámetros fisicoquímicos del agua de los piscicultores del proyecto.	100 %
<b>Diseñar un sistema electrónico de medición en línea que permita obtener datos sobre calidad del agua del cultivo.</b>	100 %
T2.1 Selección de las variables a medir de acuerdo a requerimientos	100 %
T2.2 Definición de protocolos de comunicación de sensores e inalámbricos del dispositivo	100 %
T2.3 Diseño de PCB modular	100 %

<b>Objetivo Específico</b>	<b>Realización (%)</b>
<b>Implementar el prototipo del sistema electrónico diseñado.</b>	100 %
T3.1 Implementar y testear el diseño en una protoboard.	100 %
T3.2 Programar, calibrar y conectar los sensores al sistema embebido.	100 %
T3.3 Implementar el sistema electrónico en una PCB	100 %
T3.4 Realizar pruebas de funcionamiento de la PCB	100 %
<b>Comunicar el prototipo y almacenar los datos sobre la calidad del agua y visualizarlos en una página web.</b>	100 %
T4.1 Selección del protocolo de comunicación IoT del dispositivo	100 %
T4.2 Selección del hosting que permita subir la página web	100 %
T4.3 Diseño de página web con login de usuarios y mostrar variables del agua en línea	100 %
T4.4 Crear sección web para ingreso manual de datos de calidad del agua por piscicultores sino cuentan con prototipo de medición.	100 %
T4.5 Comunicar los resultados obtenidos del cultivo de forma oportuna al piscicultor	100 %
<b>Implementar técnicas de Machine Learning para mejorar la toma de decisiones en el proceso de producción</b>	100 %
T5.1 Seleccionar algoritmos de Machine Learning que se ajusten a nuestros requerimientos para mejorar la toma de decisiones en el cultivo.	100 %

<b>Objetivo Específico</b>	<b>Realización (%)</b>
T5.2 Implementar los algoritmos seleccionados en T5.1	100 %
T5.3 Construir una base de datos con registros históricos de las variables medidas	100 %
T5.4 Entrenar el modelo de ML con la base de datos	100 %
T5.5 Implementar alarmas sobre las condiciones del cultivo	100 %

El proyecto logró cumplir con los resultados esperados inicialmente, desarrollando e implementando satisfactoriamente el sistema de monitoreo de calidad del agua, incluyendo la integración de algoritmos predictivos, la comunicación IoT y la visualización de datos en una plataforma web. Además, la validación del dispositivo en una piscicultura real representa un logro importante, que demuestra la aplicabilidad y robustez del sistema en condiciones de campo.

## 6 Análisis de costos

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, calculamos el costo por hora de trabajo, considerando un total de 180 horas trabajadas al mes y un salario mínimo de 1.400.000 pesos colombianos. El costo por hora de trabajo se estimó en 7.777 pesos. Este análisis es esencial para estimar los costos asociados con la mano de obra.

Las tablas a continuación proporcionan información detallada sobre los precios de los componentes y materiales utilizados, así como los tiempos dedicados a cada actividad del proyecto. Esta información permite tener un análisis preciso de los costos asociados con los componentes y materiales utilizados, brindando una visión completa de la inversión económica realizada en el proyecto.

<b>Recurso humano</b>	<b>Labor realizada</b>	<b>Horas estimadas</b>	<b>Costo</b>
<b>Ing. electrónico</b>	Investigación de antecedentes	50	\$ 388.850
<b>Ing. electrónico</b>	Detección de las necesidades de los piscicultores	20	\$ 155.540
<b>Ing. electrónico</b>	Selección de componentes	30	\$ 233.310
<b>Ing. electrónico</b>	Diseño electrónico	120	\$ 933.240
<b>Ing. electrónico</b>	Implementación del prototipo	40	\$ 311.080
<b>Ing. electrónico</b>	Calibración de sensores	20	\$ 155.540
<b>Ing. electrónico</b>	Diseño web y base de datos	120	\$ 933.240
<b>Ing. electrónico</b>	Implementación de algoritmos de ML	120	\$ 933.240
<b>Ing. electrónico</b>	Validación de resultados	20	\$ 155.540
<b>Total</b>	-	540	\$ 4.199.580

Tabla 23: Tabla de recursos humanos y costos

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>
<b>Raspberry Pi 3B +</b>	1	250.000 COP
<b>PCB</b>	1	140.000 COP
<b>Sensor de TDS</b>	1	90.000 COP
<b>Sensor de temperatura</b>	1	9.000 COP
<b>Sensor de pH</b>	1	140.000 COP
<b>Sensor de temperatura y humedad</b>	2	60.000 COP
<b>ADC</b>	1	45.000 COP
<b>Tornillos y tuercas</b>	10	20.000 COP
<b>Header</b>	4	20.000 COP
<b>Resistencias</b>	3	900 COP
<b>Mosfet</b>	2	7.000 COP
<b>Conectores GX16-3 hembra, macho</b>	2	22.000 COP
<b>Caja protectora</b>	1	25.000 COP
<b>Cargador</b>	2	40.000 COP
<b>Garita protectora sensores exteriores</b>	1	100.000 COP
<b>Total</b>	33	968.900 COP

Tabla 24: Tabla de Componentes y Precios

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, el costo total de mano de obra es de 4.199.580 COP, mientras que el valor de los dispositivos electrónicos y otras materias primas es de 968.900 COP. Por lo tanto, el costo total para el desarrollo de este proyecto que consta de un dispositivo de medición multiparametro, pagina web y algoritmos de machine learning, tiene un valor de 5.148.480 COP.

En el caso de un desarrollo masivo de este dispositivo, se podría alcanzar un descuento de hasta el 35 % en los componentes usados. Esto se debe a que los fabricantes ofrecen mejores precios por volúmenes de compra mayores, además de reducir el costo de envío.

En comparación con los dispositivos para medición en piscicultura mencionados en la sección de antecedentes 1.4.5, nuestro dispositivo ofrece una alternativa más económica para el monitoreo de la calidad del agua en cultivos piscícolas. Esta solución brinda la oportunidad a piscicultores de pequeña escala de acceder a tecnologías que les permiten gestionar mejor sus cultivos, sin tener que enfrentar precios elevados ni mensualidades para obtener la información necesaria.

## 7 Conclusiones

El desarrollo e implementación del sistema de monitoreo de calidad del agua para piscicultura ha demostrado cumplir con los objetivos planteados en este proyecto. A continuación, se detallan las principales conclusiones obtenidas:

- **Eficacia en la medición en línea:** El dispositivo desarrollado ha mostrado ser eficaz para la medición en línea de parámetros fisicoquímicos del agua en la piscícola. Las variables monitoreadas, incluyendo temperatura del agua, pH, conductividad y TDS, proporcionan una visión integral de las condiciones del agua desde cualquier dispositivo inteligente con conexión a internet. Este acceso remoto a los datos facilita la toma de decisiones informadas y oportunas.
- **Resistencia a condiciones de intemperie:** El dispositivo demostró ser resistente a condiciones de intemperie, soportando adecuadamente la exposición continua a agua y sol. Esto asegura una durabilidad y operatividad óptima en la piscícola, garantizando la fiabilidad del sistema en ambientes exteriores exigentes.
- **Calibración de sensores:** Para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones, fue imprescindible realizar una calibración de los sensores. Dicha calibración, se basó en la comparación con el medidor de referencia Hanna Instruments HI 9829, el cual permitió ajustar las mediciones del prototipo para lograr una precisión adecuada en las variables críticas del proyecto. Al identificar imprecisiones en las ecuaciones de calibración iniciales, se implementaron ajustes específicos para cada sensor, como en los casos de pH y conductividad, mejorando así la exactitud y reduciendo el margen de error. Estos ajustes aseguran un monitoreo continuo y preciso, clave para la toma de decisiones oportunas en la piscícola.
- **Desempeño de modelos predictivos:** Los modelos predictivos desarrollados mostraron un buen desempeño en la predicción de la temperatura del agua y TDS, con un porcentaje de asertividad por encima del 99 % para la temperatura del agua y superior al 96 % para los TDS. Sin embargo, hay margen de mejora en la predicción del pH, que alcanzó un porcentaje de asertividad mínimo del 85,5 %. A medida que se extienden las horas de predicción, el error tiende a aumentar, indicando la necesidad de refinamiento continuo de los modelos.
- **Integración de hardware y software:** El análisis de resultados sobre el hardware confirma que los sensores y la Raspberry Pi utilizados en el proyecto son precisos, fiables y fáciles de integrar con el software de visualización. La transmisión de datos fue eficiente, y el sistema en general mostró una alta durabilidad y un impacto positivo en la operación de la piscícola. Estos resultados validan la elección del hardware y la metodología utilizada en el proyecto, proporcionando una base sólida para futuras expansiones y mejoras del presente proyecto.

- **Contribucion del sistema desarrollado a la piscícola:** La implementación del sistema de monitoreo ha contribuido a mejorar la gestión de la calidad del agua. Antes de su instalación, las mediciones de los parámetros del agua se realizaban de manera manual y esporádica, con una frecuencia que variaba entre una vez al día y una vez a la semana, lo que aumentaba el riesgo de que las condiciones del agua empeoraran sin ser detectadas a tiempo.

El nuevo sistema permite un monitoreo continuo de las variables clave, visualizando los datos en línea a través de la plataforma web y generando alertas automáticas cuando los valores superan los umbrales permitidos. Esto reduce el riesgo de que el cultivo permanezca en condiciones no óptimas durante largos periodos, garantizando una gestión más responsable del entorno acuático.

## 8 Trabajos Futuros

Las propuestas mencionadas en esta sección quedaron fuera del alcance del presente proyecto debido a que los objetivos planteados inicialmente ya se han alcanzado exitosamente. Este éxito permitió identificar áreas de mejora y expansión que, aunque relevantes, excedían el marco temporal y presupuestario del proyecto actual.

### Hardware

- A partir de la conductividad del agua, es posible estimar otros parámetros relevantes, como la resistividad, la salinidad. Sin embargo, la estimación de estos parámetros no forma parte del alcance del presente proyecto de grado y se deja como tema para futuras investigaciones del presente proyecto [36].
- El dispositivo debe tener la capacidad de almacenar hasta  $n$  tramas de información de los datos medidos. Esta información se guardará temporalmente en la memoria interna del dispositivo hasta que se recupere la conexión a la red. Actualmente, si se pierde la conexión Wi-Fi, los datos se almacenan en la tarjeta SD interna, pero no se envían a los servidores.
- Para una nueva versión del dispositivo, se propone implementar un sistema embebido de más bajo consumo energético. Este sistema permitirá que el dispositivo funcione de manera autónoma, alimentándose por medio de paneles solares y baterías.
- Se propone utilizar una carcasa flotante para el dispositivo, lo que permitirá obtener datos más precisos desde el centro del lago, en comparación con las mediciones realizadas desde la orilla. Además, la carcasa debe ser resistente a las inmersiones para garantizar su correcto funcionamiento en el entorno.
- Para trabajos posteriores, se adicionaron conectores con fuentes de alimentación de 5 V, tanto analógicas como digitales. Esto permitirá agregar sensores o dispositivos adicionales a la tarjeta de medición, como podrían ser sensores de amonio, nitritos, nitratos o módulos de GSM para que la transmisión de la información no sea únicamente vía wifi.

### Software

- Mirando hacia el futuro, sabemos que a medida que más personas usen nuestra aplicación, tendremos que considerar un balanceador de carga (Load Balancer) para distribuir el tráfico del servidor. Podría presentarse una saturación si se conectan varios usuarios, se consulta la base de datos y se agregan datos al mismo tiempo, o si la frecuencia de muestreo es muy baja. Si el servidor no puede balancear la carga, podría ponerse en modo indisponible y afectar los datos y visualizaciones. Además, debemos brindar soporte técnico continuo y asegurarnos de que nuestro código esté siempre en forma.

Es ahí donde entra el rol del balanceador de carga. Al distribuir el tráfico de red o las solicitudes de servicio entre varios servidores, asegura que ninguno se sobrecargue. Esto mejora la disponibilidad y el rendimiento de las aplicaciones, previene fallos del sistema y garantiza una experiencia de usuario más fluida y rápida.

- Migración a la nube y mejora continua, los siguientes pasos incluyen la migración del entorno de pruebas a un servidor en la nube, aprovechando servicios escalables para optimizar los recursos. Además, se plantea una revisión continua de la arquitectura para identificar áreas de mejora y fortalecer la seguridad y eficiencia del sistema a medida que la aplicación evoluciona.

- Implementación de Fail2Ban: Escudo Adicional contra Amenazas

Como medida proactiva para salvaguardar la aplicación contra posibles amenazas, planeamos implementar Fail2Ban en el servidor Debian. Fail2Ban es una herramienta de seguridad que monitorea registros de archivos de registro y detecta patrones de comportamiento malicioso. Si detecta actividad sospechosa, como intentos repetidos de acceso no autorizado, bloquea automáticamente la dirección IP del atacante. Esta adición proporcionará una capa adicional de protección contra ataques de fuerza bruta y otros vectores de amenazas.

La implementación de Fail2Ban se llevará a cabo ajustando la configuración del servidor Debian para integrar esta herramienta de seguridad. Se establecerán reglas específicas para identificar comportamientos maliciosos y activar automáticamente la respuesta de bloqueo. Esto contribuirá significativamente a la resistencia del sistema ante posibles intentos de intrusión.

- Ofuscación del Código Frontend y JavaScript: Blindaje Avanzado

Para elevar la seguridad del código frontend y JavaScript, se plantea aplicar técnicas de ofuscación. La ofuscación es el proceso de modificar el código fuente para que sea difícil de entender o invertir. En este contexto, se utilizará para dificultar la comprensión del código por parte de terceros y proteger la lógica interna de la aplicación.

Para lograr la ofuscación, se pueden emplear herramientas especializadas que transformarán el código fuente de manera que siga siendo funcional pero sea menos legible. Este proceso no afectará la ejecución normal de la aplicación, pero complicará la tarea de ingeniería inversa. La elección de herramientas específicas se determinará según las características de la aplicación y las mejores prácticas de seguridad para el entorno web.

Estas medidas adicionales de seguridad fortalecerán la resiliencia de la aplicación, mitigando posibles amenazas y protegiendo la integridad del código frente a intentos maliciosos. La implementación cuidadosa de estas estrategias contribuirá a la construcción de un entorno robusto y confiable para la aplicación.

- Roles y Permisos

Aunque la implementación inicial no incluía roles diferenciados, se dejó preparada la estructura para roles como administrador y usuario. Los administradores tendrían permisos para agregar y eliminar dispositivos de medición, mientras que los técnicos colaboradores solo tendrían permisos para la lectura, visualización y alerta de las pisciculturas.

- Para mejorar los algoritmos predictivos, es fundamental utilizar una mayor cantidad de datos en su entrenamiento. Además, se puede explorar el uso de modelos de aprendizaje profundo para optimizar su precisión y rendimiento.

### **Realimentación de los usuarios**

- Interfaz: Simplificar visualización, mejorar indicadores y gráficos.
- Técnico: Optimizar velocidad y compatibilidad entre dispositivos móviles.
- Características: Ampliar detalles de predicciones y tipos de mediciones.
- Experiencia de usuario: Facilitar aun más la interpretación de datos.

## 9 Anexos

### 9.1 Selección de componentes

En las tablas 25,26 y 27 se pueden apreciar los criterios que se evaluaron para escoger cada sensor.

Característica	Ph-4502c	Atlas Scientific Micro pH Probe	Atlas Scientific Mini Lab Grade pH Probe
Tipo de aplicación	Laboratorio	Laboratorio	Laboratorio
Precisión	$\pm 0.1$ pH	$\pm 0.01$ pH	$\pm 0.001$ pH
Rango de medición	0 a 14	0 a 14	0 a 14
Tiempo de respuesta	1min <	1 min <	1 min <
Longitud del cable	100 cm	61 cm	100 cm
Rango de funcionamiento	0 a 60 °C	-5 a 90 °C	-5 a 99 °C
Rangos de alimentación	4.5V - 5V	3.3V - 5V	3.3V - 5V
Consumo de energía	-	-	-
Sumergible	Si	Si	Si
Salida	Analogica	Analogica	Analogica
Necesita transductor	Si	Si	Si
Costo	COP 140.000	COP 932.000	COP 538.000

Tabla 25: Características sensores de pH

<b>Característica</b>	<b>PT100</b>	<b>DS18B20</b>	<b>TMP36</b>
<b>Tipo de aplicación</b>	Sistemas industriales	Sistemas industriales	Sistemas industriales
<b>Precisión</b>	$\pm 0,1$ °C	$\pm 0,5$ °C	$\pm 2$ °C
<b>Rango de medición</b>	-200 a 420 °C	-55 a 125 °C	-40 a 125 °C
<b>Tiempo de respuesta</b>	<1 s	<750 ms	<100 ms
<b>Longitud del cable</b>	90cm	92cm	70cm
<b>Rango de funcionamiento</b>	-200 a 420 °C	-55 a 125 °C	-40 a 125 °C
<b>Rango de alimentación</b>	5 a 20 V	3,3 a 5 V	3,3 a 5 V
<b>Consumo de energía</b>	1 mA	15 $\mu$ A	50 $\mu$ A
<b>Sumergible</b>	Sí	Sí	Sí
<b>Salida</b>	Analogica	Digital	Analogica
<b>Necesita transductor</b>	Sí	No	Si
<b>Costo</b>	COP 35.000	COP 9.000	COP 18.000

Tabla 26: Características sensores de Temperatura

Característica	Halisense TDS	UICPAL TDS	SEN0244
Tipo de aplicación	Tratamiento de aguas	tratamiento de aguas	aguas hidropónicas-acuapónicas
Precisión	±2 FS	±10 FS	±10 FS
Rango de medición	0 a 2000 ppm	0 a 1000 ppm	0 a 1000 ppm
Tiempo de respuesta	<30 s	<500 ms	<10 s
Longitud del cable	-	2m	83cm
Rango de funcionamiento	0-100°C	-40-85°C	0 - 55 °C
Rango de alimentación	DC 12/24V	DC 12/30V	DC 3.3V/5V
Consumo de energía	<1W	2.4W	30mW
Sumergible	Si	Si	Si
Salida	RS485, Modbus/R-TU	RS485,Salida analógica de 0 a 2 V	Salida analógica de 0 a 2.3 V
Necesita transductor	Sí	Sí	Sí
Costo	COP 315.000	COP 432.000	COP 90.000

Tabla 27: Características sensores de "TDS"total de solidos suspendidos

Para seleccionar el sensor de pH,temperatura y TDS más adecuado para la granja piscícola, se asignaron pesos a cada uno de los criterios de evaluación, según su importancia relativa. Los pesos asignados fueron los siguientes: Tipo de aplicación (10 %), Precisión (10 %), Rango de medición (5 %), Tiempo de respuesta (10 %), Longitud del cable (10 %), Rango de funcionamiento (5 %), Rango de alimentación (10 %), Consumo de energía (10 %), Sumergible (10 %), Salida (5 %), Necesita transductor (5 %), Costo ( 10 %). La evaluación se llevó a cabo asignando valores entre 0 y 10 a cada criterio, donde 0 representa la calificación más baja posible y 10 la calificación más alta posible.

Para seleccionar el sistema embebido a utilizar, se asignaron pesos a cada uno de los criterios de evaluación, según su importancia relativa. Los pesos asignados fueron los siguientes: Frecuencia del procesador (5 %), Núcleos del procesador (5 %),Memoria RAM (5 %),Almacenamiento (10 %), Conectividad (10 %), Dimensiones (5 %), Peso (5 %). Software (10 %) Costo (15 %), Consumo (15 %), Puertos GPIO (15 %) . La evaluación se llevó a cabo asignando valores entre 0 y 10 a cada criterio, donde 0 representa la calificación más baja posible y 10 la calificación más alta posible.

<b>Característica</b>	<b>Raspberry Pi 3B+</b>	<b>Banana Pi M3</b>	<b>Cubieboard4</b>
<b>Frecuencia del procesador</b>	1.4 GHz	1.8 GHz	2.0 GHz
<b>Núcleos del procesador</b>	4	4	8
<b>Memoria RAM</b>	1 GB	4 GB	2 GB
<b>Almacenamiento</b>	8 GB eMMC	16 GB eMMC	8 GB eMMC
<b>Conectividad</b>	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth
<b>Dimensiones</b>	8,5 x 5,6 cm	8,8 x 6 cm	8,8 x 6 cm
<b>Peso</b>	28 g	40 g	40 g
<b>Software</b>	Linux, Android, Windows 10 IoT Core	Linux, Android, Windows 10 IoT Core	Linux, Android, Windows 10 IoT Core
<b>Costo</b>	COP 250.000	COP 400.000	COP 350.000
<b>Consumo</b>	2,5 W	3,5 W	3,5 W
<b>Puertos GPIO</b>	40	28	24

Tabla 28: Comparación de características de placas de desarrollo

Para seleccionar los sensores de pH, temperatura y TDS, se siguieron los criterios de selección presentados en las tablas 25, 26 y 27, respectivamente. Para seleccionar el sistema embebido, se siguieron los criterios de selección presentados en la tabla 28. Para cada uno de los componentes escogidos, se evaluaron las opciones presentadas en cada tabla. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

<b>Características</b>	<b>Pesos globales (%)</b>	<b>Ph-4502c</b>	<b>Atlas Scientific Micro pH Probe</b>	<b>Atlas Scientific Mini Lab Grade pH Probe</b>
<b>Tipo de aplicación</b>	10 %	8	8	8
<b>Precisión</b>	10 %	8	9	10
<b>Rango de medición</b>	5 %	10	10	10
<b>Tiempo de respuesta</b>	10 %	6	6	6
<b>Longitud del cable</b>	10 %	8	6	8
<b>Rango de funcionamiento</b>	5 %	10	10	10
<b>Rango de alimentación</b>	10 %	9	10	10
<b>Consumo de energía</b>	10 %	0	0	0
<b>Sumergible</b>	10 %	10	10	10
<b>Salida</b>	5 %	6	6	6
<b>Necesita transductor</b>	5 %	6	6	6
<b>Costo</b>	10 %	10	4	6
<b>Total</b>	100 %	7,5	6,9	7,4

Tabla 29: Matriz de selección sensor de pH

Características	Pesos globales (%)	PT100	DS18B20	TMP36
Tipo de aplicación	10 %	10	10	10
Precisión	10 %	10	9	6
Rango de medición	5 %	10	9	8
Tiempo de respuesta	10 %	7	9	10
Longitud del cable	10 %	8	9	7
Rango de funcionamiento	5 %	10	9	8
Rango de alimentación	10 %	8	10	10
Consumo de energía	10 %	7	10	8
Sumergible	10 %	10	10	10
Salida	5 %	8	10	8
Necesita transductor	5 %	7	10	7
Costo	10 %	7	10	8
<b>Total</b>	<b>100 %</b>	<b>8,45</b>	<b>9,6</b>	<b>8,45</b>

Tabla 30: Matriz de selección sensor de temperatura

Características	Pesos globales (%)	Halisense TDS	UICPAL TDS	SEN0244
Tipo de aplicación	10 %	10	10	10
Precisión	10 %	10	9	9
Rango de medición	5 %	10	10	10
Tiempo de respuesta	10 %	8	10	9
Longitud del cable	10 %	0	10	9
Rango de funcionamiento	5 %	9	9	9
Rango de alimentación	10 %	5	5	10
Consumo de energía	10 %	6	4	10
Sumergible	10 %	10	10	10
Salida	5 %	8	9	9
Necesita transductor	5 %	7	7	7
Costo	10 %	7	6	10
<b>Total</b>	<b>100 %</b>	<b>7,3</b>	<b>8,15</b>	<b>9,45</b>

Tabla 31: Matriz de selección sensor de TDS

Características	Pesos globales (%)	Raspberry pi 3B+	Banana Pi M3	Cubieboard4
Frecuencia del procesador	5 %	5	6	7
Núcleos del procesador	5 %	9	9	10
Memoria RAM	5 %	5	8	6
Almacenamiento	10 %	9	10	9
Conectividad	10 %	8	8	8
Dimensiones	5 %	7	6	6
Peso	5 %	10	7	7
Software	10 %	9	9	9
Costo	15 %	10	3	6
Consumo	15 %	10	7	7
Puertos GPIO	15 %	9	8	7
<b>Total</b>	100 %	8,75	7,2	7,4

Tabla 32: Matriz de selección sistema embebido

## 9.2 Implementos utilizados



Figura 39: Soluciones buffer de pH conocido



Figura 40: Muestras de agua de la piscicola



Figura 41: Instrumento Hanna HI9829 utilizado para calibrar los sensores

### 9.3 Piscícolas visitadas



Figura 42: Piscícola de Candelaria



Figura 43: Píscicola de Candelaria



Figura 44: Piscícola de Jamundí

#### **9.4 Encuesta implementadas**

A continuación se presenta la encuesta utilizada para seleccionar la piscícola con la cual se trabajo en el proyecto.

# Sondeo – Piscícolas

Me pongo en contacto con usted para solicitar su valioso tiempo y esfuerzo en completar una encuesta sobre un sondeo sobre su piscícola . El objetivo de esta encuesta es conocer que tanta información tienen los productores sobre su cultivo. Apreciamos su opinión y valoramos su tiempo, por lo que esta encuesta solo tomará aproximadamente 2 min para completar. Le garantizamos que todas las respuestas serán tratadas de manera confidencial y que sus datos personales no serán compartidos con terceros sin su consentimiento.

\* Indica que la pregunta es obligatoria

---

Trabajo de Grado Ingeniería Electrónica

Pontificia Universidad Javeriana Cali  
Calle 18 No. 118-250 - Cali, Colombia

Si tiene alguna pregunta o problema al completar la encuesta, no dude en ponerse en contacto. Muchas gracias por su tiempo y colaboración.

Atentamente,

Kamilo Burbano  
Diego Alvarez

Contacto [kamilo990@javerianacali.edu.co](mailto:kamilo990@javerianacali.edu.co)  
3156796841



## INFORMACION PISCICOLA

Esta información nos permitirá identificarte para poder contactarte y continuar el proceso

1. Nombre de la empresa \*

---

2. Nombre y Apellidos

---

3. Dirección \*

---

4. Telefono \*

---

5. Email de contacto \*

---

### Variables del cultivo

6. ¿Realiza monitoreo frecuente de las variables fisicoquímicas del agua en su Piscícola ? \*

*Marca solo un óvalo.*

- Sí, monitoreo las variables fisicoquímicas de forma continua
- Sí, monitoreo las variables fisicoquímicas, pero no de forma continua
- No, no realizo monitoreo de las variables fisicoquímicas.
- Otro: \_\_\_\_\_

7. ¿Posee registros históricos de las mediciones de las variables fisicoquímicas realizadas durante al menos un ciclo completo de producción? \*

*Marca solo un óvalo.*

- Sí, poseo registros históricos de al menos un ciclo de producción completo.
- Sí, poseo algunos registros históricos, pero no de un ciclo completo
- No, no cuento con registros históricos de las mediciones
- Otro: \_\_\_\_\_

8. En caso de poseer registros históricos, ¿estaría dispuesto a facilitar dicha información para el presente proyecto? \*

*Marca solo un óvalo.*

- Sí, estoy dispuesto a facilitar los registros históricos
- No, no puedo facilitar los registros históricos
- No aplica, no poseo registros históricos
- Otro: \_\_\_\_\_

9. ¿Cuales de los siguientes parámetros son medidos en su cultivo? \*  
selecciones todos las opciones que considere.



*Selecciona todos los que correspondan.*

- pH de agua
- Temperatura del agua
- Oxigeno disuelto en el agua
- Sólidos Suspendidos en el agua
- Conductividad
- Dureza
- Alcalinidad
- Amoniac
- Nitritos
- Nitratos
- Salinidad
- Demanda de oxígeno bioquímico
- Fosforo
- Otro: \_\_\_\_\_

10. ¿Está usted dispuesto a participar y colaborar en la ejecución del presente proyecto? \*

*Marca solo un óvalo.*

- Sí, estoy dispuesto a participar
- No, no puedo participar en este proyecto
- Otro: \_\_\_\_\_

11. Comentarios, Sugerencias o Preguntas del proyecto



---

---

---

---

---

---

Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

**Google** Formularios

La siguiente encuesta se utilizó para validar la eficacia y usabilidad de la plataforma web desarrollada. Primero, se hicieron preguntas a los usuarios que utilizaron la plataforma y, posteriormente, al piscicultor se le realizaron preguntas específicas sobre el uso del sistema en su piscícola.

# Evaluación del sistema IoT diseñado para el monitoreo de variables fisicoquímicas en piscicultura

Agradecemos su participación en esta encuesta para evaluar el funcionamiento del sistema IoT diseñado para el monitoreo de variables fisicoquímicas en piscicultura. Sus respuestas son valiosas para mejorar nuestro sistema y brindarle un mejor servicio. Por favor, responda las siguientes preguntas de manera honesta y objetiva.

Al responder esta encuesta, certifico que he probado la plataforma web y que la información proporcionada es verídica.

\* Indica que la pregunta es obligatoria

---

1. Correo electrónico \*

---

Usuario

2. Nombre \*

---

3. ¿Cómo evaluaría la presentación de los datos en la plataforma web (gráficos, mediciones) y la claridad de la información sobre los valores de las variables fisicoquímicas del cultivo? \*

*Marca solo un óvalo.*

Excelente

Buena

Adecuada

Deficiente

4. En una escala del 1 al 5, ¿qué tan fácil e intuitiva fue para usted utilizar la plataforma web? \*

*Marca solo un óvalo.*

- 5 - Muy fácil
- 4 - Fácil
- 3 - Neutral
- 2 - Difícil
- 1 - Muy difícil

5. ¿Recomendaría esta plataforma a otros usuarios? \*

*Marca solo un óvalo.*

- SI
- No
- No estoy seguro

6. ¿Es usted un piscicultor? \*

*Marca solo un óvalo.*

- Si *Ir a la pregunta 7*
- No *Ir a la pregunta 12*

Piscicultor

7. ¿Con qué frecuencia utiliza la plataforma web para el monitoreo de las variables fisicoquímicas? \*

*Marca solo un óvalo.*

- Diariamente
- 1 vez a la semana
- 2-3 veces a la semana
- Quincenalmente
- Mensualmente

8. ¿Considera que el sistema proporciona una solución efectiva para el monitoreo de variables fisicoquímicas en su piscícola? \*

*Marca solo un óvalo.*

- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

9. ¿Qué tan satisfecho está con el sistema de alertas que le notifica cuando las variables fisicoquímicas del cultivo se salen del rango apropiado? \*

*Marca solo un óvalo.*

- Muy satisfecho
- Satisfecho
- Neutral
- Insatisfecho
- Muy insatisfecho

10. ¿Ha utilizado el apartado de predicciones de las variables? \*

*Marca solo un óvalo.*

Sí *Ir a la pregunta 11*

No *Ir a la pregunta 12*

### Predicciones fisicoquímicas del agua

11. ¿Los modelos predictivos de variables fisicoquímicas del agua le han proporcionado una herramienta de apoyo para la toma de decisiones? \*

*Marca solo un óvalo.*

Totalmente de acuerdo

De acuerdo

Neutral

En desacuerdo

Totalmente en desacuerdo

### Retroalimentación

12. ¿Qué aspectos del sistema cree que podrían mejorarse? \*  
(Diseño plataforma web, dispositivo, organización, etc)

---

---

---

---

---

# Google Formularios

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la encuesta de evaluación del sistema.

## Usuario

### Nombre

11 respuestas

Anais Jeker

Raoul

Marine

Suzano

Mathieu REDON

Daniel Trigueros Rueda

Camilo

Alfredo Espinosa

Bayron Rincon

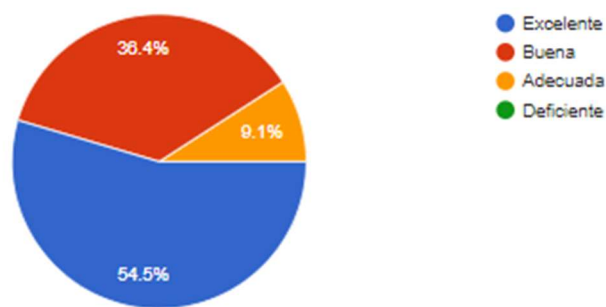
Victor

Briyed Molina

¿Cómo evaluaría la presentación de los datos en la plataforma web (gráficos, mediciones) y la claridad de la información sobre los valores de las variables fisicoquímicas del cultivo?

 Copiar

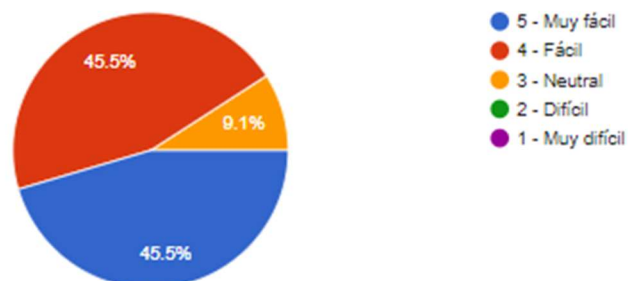
11 respuestas



En una escala del 1 al 5, ¿qué tan fácil e intuitiva fue para usted utilizar la plataforma web?

 Copiar

11 respuestas



¿Recomendaría esta plataforma a otros usuarios?

 Copiar

11 respuestas



**Piscicultor**

¿Con qué frecuencia utiliza la plataforma web para el monitoreo de las variables fisicoquímicas?

 Copiar

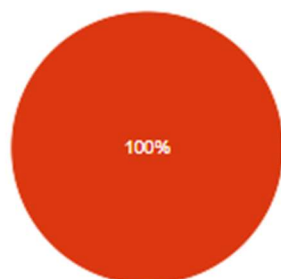
1 respuesta



¿Considera que el sistema proporciona una solución efectiva para el monitoreo de variables fisicoquímicas en su piscícola ?

[Copiar](#)

1 respuesta

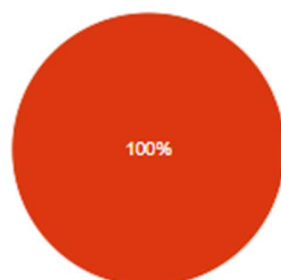


- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

¿Qué tan satisfecho está con el sistema de alertas que le notifica cuando las variables fisicoquímicas del cultivo se salen del rango apropiado?

[Copiar](#)

1 respuesta



- Muy satisfecho
- Satisfecho
- Neutral
- Insatisfecho
- Muy insatisfecho

¿Ha utilizado el apartado de predicciones de las variables?

[Copiar](#)

1 respuesta



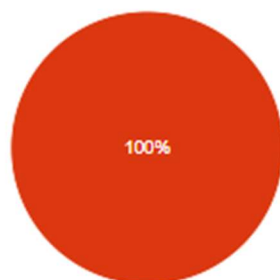
- SI
- No






## Predicciones fisicoquímicas del agua

¿Los modelos predictivos de variables fisicoquímicas del agua le han proporcionado una herramienta de apoyo para la toma de decisiones?

 Copiar

1 respuesta



-  Totalmente de acuerdo
-  De acuerdo
-  Neutral
-  En desacuerdo
-  Totalmente en desacuerdo

## Retroalimentación

¿Qué aspectos del sistema cree que podrían mejorarse?  
(Diseño plataforma web, dispositivo, organización, etc)

11 respuestas

Nada

Ella es tan hermosa Diego, bien hecho, vi un retraso en la carga y el botón de inicio de sesión solo en la computadora y iPad

demasiado hermosa

Todo está bien, tal vez una explicación para las predicciones, para todo lo demás entendemos directamente las mediaciones y la visualización.

Bastante fácil de entender

Considerar que la el uso de los círculos para la representación de las variables no es el mejor. considero importante ver el valor que está midiendo entre las referencia mínimas y máximas, pero y el rango óptimo

Podría los indicadores contener medidores mas simples y agradables a la vista

Medir otros parámetros que permitan conocer el ciclo del nitrógeno

Poner los indicadores por color un poco mas evidentes, que el relleno de donde dice la medida tenga el color rojo, amarillo o verde, dependiendo el estado en el que se encuentre

que sea responsive y los tiempos de respuesta, demora bastante en actualizarse

Ampliar los gráficos

## 9.5 Gráficos de modelos de predicción

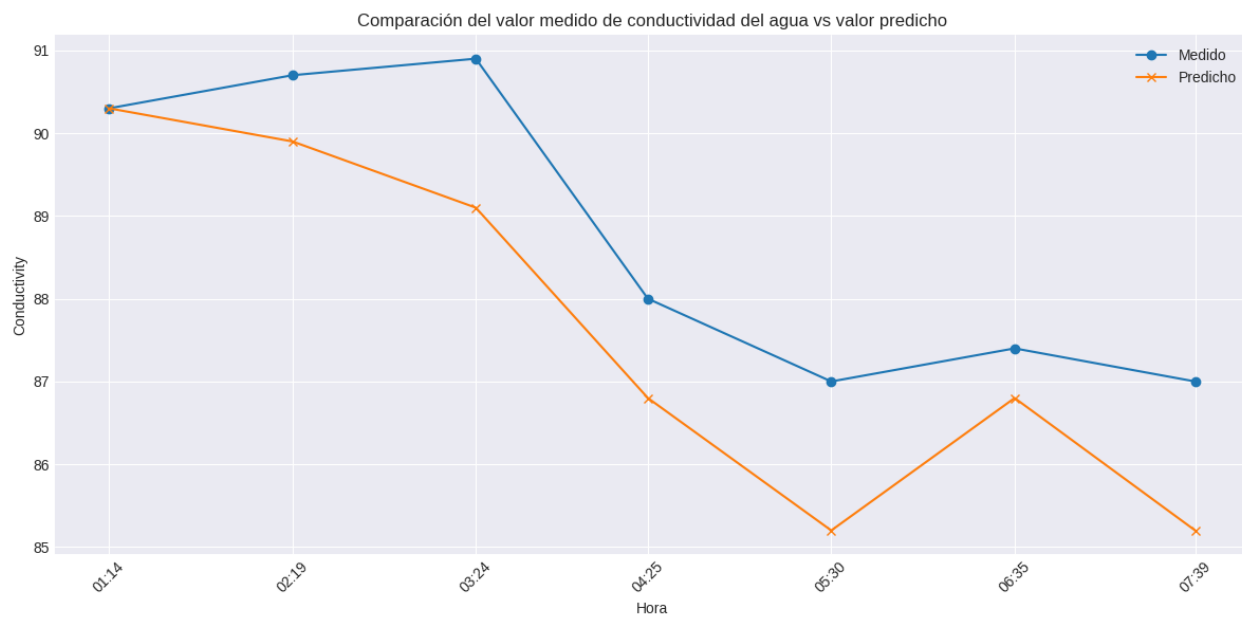


Figura 45: Comparación del valor medido de conductividad vs valor predicho

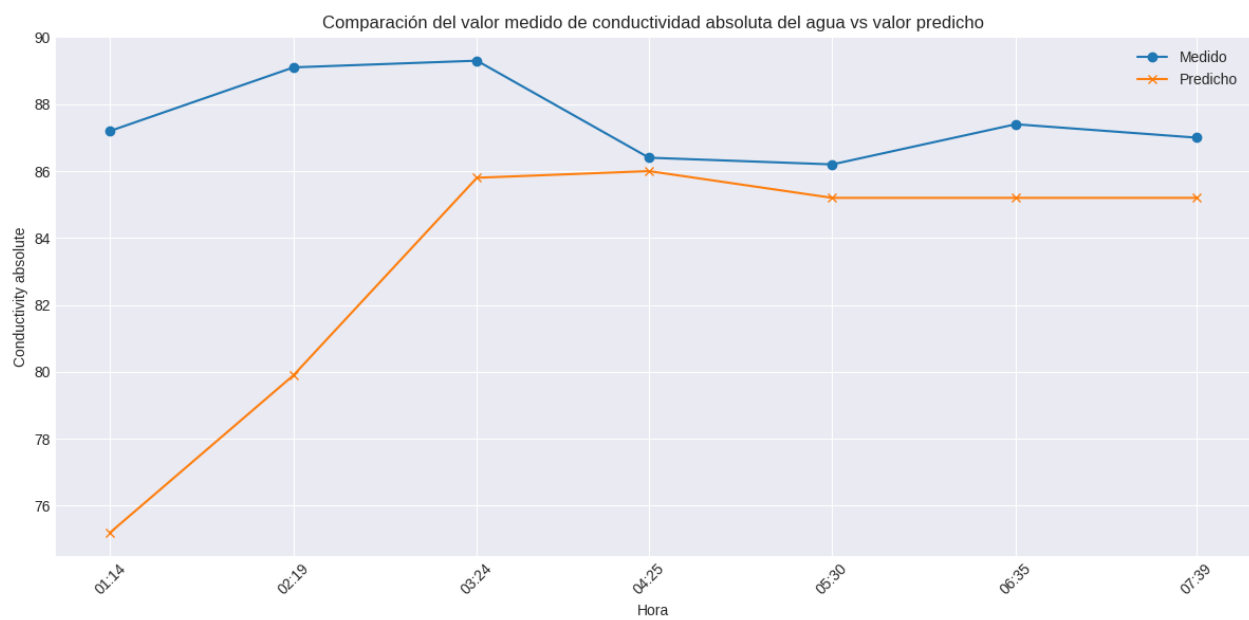


Figura 46: Comparación del valor medido de conductividad absoluta vs valor predicho

- **Sistema embebido**

Tabla 33: Características de placa de desarrollo escogida

Características	Raspberry Pi 3B+
Frecuencia del procesador	1.4 GHz
Núcleos del procesador	4
Memoria RAM	1 GB
Almacenamiento	8 GB
Conectividad	Wi-Fi
Dimensiones	8,5 x 5,6 x 1,7 cm
Peso	28 g
Software	Raspberry Pi OS
Costo	COP 250.000
Consumo	2,5 W
Puertos GPIO	40

### 9.5.1 Definiciones

#### Acuicultura

La acuicultura es una técnica productiva que consiste en el cultivo controlado de organismos acuáticos. Esta práctica permite la reproducción, cría y cosecha de especies acuáticas en ambientes regulados, contribuyendo de manera estratégica a la producción sostenible de alimentos [2].

#### Piscicultura

Cría y propagación de peces de manera libre o encerrados en estanques u otros depósitos de agua en el cual no se permita su salida y donde reciban atención, alimentación y cuidados especializados para su óptimo crecimiento [2].

#### Calidad del agua

Es la descripción del agua a partir de sus características físicas biológicas y químicas para dar una definición adecuada de la calidad del agua. En general se realiza una comparación de las condiciones óptimas de acuerdo con el propósito que se requiere, ya sea para consumo, para procesos industriales o para usos recreativos [51].

**Turbidez**

Es una medida del grado en el cual el agua pierde su claridad debido a la presencia de partículas en suspensión, cuánto mayor son los sólidos en suspensión que hay en el agua más sucia parecerá y su turbidez será más alta, las aguas totalmente cristalinas producen al pez estrés y las aguas muy turbias producen problemas de respiración y branquiales [26].

**Oxígeno disuelto**

Es la concentración de oxígeno que puede tener un volumen de agua a una temperatura determinada; sus unidades mg/L [26].

**pH**

Grado de acidez o alcalinidad que posee una sustancia o una solución se mide en una escala de 0 a 14 [26]. El rango de pH óptimo para la mayoría de las especies de peces de agua dulce está entre 6,5 y 8,5, mientras que, para los peces marinos, el rango óptimo suele ser de 7,5 a 8,5.

**Salinidad**

Es una medida de la cantidad de sales disueltas en el agua u otro líquido. Para los peces, lo ideal de la salinidad en el agua es entre 15 y 30 gramos por litro, debido a que presentan un crecimiento más favorable que en otras concentraciones de salinidad [26].

**Amonio**

Es uno de los subproductos de la orina y las heces de los peces en el cultivo, también se presenta por la descomposición de los materiales orgánicos del fondo del estanque [26].

**Temperatura del agua**

Es el grado o nivel térmico del agua contenida en el estanque [26] La temperatura del agua es un factor crítico en la acuicultura ya que influye en el crecimiento, la reproducción, la alimentación y el comportamiento de los organismos acuáticos criados en sistemas de acuicultura.

**Sistema IoT**

Reunión e interconexiones de dispositivos a través de una red, que puede ser privada

o mediante internet la cual permite tener interacción entre dispositivos y usuarios de manera remota. Los dispositivos de iot pueden ser desde sensores hasta los objetos de uso cotidiano [9].

### **Sensores inalámbricos**

Dispositivos autónomos que permiten el monitoreo y análisis de alguna variable física de interés [52].

### **Plataforma web**

Son campos en internet que permiten la ejecución de varias aplicaciones o programas en el mismo sitio, de esta manera brinda al usuario la posibilidad de resolver múltiples problemas de manera más automática y usando menores recursos, las plataformas digitales son soluciones online que posibilitan la ejecución de diversas tareas en un mismo lugar a través de internet [53].

### **Protocolo de comunicación**

Es un estándar mediante el cual se permite la comunicación entre procesos consiste en un conjunto de reglas y procedimientos los cuáles deben respetarse para la transmisión y recepción de información mediante una red [54].

### **Monitoreo remoto**

Técnica que consiste en el monitoreo de variables mediante el cual permite a las personas visualizar datos desde cualquier lugar muy utilizado con condiciones ambientales severas o de difícil acceso. Generalmente los usuarios pueden acceder a la información utilizando un navegador por medio de internet [55].

### **Machine Learning**

El Machine Learning es una disciplina del campo de la Inteligencia Artificial que, a través de algoritmos, dota a los ordenadores de la capacidad de identificar patrones en datos masivos y elaborar predicciones (análisis predictivo) [10].

### **Protoboard (breadboard)**

Es una placa de pruebas utilizada en electrónica para el diseño y prototipado de circuitos electrónicos. Es una placa con múltiples orificios y contactos eléctricos en

los cuales se pueden insertar y conectar componentes electrónicos sin la necesidad de soldadura. [56]

### **Sistema Embebido**

Un sistema embebido es un sistema informático especializado y dedicado a una tarea específica dentro de un dispositivo o sistema más grande. Está diseñado para funcionar de manera eficiente, consumiendo poca energía y adaptándose a las condiciones y requisitos particulares de su entorno. Los sistemas embebidos interactúan directamente con los dispositivos y periféricos en los que están integrados, realizando funciones específicas en tiempo real [57].

## **Referencias**

- [1] AUNAP, “Plan-nacional-para-el-desarrollo-de-la-acuicultura-sostenible-colombia,” 2014.
- [2] P. D. Investigación, J. Carlos, E. Padilla, J. Vanessa, J. Olalla, I. E. Javier, and R. Herrería, “Diseño y construcción de un sistema térmico industrial que regule automáticamente la temperatura y aireación del agua, para un estanque de cultivo de tilapias ubicado en la finca experimental "la maría" de la uteq,” 7 2019. [Online]. Available: <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3738>
- [3] H. Carlino, M. Netto, E. Suarez, and A. Vasa, “La contribución de la banca pública de desarrollo a los objetivos de desarrollo sostenible en los países de américa latina y el caribe,” 3 2017. [Online]. Available: <https://publications.iadb.org/handle/11319/8152>
- [4] “Hambre cero - la agenda 2030 en colombia - objetivos de desarrollo sostenible.” [Online]. Available: <https://ods.dnp.gov.co/es/objetivos/hambre-cero>
- [5] U. de Harvard, “El plato para comer saludable (spanish) | the nutrition source | harvard t.h. chan school of public health,” 2011. [Online]. Available: <https://www.hsph.harvard.edu/nutritionsource/healthy-eating-plate/translations/spanish/>
- [6] LR, “Piscicultura en colombia crece a un promedio anual de 7%,” 2024. [Online]. Available: <https://www.agronegocios.co/finca/piscicultura-crece-a-un-promedio-anual-de-7-2621457>
- [7] FAO, “Pesca y acuicultura - pesca y acuicultura - acuicultura,” 2021. [Online]. Available: <https://www.fao.org/fishery/es/aquaculture>

- [8] L. Brown, “Acuicultura para veterinarios. producción y clínica de peces - editorial acribia, s.a.” 2000. [Online]. Available: [https://www.editorialacribia.com/libro/acuicultura-para-veterinarios-produccion-y-clinica-de-peces\\_53698/](https://www.editorialacribia.com/libro/acuicultura-para-veterinarios-produccion-y-clinica-de-peces_53698/)
- [9] Oracle, “¿qué es el internet de las cosas (iot)? | oracle colombia.” [Online]. Available: <https://www.oracle.com/co/internet-of-things/what-is-iot/>
- [10] IBERDROLA, “machine learning?: definición, tipos y aplicaciones prácticas - iberdrola.” [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/machine-learning-aprendizaje-automatico>
- [11] J. J. Restrepo, “Autoridad nacional de acuicultura y pesca - aunap.” [Online]. Available: <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Documents/Concepto%20BIOFLOC%20AUNAP.pdf>
- [12] “Solución iot para la optimización del proceso de piscicultura en el centro de desarrollo agroalimentario el limonal.” [Online]. Available: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/23368>
- [13] L. M. Ayala, V. Asesor, and M. E. Valencia, “New technologies and use of technological tools in fish production with emphasis on biofloc systems and pond raceway systems.”
- [14] S. Zhao, S. Zhang, J. Liu, H. Wang, J. Zhu, D. Li, and R. Zhao, “Application of machine learning in intelligent fish aquaculture: A review,” *Aquaculture*, vol. 540, p. 736724, 7 2021.
- [15] W. Vásquez-Quispesivana, M. Inga, I. Betalleluz-Pallardel, A. La, M. A. L. Molina, L. Molina, and L. Perú, “Inteligencia artificial en acuicultura: fundamentos, aplicaciones y perspectivas futuras,” *Scientia Agropecuaria*, vol. 13, pp. 79–96, 2022. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2077-99172022000100079&lng=es&nrm=iso&tlng=eshttp://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2077-99172022000100079&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172022000100079&lng=es&nrm=iso&tlng=eshttp://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2077-99172022000100079&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- [16] I. D. L. GÓMEZ, “Predicción adaptativa de la calidad del agua mediante técnicas de inteligencia computacional ivÁN darÍo lÓpez gÓmez,” 2015.
- [17] A. F. Zambrano, L. F. Giraldo, J. Quimbayo, B. Medina, and E. Castillo, “Machine learning for manually-measured water quality prediction in fish farming,” *PLOS ONE*, vol. 16, p. e0256380, 8 2021. [Online]. Available: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0256380>
- [18] T. Li, J. Lu, J. Wu, Z. Zhang, and L. Chen, “Predicting aquaculture water quality using machine learning approaches,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, 9 2022.
- [19] T. M. Piamba-Mamian, L. E. Zambrano, L. A. M. Rúaless, and F. A. R. Gonzales, “Implementación de un sistema de monitoreo iot aplicado a una piscicultura de trucha,” *Informador Técnico*, vol. 85, 10 2020.

- [20] C. E. D. Tapia and W. G. V. Astudillo, “Diseño e implementación de prototipo iot para el monitoreo remoto de la calidad del agua para la crianza de tilapias en estanques,” 2021. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21427>
- [21] M. M. Rashid, A.-A. Nayan, M. O. Rahman, S. A. Simi, J. Saha, and M. G. Kibria, “Iot based smart water quality prediction for biofloc aquaculture,” p. 2021. [Online]. Available: [www.ijacsa.thesai.org](http://www.ijacsa.thesai.org)
- [22] “Smartwater planet - tecnología global para la acuicultura.” [Online]. Available: <https://smartwaterplanet.com/es/>
- [23] “Quiénes somos - deepco.” [Online]. Available: <https://deepco.com.co/quienes-somos/>
- [24] “¿cómo se usan las tiras de ph? - royal brinkman.” [Online]. Available: <https://royalbrinkman.es/centro-de-conocimiento/cuidado-del-cultivo/como-se-usan-las-tiras-de-ph>
- [25] “Aquaponics textbook for higher education.” [Online]. Available: <https://zenodo.org/records/3948179>
- [26] F. González, “Indicadores de producción - parámetros físicos y químicos del agua para tilapias,” 2024. [Online]. Available: <https://www.pisciculturaglobal.com/indicadores-de-produccion-parametros-fisicos-y-quimicos-del-agua-para-tilapias/>
- [27] “Requerimientos del cultivo de tilapia: Calidad del agua | intagri s.c.” [Online]. Available: <https://www.intagri.com/articulos/ganaderia/requerimientos-del-cultivo-de-tilapia>
- [28] V. Molina and D. Carolina, “Sistema de medición remota tds (total de solidos disueltos) para la supervisión del tanque de salmuera en la empresa fresenius medical care,” Repositorio Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2560>
- [29] D. of Environment and H. Protection, “Queensland water quality guidelines 2009,” 2009.
- [30] A. C. Madrid, S. J. Gutiérrez, T. J. Flores, and U. E. Rodríguez, “Evaluación de diferentes densidades de siembra de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en estanques artesanales de agua dulce en San Luis Talpa, La Paz, El Salvador.” [Online]. Available: <https://www.agronomia.ues.edu.sv/agrociencia>
- [31] “¿cuál es el consumo de una raspberry pi 3/4? - bugeados.” [Online]. Available: <https://bugeados.com/raspberry/cual-es-el-consumo-de-una-raspberry-pi-3-4/>
- [32] Coursera. (2023) What is a wireframe? definition, uses, and examples. [Online]. Available: <https://www.coursera.org/mx/articles/wireframe>
- [33] Figma. (2023) Figma: Herramienta de diseño y colaboración. [Online]. Available: <https://www.figma.com/es-es/design/>

- [34] “scikit-learn: machine learning in python — scikit-learn 1.5.1 documentation.” [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/stable/>
- [35] “Descargue vnc viewer | vnc connect.” [Online]. Available: [https://www.realvnc.com/es/connect/download/viewer/?lai\\_sr=25-29&lai\\_sl=1](https://www.realvnc.com/es/connect/download/viewer/?lai_sr=25-29&lai_sl=1)
- [36] “Hi 9829 medidor multiparámetro impermeable para ph / ise / ce / od / turbidez con opción de gps | hanna instruments colombia.” [Online]. Available: <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-9829-medidor-multiparametro-impermeable-para-ph-ise-ce-od-turbidez-con-opcion-de-gps>
- [37] “Analog tds sensor meter for arduino / esp32 / raspberry pi - dfrobot wiki.” [Online]. Available: [https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_\\_Analog\\_TDS\\_Sensor\\_\\_\\_Meter\\_For\\_Arduino\\_SKU\\_\\_SEN0244](https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_TDS_Sensor___Meter_For_Arduino_SKU__SEN0244)
- [38] MySQL. (2024) Why mysql? [Online]. Available: <https://www.mysql.com/why-mysql/>
- [39] Amazon Web Services, Inc., “Capa gratuita de aws | cloud computing gratis | aws,” Amazon Web Services, 2024. [Online]. Available: [https://aws.amazon.com/es/?nc2=h\\_lg](https://aws.amazon.com/es/?nc2=h_lg)
- [40] C. Bottini, *Genera certificados HTTPS para tu Web*, ser. Informes USERS. RedUsers, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=ARF1EAAAQBAJ>
- [41] GitHub. (2024) Connecting to github with ssh. [Online]. Available: <https://docs.github.com/en/authentication/connecting-to-github-with-ssh>
- [42] R. Benedettelli, *Java Spring Boot Español 2022: Desarrollo java*, ser. 1. Rafael Benedettelli, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=xRSbEAAAQBAJ>
- [43] J. PRODUCTIONS, *HTML DESDE 0 - ¿Como Funciona HTML? - Aprender HTML Facil Y Rapido / Libro Para Principiantes Y Avanzados En El Mundo De La Programacion: html para principiantes - aprender html para novatos*. JSGS PRODUCTIONS. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=YBf0DwAAQBAJ>
- [44] R. Schulz, *Diseño web con CSS*. Marcombo, 2009. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=ZgI2WfHjPiEC>
- [45] P. Prescott and M. Calaón, *La programación JavaScript*. Babelcube Incorporated, 2017. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=DADnDQAAQBAJ>
- [46] J. Hernández, *Aprender Docker, un enfoque práctico*. Marcombo, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=FAIjEAAAQBAJ>

- [47] B. Varanasi, *Introducing Maven: A Build Tool for Today's Java Developers*. Apress, 2019. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=ECe7DwAAQBAJ>
- [48] Coursera. (2024) What is git? [Online]. Available: <https://www.coursera.org/articles/what-is-git>
- [49] P. von Oven, *Learning VMware Workstation for Windows: Implementing and Managing VMware's Desktop Hypervisor Solution*. Apress, 2023. [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=dhQm0AEACAAJ>
- [50] S. Pinzón Núñez, R. Rodríguez Guerrero, and C. Vanegas, *Java y el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC)*, ser. Espacios Series. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2019. [Online]. Available: [https://books.google.com.co/books?id=5FS\\_EAAAQBAJ](https://books.google.com.co/books?id=5FS_EAAAQBAJ)
- [51] N. D. F. K. N. M. Sanctuary, "Water quality: Frequently asked questions," 2009. [Online]. Available: <http://sanctuaries.noaa.govhttp://floridakeys.noaa.gov/>
- [52] OMEGA, "Sensores inalámbricos." [Online]. Available: <https://mx.omega.com/prodinfo/sensores-inalambricos.html>
- [53] V. Giraldo, "Plataformas digitales: ¿qué son y qué tipos existen?" 2019. [Online]. Available: <https://rockcontent.com/es/blog/plataformas-digitales/>
- [54] A. P. P. J., Gardey, "Definición de protocolo de comunicación - qué es, significado y concepto," 2013. [Online]. Available: <https://definicion.de/protocolo-de-comunicacion/>
- [55] OMEGA, "Monitoreo remoto." [Online]. Available: <https://mx.omega.com/technical-learning/monitoreo-remoto.html>
- [56] "Qué es una protoboard? - 330ohms." [Online]. Available: <https://blog.330ohms.com/2016/03/02/protoboards/>
- [57] "Sistema embebido y sus características | conceptos fundamentales." [Online]. Available: <https://tech.tribalyte.eu/blog-sistema-embebido-caracteristicas>

