

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN SISTEMAS
COMPUTACIONALES

DESARROLLO DE SISTEMA IoT DE MONITOREO DE LA
CONTAMINACIÓN EN TIEMPO REAL PARA LA GESTIÓN DE
AGUA RESIDUAL TEXTIL DEL LAVADO DE LA MEZCLILLA

TESIS

Para obtener el título de

INGENIERO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

Presenta:

Deivid Irineo Rojas Zetina

Asesor(a):

Mtra. María Guadalupe Pineda Arizmendi.

Revisores:

Dr. Luis Antonio Castillo Suárez.

Ing. Genaro Chávez León.

Santiago Tianguistenco, Estado de México, mayo 2026.

HOJA DE PERMISO DE DATOS

Mediante esta carta hago constar que el trabajo de tesis presentada en este documento es original; porque cita debidamente los contenidos utilizados como soporte a la investigación presentada. Por lo que exonero al Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco de cualquier problema de derechos de propiedad intelectual.

Deivid Irineo Rojas Zetina

RESUMEN

El presente proyecto surge como una propuesta orientada a fortalecer la gestión ambiental mediante la implementación de un sistema de monitoreo automatizado en tiempo real para medir la calidad de los cuerpos de agua. Existe un flujo constante de desechos desde fábricas, campos de cultivo y hasta nuestros propios hogares que terminan en algún cuerpo de agua. Las consecuencias son muy visibles, en los ecosistemas que se deterioran y comunidades con menos acceso a agua potable. La metodología empleada para este proyecto fue la metodología de “prototipado”, debido a su enfoque en la creación de modelos funcionales en etapas tempranas del desarrollo. Esta metodología permite elaborar versiones preliminares del sistema, lo cual ayuda mucho en este caso ya que se requieren hacer pruebas constantes, obtener retroalimentación y realizar mejoras progresivas hasta alcanzar un buen resultado. El sistema integra sensores fisicoquímicos encargados de medir parámetros como pH, temperatura, conductividad y potencial redox, los cuales se encuentran conectados a un microcontrolador ESP32S que permite la recopilación y transmisión de los datos en tiempo real. La información es enviada a una página web, donde se procesa y se presenta de forma clara además de comprender mediante un mapa de México con puntos claros con los que se puede interactuar, facilitando su interpretación por parte de usuarios interesados. Entre los resultados esperados se encuentra, la disminución de los tiempos de respuesta ante posibles contaminantes y la mejora en los procesos de supervisión en comparación con los métodos manuales. En conclusión, el desarrollo de esta red de monitoreo representa una solución tecnológica a la desinformación e ignorancia de la sociedad ante la contaminación del agua, al integrar las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) con el automatismo y visualización de datos.

ABSTRACT

The present project arises as a proposal aimed at strengthening environmental management through the implementation of an automated real-time monitoring system to measure water quality. The problem of water contamination is not new, but the solutions have remained delayed or obsolete. There is a constant flow of waste from factories, agricultural fields, and even our own homes that ends up in some body of water. The consequences are very visible, in deteriorating ecosystems and communities with less access to drinking water. The methodology used for this project was the “prototyping” methodology, due to its focus on the creation of functional models in early stages of development. This methodology allows the development of preliminary versions of the system, which is very helpful in this case since constant testing, feedback collection, and progressive improvements are required until a good result is achieved. The system integrates physicochemical sensors responsible for measuring parameters such as pH, temperature, conductivity, and redox potential, which are connected to an ESP32S microcontroller that allows real-time data collection and transmission. The information is sent to a web page, where it is processed and presented in a clear and understandable manner through a map of Mexico with clear interactive points, facilitating its interpretation by interested users. Among the expected results are the reduction of response times to potential contaminants and the improvement of supervision processes compared to manual methods. In conclusion, the development of this monitoring network represents a technological solution to society’s lack of information and awareness regarding water contamination, by integrating Internet of Things (IoT) technologies with automation and data visualization.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi vida donde logre culminar mi carrera profesional y mi vida escolar.

Agradezco a mis padres, Alfredo Rojas Flores, Elizabeth Zetina Castro por apoyarme en todo momento a lo largo de mi vida, nunca me dejaron solo en los malos momentos y nunca terminare de agradecerles, sin su ayuda no hubiera llegado hasta aquí.

Agradezco profundamente a mi abuela, Teresa Castro Gonzalez, quien me crio y educo durante toda mi vida hasta ahora.

Agradezco a mis hermanos menores, Axel Alfredo Rojas Zetina, Elizabeth Rojas Zetina y Ángel Rojas Zetina los cuales fueron una motivación constante durante todo mi trayecto y espero inspirarlos a que logren sus metas a futuro.

Agradezco a mis amigos, Luis Manuel Morales López, Brayan Ordoñez Gonzalez, Aelin Eliuth Hernández López, Alex Gonzalez Flores y Ricardo Alejandro Sánchez González quienes hicieron mi estancia en la universidad más llevadera y mostrándome un lado diferente de la vida

Agradezco a los profesores que fueron fundamentales en este proceso y en especial a María Guadalupe Pineda Arizmendi, Luis Antonio Castillo Suarez, Genaro Chávez León, Cristian Rojas por su tiempo y dedicación y paciencia que me tuvieron al ser mis maestros.

También agradezco a todas las personas que durante el proceso de mi carrera me tendieron la mano o me ayudaron de una forma u otra dándome consejos, motivación, reflexiones etc.

Al Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco por el financiamiento otorgado a través del proyecto de la Mtra. Guadalupe Pineda Arismendi destinado a la ejecución de las pruebas experimentales de dicha investigación y por el apoyo financiero destinado a estudiantes que participan en el proyecto.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a personas que han sido un pilar fundamental en mi vida y de mi formación profesional, así como a mis padres, tanto por su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio, les agradezco por brindarme las herramientas necesarias para salir adelante, por confiar en mí y por apoyarme en cada paso de este camino.

A mis hermanos, por compartir conmigo alegrías, tristezas, aprendizaje y nunca dejarnos solos, gracias por estar presentes y por impulsarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mi abuela, por su cariño, sus consejos y el ejemplo de fortaleza y perseverancia que siempre me ha brindado, su apoyo y sus palabras han sido una fuente constante de inspiración, muchas gracias por todo.

A mis familiares cercanos, quienes de una u otra forma me acompañaron durante esta etapa tan importante, brindándome ánimo, comprensión y confianza para continuar persiguiendo mis metas.

Finalmente, dedico este trabajo a todos ellos, porque su apoyo y confianza fueron parte fundamental para alcanzar este importante logro académico.

Este logro también les pertenece a ustedes.

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS	II
Hoja de originalidad.....	III
HOJA DE PERMISO DE DATOS.....	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
AGRADECIMIENTOS.....	X
DEDICATORIA	XI
ÍNDICE GENERAL	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XVIII
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	3
1.1 Sistema Nacional de Información del Agua (SINA).....	3
1.2 Sistema de Información Hidrológica (SIH).....	3
1.3 Ley de Aguas Nacionales (LAN, 1992).....	4
1.4 Registro Público de Derechos de Agua (REPD, 1993).....	5
2. Marco teórico.	5
2.1 Fundamentos teóricos del monitoreo de la calidad del agua.	6

2.1.1	Ámbito social.....	6
2.1.2	Ámbito tecnológico.	6
2.1.3	Cuerpo de agua.	7
2.1.4	Importancia del monitoreo de la calidad del agua.	7
2.1.5	Gestión de los recursos hídricos.	8
2.1.6	Parámetros de medición.....	8
2.1.7	Calidad del agua.	8
2.1.8	Contaminación de los cuerpos de agua.....	9
2.1.9	Indicadores ambientales.....	9
2.1.10	Ámbito computacional.	9
2.1.11	Sistema de monitoreo.	10
2.1.12	Sensores.	10
2.1.13	pH.....	10
2.1.14	Conductividad.....	11
2.1.15	Temperatura.	11
2.1.16	Potencial de óxido-reducción.....	11
2.2	Marco referencial y normativo.....	12
2.2.1	Legislación y normatividad en materia de agua.	12
2.2.2	Normas aplicables a la calidad del agua.....	12

2.2.3 Cumplimiento normativo en sistemas de monitoreo.....	12
2.2.4 Protección legal de los recursos hídricos.	13
2.2.5 Evaluación ambiental y normatividad.....	13
2.2.6 Parámetros críticos de medición	14
2.2.7 Marco legal y estandarización.	14
2.2.8 Rol de las instituciones reguladoras del agua.	14
2.2.9 Clasificación de los cuerpos de agua receptor.....	15
2.2.10 NOM-001-SEMARNAT-2021.....	15
2.2.11 Índice de calidad del agua (ICA).....	16
2.2.12 Protocolos de vigilancia hidrológica.	16
2.3 Arquitectura y fundamentos computacionales.	16
2.3.1 Arquitectura de sistemas de monitoreo.	16
2.3.2 Internet de las cosas (IoT).....	17
2.3.3 Adquisición de datos.....	17
2.3.4 Monitoreo en tiempo real.....	17
2.3.5 Almacenamiento y procesamiento de la información.	18
2.3.6 Visualización de la información.	18
2.3.7 Análisis de series temporales.	19
2.3.8 Sistemas de alerta temprana (Early Warning Systems - EWS).	19

2.3.9 Calibración y mantenimiento de sensores (Biofouling).....	20
2.3.10 Protocolos de comunicación (LoRaWAN, MQTT, HTTP).....	20
2.3.11 Dashboard e interfaz de usuario (UI/UX).	21
2.3.12 Metodología de prototipado.....	22
2.3.13 Fase de análisis de requerimientos de la metodología de prototipado.....	22
2.3.14 Fase de diseño de prototipo.....	22
2.3.15 Fase de construcción del prototipo.....	23
2.3.16 Fase de evaluación y pruebas del prototipo.	23
2.3.17 Fase de refinamiento e implementación del sistema.....	23
2.3.18 Html.	23
2.3.19 Conjuntos de datos	24
2.3.20 ESP32S.....	24
2.3.21 Página web.....	24
2.3.22 Css.	25
2.3.23 JavaScript.....	25
3. Planteamiento del problema.	26
4. Justificación.....	27
5. Objetivos.....	28
5.1 Objetivo general.....	28

5.2 Objetivos específicos.....	28
6. Hipótesis.	29
7. Metodología.....	30
7.1 Selección de tecnologías para el desarrollo del sistema.....	30
7.2 Desarrollo del primer prototipo.	31
7.3 Evolución y desarrollo de los siguientes prototipos.	31
7.4 Corrección y mejora del prototipo.....	33
7.4 Pruebas finales.	34
8. Enfoque metodológico.	35
8.1 Arquitectura del sistema.....	36
8.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	36
8.3 Justificación del sistema.....	36
8.3.1 Sensores.	37
8.3.2 ESP32S.....	37
8.3.3 API.	37
8.3.4 Base de datos.	37
8.3.5 Interfaz gráfica.	37
8.3.6 Lenguaje backend.....	38
8.3.7 Lenguaje frontend.	39

8.3.8 Librerías de visualización	39
8.3.9 API RESET para recibir datos del ESP32S	39
8.3.10 Escalabilidad.	40
8.3.11 Mantenimiento.	40
8.4 Pruebas de funcionamiento de sensores	40
8.5 Pruebas de comunicación ESP32S-Servidor.....	40
8.6 Pruebas de carga de base de datos.	41
8.7 Ajustes realizados.	41
9. Calibración de sensores.....	42
9.1 Recolección, análisis y presentación de datos.	43
9.2 Comparación con el equipo HQ4200.	45
9.3 Análisis estadístico.....	45
9.4 Resultados y discusión.....	47
10. Conclusiones.....	48
10.1 Trabajo futuro y/o recomendaciones.....	49
10.2 Experiencia personal y profesional adquirida	49
10.3 Competencias desarrolladas y/o aplicadas	49
Bibliografía.....	50
Anexo 1A congreso en Ciudad madero Tamaulipas.	55

Anexo 1B Congreso de Barcelona España.	56
Anexo 1C Artículo de divulgación	57
Anexo 2A Prueba de recepción de datos en Google Sheets.....	58
Anexo 2B Tabla de valores obtenidos del H2OG y HQ4200.	59
Anexo 3A Manual de usuario.	65
Anexo 3B Manual técnico	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores obtenidos del dispositivo HO2G. (Elaboración propia).	61
Tabla 2 Valores obtenidos por el dispositivo HQ4200	64
Tabla 3 Requerimientos del hardware	79
Tabla 4 Conexiones de los sensores hacia el ESP32S con su función. (Elaboración propia).	81
Tabla 5 roles y permisos dentro del sistema (Elaboración propia).	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de la metodología general del proyecto, Fuente: Creación propia	30
Figura 2 Grafica de calibración de pH. (Elaboración propia).	32
Figura 3 Grafica de calibración de conductividad eléctrica. (Elaboración propia).	32
Figura 4 Prueba de calibración en laboratorio. (Elaboración propia).	33

Figura 5 Prueba de integración del dispositivo en un entorno real. (Elaboración propia)	34
Figura 6 Prueba de recepción de datos en Google Sheets. (Elaboración propia).	35
Figura 7 Interfaz gráfica principal Elaboración propia.	38
Figura 8 Interfaz gráfica de administrador Elaboración propia.	38
Figura 9 Grafica de comportamiento de conductividad eléctrica del dispositivo H2OG (Elaboración propia).	44
Figura 10 Grafica de comportamiento de conductividad eléctrica del dispositivo HQ4200 (Elaboración propia).	44
Figura 11 Grafica de comparación de ambos dispositivos midiendo pH. (Elaboración propia).	45
Figura 12 Análisis estadístico (ANOVA) entre los dispositivos H2OG y HQ4200 (Elaboración propia).	46
Figura 13 Reconocimiento de participación en congreso en Ciudad Madero Tamaulipas.	55
Figura 14 Aceptación de congreso en Barcelona, España.	56
Figura 15 Artículo de divulgación.	57
Figura 16 Prueba de recepción de datos en tiempo real. (Elaboración propia.).	58
Figura 17 Imagen de la interfaz principal de un mapa del cuerpo de agua monitoreado (Elaboración propia).	65
Figura 18 Imagen de la interfaz del login de acceso para los administradores de la página web (Elaboración propia).	66
Figura 19 Imagen de la interfaz principal del administrador (Elaboración propia).	67
Figura 20 Imagen del panel principal del administrador, con sus funciones (Elaboración propia).	68
Figura 21 Imagen de los paneles principales del administrador.	69
Figura 22 Imagen de los paneles secundarios del administrador (Elaboración propia).	69
Figura 23 Imagen del panel de “Gestión de datos” del administrador (Elaboración propia).	70

Figura 24 Imagen del panel de “Gestión de registros” del administrador (Elaboración propia).	71
Ilustración 25 Imagen del diagnóstico del ESP32S. (Elaboración propia).....	71
Figura 26 Imagen del panel para la gestión de usuarios del sistema (Elaboración propia).	72
Figura 27 Imagen del formato para agregar un nuevo usuario (Elaboración propia).72	
Figura 28 Imagen del panel de administración de usuarios (Elaboración propia).	74
Figura 29 Imagen del panel de administración de usuarios (Elaboración propia).	75
Figura 31 panel de los límites de los parámetros (Elaboración propia).	76
Figura 37 Panel de análisis de los datos generados por los sensores.	77
Figura 41 estructura de los directorios y archivos del sistema (Elaboración propia)..	80

Introducción.

En México la contaminación del agua por basura o desechos no tratados es un problema constante para la salud de las personas además de la naturaleza (Vidal Álvarez, 2018). Como lo indican los datos oficiales de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), solo alrededor del 57% de las aguas residuales colectadas en México reciben tratamiento adecuado, lo que significa que más del 40% se descarga directamente en cuerpos de agua sin el debido tratamiento previo. Además, cifras recientes señalan que más de la mitad de las fuentes de agua superficial del país presentan algún grado de contaminación, afectando ríos, lagos y presas, lo cual representa un riesgo directo para los ecosistemas y las comunidades que dependen de ellos (De la Peña, 2013). Gestionar este recurso de forma sostenible se convierte en un gran desafío, pero al mismo tiempo es muy necesario en estos días. Durante años, se han usado métodos de monitoreo tradicionales lo cual implica, ir al sitio, recoger una muestra, enviarla al laboratorio y esperar los resultados, comúnmente suele ser una foto borrosa que no refleja la realidad del problema. Estos métodos simplemente no pueden captar cambios rápidos en parámetros como la toxicidad y no alertan inmediatamente esto impide que se pueda actuar en caso de algún evento grave o peligroso para la salud pública o del medio ambiente. Los cuerpos de agua, como ríos, lagos, presas y humedales, no solo son fuentes de abastecimiento para consumo humano, agrícola e industrial, sino que constituyen ecosistemas vitales que sostienen la biodiversidad, regulan procesos ecológicos y contribuyen a la estabilidad climática local (Márquez, 1996).

Hoy en día con el avance de la tecnología además del abaratamiento de componentes electrónicos podemos tomar acciones ante estas problemáticas. Hoy es viable crear estaciones de monitoreo automático y permanente, hechas con sensores específicos y por microcontroladores accesibles para cualquiera. Estos sistemas hacen algo que antes era imposible, obtener y enviar datos al instante. Esto no es solo un incremento en la eficiencia, es un gran paso para el cuidado del medio ambiente. Permite una vigilancia constante, acceso remoto a la información y, sobre todo, la capacidad de tomar decisiones al momento o incluso prevenir un desastre.

En este contexto, la Ingeniería en Sistemas Computacionales desempeña un papel fundamental al integrar hardware, software y tecnologías de comunicación para la creación de soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT), análisis de datos y plataformas de visualización que permiten monitorear, evaluar y actuar sobre indicadores de calidad del agua en tiempo real (Vijayakumar, 2015). Estas herramientas permiten no solo recopilar datos, sino también automatizar alertas, facilitar el acceso remoto y generar modelos predictivos que apoyan la toma de decisiones informada para la gestión hídrica sostenible.

El presente documento describe el diseño e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real para la calidad del agua residual generada por una planta textil ubicada en Almoloya, Estado de México. El sistema se basa en la implementación de distintos sensores los cuales van a medir parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, conductividad y potencial redox, los cuales estarán conectados a un microcontrolador ESP32 responsable de la adquisición y transmisión de los datos hacia una página web.

1. Antecedentes.

1.1 Sistema Nacional de Información del Agua (SINA).

De acuerdo con (Peinado Guevara, 2015), El Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) fue desarrollado a mediados del año 2000 como una plataforma nacional orientada a la integración, organización y difusión de información añadida con los recursos hídricos en México. El objetivo principal es el análisis y la centralización de datos de varias dependencias, así como estaciones de monitoreo para una gestión más práctica del agua, para lograr esto, el sistema se construyó integrando bases de datos georreferenciadas la información que se incluye en dichas bases de datos se refiere a presas, volúmenes de descargas, niveles de almacenamiento, precipitación, calidad del agua y estadísticas hidrológicas. Para la implementación en las mismas se usaron herramientas de ingeniería de datos, así como Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que transigió la visualización de la información, así como su exportación. La metodología usada se basó en la compilación, estandarización y sistematización de los datos provenientes de diversas fuentes institucionales, garantizando coherencia y confiabilidad de la información recolectada. Entre los principales resultados que se obtuvieron se hallan principalmente la consolidación de un portal centralizado lo que facilita el acceso a la información para todo público, contribuyendo tanto a la transparencia, así como a la toma de resoluciones para la gestión del agua. Aun así, distintos análisis lo señalan como áreas de oportunidad para mejorar en la interoperabilidad entre los sistemas regionales, la actualización en tiempo real de ciertos parámetros y el fortalecimiento de los mecanismos de acceso público a datos dinámicos.

1.2 Sistema de Información Hidrológica (SIH).

El Sistema de Información Hidrológica (SIH), fue implementada en el año 2000, se diseñó como una plataforma para la diligencia y consulta de datos hidrométricos y climatológicos generados por varias estaciones distribuidas en distintos lugares, su propósito fue organizar datos para su acceso público a registros históricos y actuales relacionados con variables como caudal, precipitación, niveles de ríos y almacenamiento en presas.

El funcionamiento del sistema se basa en la recolección de datos provenientes de diversas estaciones hidrométricas y climatológicas, mediante distintos procesos tanto automáticos, así como manuales, la información que se recolectó fue almacenada en bases de datos estructuradas de tal manera que permita consultar la información que se requiera en el momento que se desee, además de realizar análisis comparativo y la generación de reportes estadísticos. Para su desarrollo se emplearon plataformas de gestión de bases de datos además de herramientas de monitoreo hidrológico y sistemas digitales para la correcta administración de la información, siguiendo una metodología de sistematización y actualización constante. El resultado fue que el SIH ha permitido el acceso a datos históricos confiables para el apoyo de estudios hidrológicos, así como la evaluación de riesgos asociados a fenómenos naturales, aun con esto, de entre las propuestas de mejora identificadas en estudios posteriores se encuentra la posterior cobertura en tiempo real de los datos, la modernización de estaciones de monitoreo (Gómez-Reyes, 2020).

1.3 Ley de Aguas Nacionales (LAN, 1992).

La Ley de Aguas Nacionales (LAN), promulgada en 1992 y posteriormente reformada, constituye el marco jurídico fundamental para la gestión, regulación y aprovechamiento de las aguas nacionales en México. Su propósito principal fue establecer las bases legales para la administración integral del recurso hídrico, definiendo competencias institucionales, mecanismos de concesión, obligaciones de usuarios y criterios para la preservación de la calidad del agua. La implementación de la LAN se estructuró mediante la creación de instrumentos normativos que regulan la extracción, descarga, tratamiento y monitoreo del agua, así como la obligación de reportar información relacionada con volúmenes, calidad y uso del recurso. Como parte de su aplicación, se desarrollaron inventarios de fuentes de agua, registros de concesiones y permisos, así como mecanismos de supervisión y control apoyados en sistemas de información oficiales. La metodología adoptada por la ley se basa en un enfoque de gestión integrada de recursos hídricos, combinando regulación normativa, supervisión técnica y recopilación sistemática de datos. Entre los principales resultados derivados de su aplicación se encuentra la consolidación de una base legal que permitió exigir transparencia en la información hídrica, fortalecer la fiscalización de descargas y sentar las bases para la creación de sistemas nacionales como el SINA. No obstante, diversos análisis

académicos señalan que persisten desafíos relacionados con la actualización tecnológica de los mecanismos de monitoreo, la disponibilidad de datos en tiempo real y la modernización de procesos de reporte y supervisión según (Nedvedovich, 2007).

1.4 Registro Público de Derechos de Agua (REPDa, 1993).

El Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), creado en 1993 como un medio derivado de la Ley de Aguas Nacionales, con el objetivo de garantizar la seguridad jurídica, administración además de consulta de concesiones relacionadas con el uso de aguas nacionales en México, consiste en organizar la información obtenida administrativamente como geoespacial relativa a títulos de concesión, asignaciones, permisos y autorizaciones, en cuanto a su implementación, se realizó una base administrativa estructurada mediante la indexación y gestión digital de registros. Las herramientas utilizadas incluyeron sistemas de bases de datos relacionales con plataformas para la consulta pública de datos y mecanismos de actualización en tiempo real de la información, la metodología aplicada fue basada en la sistematización de los datos, validación documental y registro formal de actos administrativos. En cuanto a los resultados obtenidos se destaca la consolidación de un sistema que brinda la transparencia, trazabilidad y certeza jurídica respecto a los derechos del uso del agua, permitiendo identificar la titularidad, el volumen autorizado, la ubicación geográfica, la fecha de otorgamiento, las restricciones y los antecedentes históricos. Sin embargo, diversos análisis académicos han señalado la necesidad de fortalecer la actualización constante de los registros, mejorar la interoperabilidad con otros sistemas nacionales de información hídrica y vincular los datos administrativos con plataformas de monitoreo en tiempo real que permitan una supervisión más eficiente del cumplimiento de las condiciones establecidas en los títulos concesionados según (Gómez Arias, 2020).

2. Marco teórico.

En México, algunas instituciones han desarrollado proyectos orientados al monitoreo de la calidad del agua, por ejemplo, en el estado de Sonora, los investigadores Bórquez-López y otros (Bórquez-López, y otros, 2017) en el Instituto Tecnológico de Sonora implementaron un sistema basado en hardware de acceso abierto para monitorear variables como el oxígeno

disuelto, temperatura y pH en cultivos de camarón, para evaluar el estado del agua y apoyar las decisiones para manejo acuícola. Otro ejemplo de la ejecución de este tipo de sistemas es en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez, se han desarrollado proyectos de monitoreo de cuerpos de agua como en el río Sabinal y las lagunas de Montebello, utilizando sensores fisicoquímicos y plataformas digitales para verificar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, como la Norma Oficial Mexicana SSA-1-2001.

Con estos antecedentes se presenta, una evidente creciente tendencia por parte de las instituciones interesadas en el tema, hacia el uso de sistemas automatizados de monitoreo en tiempo real como una herramienta de apoyo para la gestión de este recurso vital para la vida. Sin embargo, aún existen posibilidades de mejora para las soluciones que se adapten a las necesidades de las industrias según sea el caso, integrando tecnologías de bajo costo como lo es el Internet de las Cosas (IoT), páginas web y dispositivos microcontroladores. En este sentido, el presente proyecto se presenta como uno de estos esfuerzos para el cuidado del agua, tanto para el sector privado o público, al proponer un sistema de monitoreo de la calidad del agua residual en un entorno industrial del Estado de México, contribuyendo al favoreciendo la prevención y las estrategias de vigilancia y la protección del agua.

2.1 Fundamentos teóricos del monitoreo de la calidad del agua.

2.1.1 Ámbito social.

En el monitoreo de la calidad del agua, el ámbito social se refiere a la relación entre las comunidades, las instituciones públicas y privadas, así como a las políticas y prácticas orientadas a la gestión y conservación del recurso hídrico, las cuales influyen directamente en la sostenibilidad del agua y en el bienestar social (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Water governance and sustainable development., 2021).

2.1.2 Ámbito tecnológico.

En el contexto del monitoreo de la calidad del agua, el ámbito tecnológico se refiere a las herramientas, dispositivos y sistemas tecnológicos que puedan medir, obtener y transmitir datos relacionados con los parámetros fisicoquímicos del agua que se deseen. Este ámbito

incluye tanto el uso de sensores como equipos de medición, sistemas de obtención de datos y plataformas digitales que facilitan el monitoreo en tiempo real y el análisis de la información se vuelve más eficiente (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Tecnologías digitales para la gestión sostenible del agua., 2021). El uso de tecnologías de bajo costo como lo son los microcontroladores permite la implementación de sistemas accesibles para instituciones públicas y privadas además del público en general, capaces de transmitir información en páginas web para su visualización. Estas propuestas han demostrado ser una alternativa no solo viable, sino que, hasta cierto punto necesaria, debido a la creciente contaminación del agua, tanto para generaciones futuras como para las actuales, especialmente en entornos donde se requiere supervisión continua, como zonas industriales o cuerpos de agua cercanos a áreas habitadas.

2.1.3 Cuerpo de agua.

De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Instituto de Hidrología M. y., 2021), un cuerpo de agua se entiende como la acumulación natural o artificial que se puede encontrar de manera superficial o subterráneo. Estos cuerpos en su mayoría son ríos, arroyos, lagos, lagunas, embalses, humedales, acuíferos o cualquier otra masa de agua que interactúe con un entorno biológico. Su ciclo natural consta de ciertos procesos como la precipitación, escorrentía, infiltración, evaporación, evapotranspiración, los cuales determinan su disponibilidad, calidad y comportamiento.

2.1.4 Importancia del monitoreo de la calidad del agua.

De acuerdo con la World Health Organization (Organization, 2021), el monitoreo de la calidad del agua es una actividad fundamental para garantizar la protección de los cuerpos de agua y al mismo tiempo la salud humana además de la conservación de los ecosistemas acuáticos. A través del monitoreo constante de parámetros físicos, químicos y biológicos, es posible identificar cambios en el estado de los cuerpos de agua mediante estas técnicas de monitoreo.

Asimismo, el monitoreo en la calidad de los cuerpos de agua proporciona información vital para la gestión adecuada del agua, ya que permite apoyar a la toma de decisiones por parte de las autoridades encargadas de su cuidado y los usuarios interesados en el tema, contribuyendo a la prevención de riesgos sanitarios y ambientales asociados a la degradación de este recurso (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 2020).

2.1.5 Gestión de los recursos hídricos.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 2021), la gestión de los recursos hídricos se tiene como un enfoque que impulsa el desarrollo y el manejo adecuado del agua y los recursos relacionados, con el objetivo de aumentar el bienestar de la población a la que este conectada el cuerpo de agua, gestionarlo de manera igualitaria, sin comprometer los ecosistemas. Tomando esto en cuenta, el monitoreo de la calidad del agua es una herramienta esencial en cuanto a la gestión del agua se refiere, ya que proporciona información confiable, así como transparente sobre el estado en el que se encuentran los cuerpos de agua, permitiendo así que se puedan evaluar los impactos ambientales.

2.1.6 Parámetros de medición.

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Instituto de Hidrología & Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, 2021), los parámetros de medición son un conjunto de variables físicas, químicas y biológicas que se seleccionan específicamente con el propósito de evaluar el estado del agua, la calidad y su comportamiento. La elección de dichos parámetros depende de los objetivos de cada estudio y las características del cuerpo de agua. Los parámetros que normalmente son empleados se incluyen variables como temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y caudal, así como parámetros físicos, químicos, microbiológicos y de nutrientes, estos permiten identificar alteraciones naturales o artificiales en el cuerpo de agua.

2.1.7 Calidad del agua.

Según (Pérez, Rodríguez, & Gómez, 2020) La calidad del agua se comprende como el conjunto de particularidades físicas, químicas y biológicas que comprenden un cuerpo de

agua el cual se decidirá si es apto para un cierto uso de acuerdo con sus características obtenidas, ya sea tanto para el consumo humano, el uso de la industria o conservación de ecosistemas. La evaluación de la calidad del agua autoriza el identificar alteraciones hechas por los procesos naturales o por actividades humanas, las cuales pueden generar impactos negativos sobre la salud humana y para los ecosistemas a los cuales estén vinculados.

2.1.8 Contaminación de los cuerpos de agua.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020), la contaminación de los cuerpos de agua se entiende como la introducción directa o indirecta de sustancias físicas, químicas o biológicas que alteran las características naturales de algún cuerpo de agua, afectando sus parámetros y por ende su calidad, limitando sus usos para el consumo humano. Estas sustancias pueden modificar parámetros fisicoquímicos como el pH, la conductividad, etc., generando mala calidad para la vida acuática. La contaminación del agua representa un problema ambiental y sanitario de gran relevancia, ya que puede provocar riesgos para la salud humana.

2.1.9 Indicadores ambientales.

En cuanto al ámbito ambiental, los indicadores ambientales se definen como variables que permiten valorar el estado de los ecosistemas y sus efectos provocados por los humanos al medio ambiente. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2020), sostiene que estos indicadores facilitan la medición de cambios ambientales relevantes para la toma de decisiones y en la gestión de los recursos naturales. Los indicadores ambientales incluyen parámetros fisicoquímicos y biológicos que reflejan el comportamiento de los cuerpos de agua tanto de los que se están monitoreando como los que no además de que permiten identificar alteraciones asociadas a procesos de contaminación, descargas de residuos o cambios en su entorno. El análisis de estos indicadores resulta fundamental para evaluar la calidad del agua.

2.1.10 Ámbito computacional.

De acuerdo con (Comisión Nacional del Agua, 2023), el ámbito computacional en los sistemas de monitoreo del agua se entiende como un conjunto de herramientas, metodologías

y tecnologías informáticas utilizadas para la obtención, almacenamiento, análisis y visualización de datos ambientales. Dicho ámbito integra componentes como sensores digitales, sistemas de adquisición de datos, bases de datos, sistemas de información geográfica (SIG) gestiona grandes volúmenes de información de manera continua.

2.1.11 Sistema de monitoreo.

Un sistema de monitoreo se define como el conjunto de componentes técnicos, metodológicos y computacionales para la observación continua, medición, registro y análisis de variables específicas, en este caso, la calidad del agua. Un sistema de monitoreo consta de elementos como puntos de muestreo, sensores, equipos de medición, protocolos de recolección de datos y plataformas computacionales, esto con el objetivo de evaluar de mejor manera el estado de los cuerpos de agua e identificar posibles fuentes de contaminación (Comision Nacional del Agua, 2023; Pérez, Rodríguez, & Gómez, 2020).

2.1.12 Sensores.

Como señalan (Pérez, Rodríguez, & Gómez, 2020; Ramírez, 2024), los sensores son dispositivos diseñados para detectar, medir y convertir variables físicas por ejemplo el pH, en señales que pueden ser interpretadas por computadoras para posteriormente ser visualizadas por personas. La incorporación de sensores en sistemas de monitoreo hídrico mejora en gran medida la precisión de las mediciones reduce la dependencia del muestreo manual y permite una evaluación más eficiente del estado de los cuerpos de agua, así como la detección temprana de procesos de contaminación.

2.1.13 pH.

El pH es una medida que representa el grado de acidez o alcalinidad de una solución acuosa usada para medir la calidad en el agua. Se refiere a la escala logarítmica del potencial de hidrógeno, que representa la concentración de iones de hidrógeno (H^+) presentes en el agua. En la escala de pH sus valores normalmente se encuentran entre 0 y 14, siendo un valor de 7 como neutro, los valores menores a 7 señalan acidez y los valores mayores a 7 indican alcalinidad. El pH es un parámetro importante ya que esta influye en los procesos químicos y biológicos del agua, afectando la solubilidad, la disponibilidad de nutrientes y la salud de

los organismos que residen en el cuerpo de agua que esté siendo afectado. Un nivel de pH que no esté entre los parámetros normales, puede indicar un nivel de contaminación que lo hace no apto para su uso según (Futuro Ambiental, 2025).

2.1.14 Conductividad.

Según el (Instituto del Agua, Parámetros fisicoquímicos en el monitoreo de la calidad del agua, 2024), la conductividad eléctrica es un parámetro fisicoquímico que mide la capacidad que tiene el agua para una conducir corriente eléctrica, la cual depende normalmente de la concentración de iones disueltos, como sales, minerales y compuestos inorgánicos que se encuentren dentro del cuerpo de agua. En el monitoreo del agua, la conductividad se utiliza comúnmente como un indicador indirectamente del nivel de mineralización y salinidad, ya que si los valores son elevados pueden asociarse con contaminación, descargas industriales o infiltración de residuos.

2.1.15 Temperatura.

De acuerdo con (Instituto del Agua, Parámetros físicos en el monitoreo de la calidad del agua: la temperatura como indicador ambiental, 2024), la temperatura del agua es un parámetro físico que representa el grado de calor de un cuerpo de agua, este es un claro indicador de la calidad en un cuerpo de agua. La temperatura influye en distintas propiedades para la calidad del agua, como su capacidad para disolver gases, su velocidad de reacciones químicas, su actividad biológica y la capacidad de solubilidad de sustancias químicas. Los cambios en la temperatura pueden indicar anomalías ambientales, ya que las variaciones de esta pueden afectar significativamente la vida acuática del cuerpo de agua en cuestión.

2.1.16 Potencial de óxido-reducción.

Según la Guía de calidad del agua para consumo humano (Instruments, 2021), el potencial de óxido-reducción conocido más comúnmente como ORP por sus siglas en inglés (“Oxidation-Reduction Potential”) es un parámetro fisicoquímico que expresa la capacidad del agua para aceptar o donar electrones en reacciones de oxidación y reducción, y se mide en milivoltios (mV). Este valor refleja la tendencia del agua a actuar como agente oxidante

o reductor, lo que tiene implicaciones en los procesos químicos y microbiológicos que ocurren en los cuerpos de agua.

2.2 Marco referencial y normativo.

El marco referencial y normativo establece el conjunto de disposiciones legales, normas técnicas y lineamientos institucionales que regulan la gestión, el uso y la calidad del agua.

2.2.1 Legislación y normatividad en materia de agua.

De acuerdo con la (Comisión Nacional del Agua, Marco legal y normativo del agua en México, 2023), la evaluación de la calidad del agua implica analizar un estado donde las propiedades físicas y químicas deben mantenerse controladas dentro de ciertos rangos específicos para garantizar la vida de los ecosistemas y el uso humano. La legislación en materia de agua en México está conformada por diferentes leyes y reglamentos que regulan el uso del agua, además de su aprovechamiento, preservación y control del recurso. Estas normas establecen las bases legales para la gestión integral del agua.

2.2.2 Normas aplicables a la calidad del agua.

De acuerdo con (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Normas aplicables a la calidad del agua en México, 2023), las normas aplicables a la calidad del agua son instrumentos legales que establecen los parámetros y límites permisibles que deben cumplirse para garantizar la calidad y el cuidado del agua para el consumo humano, el uso agrícola o en casos más alarmantes la preservación de los ecosistemas.

2.2.3 Cumplimiento normativo en sistemas de monitoreo.

En el contexto de la gestión ambiental, el cumplimiento normativo se refiere a la observación y aplicación de las disposiciones legales, normas y lineamientos establecidos por las autoridades competentes. Según la (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Cumplimiento normativo en la gestión ambiental y la calidad del agua, 2024), señala que el cumplimiento de la normativa en materia de calidad del agua es fundamental para garantizar que los procesos de monitoreo se realicen adecuadamente y conforme a los parámetros establecidos por la legislación vigente. En los sistemas de monitoreo de la calidad del agua,

implica que la medición de parámetros, registros y evaluaciones de los fisicoquímicos se ajusten a los límites permitidos y que se realicen bajo metodologías reconocidas oficialmente. Con esto en cuenta, los datos obtenidos pueden generar la transparencia de los mismos, así como adquieren validez legal, lo que permite que la información generada sea usada para la toma de decisiones para la gestión del recurso.

2.2.4 Protección legal de los recursos hídricos.

Desde el marco jurídico ambiental, la defensa legal de los recursos ácuos se refiere como el conjunto de disposiciones legales, así como normas y políticas que garanticen el uso sostenible y el control sobre los volúmenes de agua de manera responsable, la Comisión Nacional del Agua (Comisión Nacional del Agua, 2023), establece que estas disposiciones tienen la finalidad prevenir la contaminación del agua, así como regular el este recurso y resguardar su disponibilidad tanto para esta generación y las próximas a lo largo del tiempo. En México, la protección del agua legalmente se sustenta por la Ley de Aguas Nacionales, así como su reglamento, en conjunto con los derechos y obligaciones de los usuarios del agua, estas disposiciones legales son la base en la implementación de sistemas de monitoreo del agua, ya que establecen los criterios a evaluarse y así aplicarse medidas tanto de control, así como de conservación (Cámara de Diputados, 2023).

2.2.5 Evaluación ambiental y normatividad.

Dentro del ámbito de la gestión ambiental, así como la evaluación ambiental se entiende como el proceso mediante el cual se analizan y valoran los efectos de las actividades humanas y lo que estas provocan al medio ambiente. De acuerdo con (Lopez Ramos & Polo Mejia, 2024), se establece que la evaluación ambiental permite la verificación del cumplimiento de las normas, así como determinar si los volúmenes de agua se mantienen bajo una serie de condiciones adecuadas dentro de la calidad de los mismos conforme a los criterios establecidos, la normatividad en materia de calidad del agua permite proporcionar tanto los parámetros, como los límites permisibles y lineamientos técnicos que sirven como una referencia para la correcta evaluación del medio ambiente. Tomando esto en cuenta, el monitoreo sistemático de los parámetros fisicoquímicos del agua es una herramienta esencial para comparar los resultados obtenidos con los estándares ya establecidos, además de

identificar incumplimientos de parámetros o normas y respaldar la aplicación de medidas preventivas.

2.2.6 Parámetros críticos de medición

La valoración en la calidad del agua es la medición de las medidas ya establecidas como “buenas” para un estándar en la calidad del agua, lo cual permite determinar su estado y detectar las posibles fuentes de contaminación, estos parámetros funcionan como los indicadores clave en el comportamiento del cuerpo de agua que se esté tratando, aunado a esto evidencian las alteraciones provocadas por descargas residuales o cambios en el entorno. La evaluación de la calidad del agua se fundamenta con el monitoreo sistemático de parámetros críticos, estos se clasifican en físicos, químicos y biológicos. Entre los parámetros físicos se encuentran términos como la turbidez y la temperatura, los cuales son indicadores sensibles y fáciles de detectar, los parámetros químicos clave incluyen el pH, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto. La medición básica de estos indicadores permite diagnosticar el estado del agua e identificar las posibles fuentes de la contaminación (Atanacio Rojas, 2018).

2.2.7 Marco legal y estandarización.

El marco legal y de estandarización establecen los lineamientos para que los procesos de medición, evaluación y control de la calidad del agua se realicen bajo criterios seguros y comparables. De acuerdo con la (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023), la estandarización permite asegurar que los parámetros fisicoquímicos sean medidos de manera confiable, respaldados por los valores de referencia establecidos por la normativa aún vigente. La aplicación de estándares legales facilita la toma de decisiones por parte de las autoridades establecidas, al proporcionar información validada.

2.2.8 Rol de las instituciones reguladoras del agua.

Las instituciones que regulan el agua tienen una tarea crítica: son el árbitro que asegura que el recurso se gestione y proteja correctamente. Ellas diseñan y supervisan las normas que todos debemos seguir. Por ejemplo, en México la (Comisión Nacional del Agua, 2023) tiene la gran responsabilidad de administrar nuestras aguas y promover su conservación. Estas

entidades son las que fijan los límites permitidos para los parámetros químicos y vigilan cómo se monitorean. En última instancia, su papel es fundamental para que los datos que obtenemos sean confiables y sirvan realmente para prevenir la contaminación y cuidar el medio ambiente.

2.2.9 Clasificación de los cuerpos de agua receptor.

Es importante entender que la Ley de Aguas Nacionales no trata a todos los cuerpos de agua por igual. Su nivel de protección depende totalmente del uso que se les dé y de qué tan importantes sean para el entorno o la economía. Básicamente, se dividen en tres categorías: los Tipo A, que son la prioridad máxima porque son para consumo humano; los Tipo B, usados en la industria o el campo con reglas intermedias; y los Tipo C, que suelen recibir descargas y tienen límites menos estrictos. Para nosotros, esta división es clave al diseñar sistemas de monitoreo, ya que nos dice qué tan sensibles deben ser los sensores. No necesitas la misma precisión en un canal de riego que en una fuente de agua potable, y el sistema debe saber ajustarse a lo que exige la ley (Comisión Nacional del Agua, 2023).

2.2.10 NOM-001-SEMARNAT-2021.

Los protocolos de vigilancia hidrológica no son simplemente una lista de pasos a seguir; representan el cimiento técnico y metodológico que permite que la observación de nuestros recursos hídricos sea verdaderamente útil. Su propósito va más allá de la simple medición; establecen una hoja de ruta estandarizada que define desde dónde debemos colocar cada punto de monitoreo hasta con qué frecuencia es necesario capturar los datos, esto se considera vital debido a que sin los criterios claros tanto para registrar como para validar la información obtenida, los datos perderían su consistencia, por ende, su confiabilidad ante las autoridades (CONAGUA, 2022). Al implementar estos protocolos en la práctica, se logró algo fundamental: la capacidad de ver el “panorama completo”, ya no solo midiendo un momento aislado, sino que se pueden identificar las tendencias a largo plazo, así como detectar las variaciones extrañas que podrían indicar ilegalidades y localizar fuentes de contaminación de manera aún más precisa, esta continuidad es la que permite que la gestión del agua sea

preventiva. Aun con esto el uso de los sistemas automatizados con sensores no reemplazan del todo a los protocolos, sino que los complementan y potencian para una mejora en conjunto.

2.2.11 Índice de calidad del agua (ICA).

El Índice de Calidad del Agua (ICA) funciona como un resumen inteligente de la salud del agua. En lugar de analizar por separado la turbidez o la conductividad, esta herramienta agrupa todos los valores en un solo indicador numérico (IDEAM - Biblioteca de Publicaciones, 2018). Esta forma de presentar los resultados facilita muchísimo la comunicación; de un vistazo, podemos saber si el agua es 'buena' o está 'aceptable' sin enredarnos en tecnicismos. Para un sistema basado en sensores, usar el ICA es la mejor manera de entregar información que sea realmente útil para la toma de decisiones, logrando que el estado ambiental del agua sea comprensible para cualquier usuario final.

2.2.12 Protocolos de vigilancia hidrológica.

Los protocolos de vigilancia hidrológica no son solamente un listado de pasos a seguir, sino que representan el cimiento técnico y metodológico lo cual permite que la observación de los recursos hídricos sea verdaderamente útil, su propósito va más allá de una simple medición, se establece una hoja de ruta estandarizada la cual permite definir desde dónde debemos colocar cada punto de monitoreo hasta la frecuencia con la que es necesario capturar los datos. Esto es vital porque, sin estos criterios aclarados para registrar, así como validar la información, los datos perderían su consistencia y por consecuencia, su confiabilidad ante las autoridades, así como el público general (CONAGUA, 2022).

2.3 Arquitectura y fundamentos computacionales.

La arquitectura y los fundamentos computacionales de un sistema de monitoreo de cuerpos de agua describen la estructura y los procesos que permiten la adquisición, transmisión, almacenamiento de los datos generados por los sensores.

2.3.1 Arquitectura de sistemas de monitoreo.

De acuerdo con (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020), la arquitectura de un sistema de monitoreo se define como la estructura organizada de componentes de hardware y software que se comunican entre sí para la captura, transmisión, procesamiento y presentación de datos. En el caso del monitoreo de la calidad del agua, esta arquitectura integra sensores, dispositivos de adquisición, sistemas de comunicación y plataformas computacionales, permitiendo el flujo continuo de información desde el punto de medición hasta el usuario final.

2.3.2 Internet de las cosas (IoT).

De acuerdo con IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020), la arquitectura de un sistema de monitoreo se define como la estructura organizada de componentes de hardware y software que interactúa entre sí para la obtención, transmisión, procesamiento y presentación de datos todo esto mediante conexión directa entre ambas tecnologías. En el caso del monitoreo de la calidad del agua, esta arquitectura integra sensores, dispositivos de adquisición, sistemas de comunicación y plataformas computacionales, permitiendo el flujo constante de datos desde el lugar donde se están transmitiendo dichos datos hasta el usuario que los está requiriendo.

2.3.3 Adquisición de datos.

De acuerdo con (Garcia, & López,, 2020), la adquisición de datos se refiere al proceso por el cual las señales generadas por los sensores, son convertidas en datos legibles y almacenadas digitalmente para que así se permita su posterior procesamiento, en los sistemas de monitoreo de agua, este proceso es fundamental y prácticamente obligatorio, ya que esto garantiza que las mediciones de los parámetros fisicoquímicos sean registradas en tiempo real para una medición mucho más precisa y confiable, la adquisición de los datos comprende distintas etapas como lo son el muestreo, la conversión de señales analógicas a digitales y la transmisión de la información hacia páginas web, lo que facilita la evaluación de los cuerpos de agua.

2.3.4 Monitoreo en tiempo real.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2021), el monitoreo en tiempo real consiste en la obtención, transmisión y visualización continua de datos obtenidos a partir de sensores, permitiendo el reconocimiento de cambios en el cuerpo de agua de manera inmediata y segura además del estado de los parámetros que se están evaluando, debido a esto el monitoreo de agua resulta tanto más eficiente como práctico debido a la obtención y la detección temprana en las variaciones anormales de los parámetros establecidos, lo que contribuye a una rápida respuesta ante posibles contaminantes y/o factores externos. El monitoreo en tiempo real es una mejora a la eficacia de los sistemas de control del medio ambiente tradicionales, porque reduce la dependencia del muestreo manual y proporciona información actualizada en todo momento.

2.3.5 Almacenamiento y procesamiento de la información.

De acuerdo con (Hernández & Torres, 2020), el almacenamiento y procesamiento de la información se entiende como los procesos mediante los cuales los datos adquiridos por los sistemas son organizados, resguardados y analizados utilizando plataformas computacionales. El procesamiento de la información facilita la identificación de patrones lo cual hace más fácil la identificación de tendencias y anomalías en los parámetros fisicoquímicos, mientras que el almacenamiento de los datos permite una consulta histórica, comparación real con los datos y respaldo para la toma de decisiones en la gestión del cuerpo de agua.

2.3.6 Visualización de la información.

De acuerdo con (Few S. , 2020), la visualización de la información consiste en la representación gráfica de los datos mediante las herramientas visuales que facilitan su correcta interpretación, análisis y comprensión por parte de los usuarios que lo estén viendo. En los sistemas de monitoreo de la calidad del agua, la visualización permite presentar de manera clara los valores de los parámetros fisicoquímicos que se estén midiendo, favoreciendo la identificación de tendencias, variaciones y anomalías. La adecuada visualización de los datos contribuye a mejorar la toma de decisiones, ya que transforma grandes volúmenes de datos en información comprensible para todo público, apoyando el

seguimiento de la evaluación y estado de los cuerpos de agua y la evaluación de su calidad a lo largo del tiempo.

2.3.7 Análisis de series temporales.

El análisis de series temporales no es solo una técnica estadística en esencia es realmente, la memoria de un cuerpo de agua, por así decirlo, este método nos permite estudiar el cómo evoluciona una variable a lo largo de días, meses o incluso años, con el objetivo de distinguir lo que es un comportamiento natural de lo que representa la verdadera amenaza ambiental. En el monitoreo hídrico, esto es vital porque los parámetros fisicoquímicos son entes dinámicos: el agua no es una foto fija, sino que respira y cambia según el clima, la estación del año o incluso la posición del sol (Box, Jenkins, Reinsel, & Ljung, 2015). Pensemos que, en la temperatura o el oxígeno disuelto, es perfectamente normal que la temperatura suba al mediodía o que la conductividad varíe tras una tormenta fuerte; estas son fluctuaciones naturales, el valor real de las series temporales es que nos enseñan no a entrar en pánico sino que ante los cambios estacionales tomar acciones y permitir identificar de manera más precisa las alteraciones que no son normales en el cuerpo de agua y que podrían estar ligadas a algún contaminante externo. Al entender estos ciclos, podemos pasar de usar “límites rígidos” a establecer los valores de referencia dinámicos, esto significa que el sistema se vuelve mucho más inteligente y preciso al juzgar si un dato es preocupante o no.

2.3.8 Sistemas de alerta temprana (Early Warning Systems - EWS).

Los Sistemas de Alerta Temprana (EWS por sus siglas en inglés) no son solo un conjunto de dispositivos tecnológicos, sino que son más como una estrategia integral para la protección ambiental, esta radica más en la capacidad de detectar las anomalías, así como los riesgos en el momento indicado, emitiendo señales que permitan una respuesta preventiva, el objetivo final es evitar que un incidente aislado se convierta con el tiempo en algo irreversible. Según (UNDRR, 2022), estos sistemas son fundamentales tanto para vigilar las variables críticas como las no críticas, ya sea porque los peligros vengan de fenómenos naturales o por la actividad humana constante. En el caso específico del monitoreo del agua, un EWS se convirtió en más que una simple recolección de datos en bruto un ejemplo de esto es que, si

un parámetro como el pH o el oxígeno disuelto sale de los límites permitidos, o si se detecta un comportamiento que no coincide con los ciclos históricos, el sistema lo alertara inmediatamente. Un EWS moderno puede activarse por umbrales fijos, pero también se puede activar por análisis de tendencias y/o variaciones abruptas de forma aislada, que podrían parecer normales pero que en conjunto revelan un evento de contaminación en curso.

2.3.9 Calibración y mantenimiento de sensores (Biofouling).

La calibración, así como el mantenimiento de los sensores no son tareas secundarias que deben realizarse, sino que es algo prácticamente obligatorio en cualquier sistema de monitoreo, debido a que los datos pueden ser alterados por las propiedades de los sensores. El monitoreo no se trata de simplemente instalar un equipo y dejarlo funcionando, la precisión y la confiabilidad dependen en gran medida de los ajustes y mantenimiento que se les den, al final lo que se busca es que los datos recolectados sean lo más precisos posibles, en el cuerpo de agua que se esté monitoreando. Uno de los mayores retos a los que se enfrentan en los entornos acuáticos es el fenómeno conocido como biofouling, el cual es la constante acumulación indeseada de microorganismos, así como materia orgánica o algunos sedimentos y algas que se encuentran en las superficies de los sensores con el paso del tiempo. Como señalan (Delauney, Compère, & Lehaitre, 2010), este constante crecimiento biológico tiene la capacidad de “engañar” al sensor, alterando significativamente sus datos recolectados provocando errores que pueden invalidar semanas de datos, el biofouling no solo ensucia, sino que distorsiona gran parte de las mediciones.

2.3.10 Protocolos de comunicación (LoRaWAN, MQTT, HTTP).

Los protocolos de comunicación son por así decirlo el sistema nervioso de una red de monitoreo, sin estos protocolos los datos recogidos por los sensores quedarían aislados y quedarían sin ninguna utilidad, su función no es solo mover información, sino garantizar que ese viaje desde el cuerpo de agua hasta la pantalla del usuario sea fluido, seguro y, sobre todo, puntual. En el monitoreo ambiental, donde a menudo enfrentamos condiciones climáticas adversas o falta de infraestructura, elegir el protocolo adecuado marca la diferencia entre un sistema que funciona y uno que falla constantemente. En la primera línea de batalla tenemos a MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Este protocolo se ha convertido

en el favorito del Internet de las Cosas (IoT) por una razón muy sencilla: es increíblemente ligero. Funciona mediante un modelo de 'publicación-suscripción' que permite que los sensores envíen datos consumiendo el mínimo ancho de banda posible. Como bien señalan Hunkeler et al. (Hunkeler, Truong, & Stanford-Clark, 2008), su eficiencia es clave cuando trabajamos con dispositivos que tienen recursos limitados, ya que optimiza el uso de la energía y mantiene la estabilidad de la conexión incluso cuando la señal es débil.

Sin embargo, cuando el reto es la distancia, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) entra en juego. Es la solución ideal para monitorear cuerpos de agua en zonas remotas o de difícil acceso, donde las redes celulares simplemente no llegan. LoRaWAN permite que los nodos sensores envíen ráfagas de información a kilómetros de distancia con un gasto de batería tan bajo que pueden operar de forma autónoma durante años (Alliance, 2021). Es, por así decirlo, la herramienta que nos permite expandir nuestra red hacia las áreas más inaccesibles sin preocuparnos por la infraestructura eléctrica, para que finalmente, una vez que los datos han llegado a la base, necesitamos una forma de presentarlos, aquí es donde el protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol) toma el relevo, aunque esto consume más recursos que MQTT o LoRaWAN, su versatilidad es inigualable en la capa de presentación. Es el estándar que permite que los tableros de visualización y las aplicaciones web se comuniquen con los servidores, logrando que cualquier usuario pueda consultar el estado del agua desde su celular o computadora con total facilidad (Fielding, 2014).

2.3.11 Dashboard e interfaz de usuario (UI/UX).

Según Few (Few S. , 2020), un dashboard bien estructurado actúa como una plataforma de síntesis que traduce la gran complejidad fisicoquímica en algo más visual y comprensible, permitiendo un seguimiento más dinámico de los datos que se estén monitoreados, el diseño UX (User Experience) asegura que el flujo de información recolectada sea lógica transformando así los registros "brutos" que por sí solos son inentendibles para el público general o los no expertos en el tema. Mediante el uso de gráficos con capas comparativas y sistemas de alertas, el dashboard permite identificar de mejor manera no solo el estado actual del agua, sino que también su comportamiento a lo largo del tiempo que sea necesario, esta perspectiva es indispensable para distinguir entre las variaciones naturales en el ecosistema

o las distintas anomalías que surgen en distintos periodos de tiempo.

2.3.12 Metodología de prototipado.

De acuerdo con (Pressman & Maxim, 2020), la metodología de prototipado es un enfoque de desarrollo de sistemas de software que se basa en la realización de múltiples versiones preliminares y funcionales de un prototipo, esto con el propósito de comprobar poco a poco los requerimientos del sistema, así como validar las funcionalidades y detectar los errores en las etapas más tempranas del proyecto. Esta metodología permite comprobar tanto el progreso del sistema para posteriormente su correcto funcionamiento del sistema antes de su versión final, facilitando la evaluación continua y la retroalimentación constante desde el inicio hasta el final. En el ámbito de los sistemas computacionales, la metodología de prototipado es especialmente útil cuando los requerimientos pueden cambiar durante el proceso de desarrollo o cuando es necesario realizar pruebas en repetidas ocasiones tanto en los componentes físicos como el desarrollo del software. El proceso de prototipado incluye etapas como el análisis inicial de los requerimientos, el diseño preliminar, la construcción del prototipo, la evaluación del funcionamiento y la implementación de mejoras hasta la versión más optima del sistema o la versión final del mismo.

2.3.13 Fase de análisis de requerimientos de la metodología de prototipado.

Con base a (Pressman & Maxim, 2020), la fase de análisis de requerimientos en la metodología de prototipado consiste en la identificación de las necesidades funcionales y no funcionales del sistema. En esta etapa se define el problema que se desea resolver, qué objetivos se deben cumplir y cuáles son sus restricciones tanto económicas como operativas. En el caso del modelo de prototipado los requerimientos iniciales no siempre son los requerimientos definitivos, sino que funcionan como las bases para las primeras versiones.

2.3.14 Fase de diseño de prototipo.

Según (Pressman & Maxim, 2020), la fase de diseño del prototipo consiste en la pronta representación del sistema la cual permita definir una estructura que, aunque general ayudara a su futura versión, así como los componentes principales que se usaran y como estos

interactúan los unos con los otros de la manera más eficiente posible. En esta etapa se establecen las bases para el diseño tanto para el hardware como el software, con el objetivo de llevar a la práctica los requerimientos identificados.

2.3.15 Fase de construcción del prototipo.

Con base a (Sommerville, 2016), la fase de construcción del prototipo consiste en la implementación del sistema basado en el diseño del prototipo, integrando ya los componentes esenciales para la evaluación del funcionamiento básico del sistema, en esta etapa se desarrollan distintas versiones simples del sistema, priorizando las funciones básicas, con el propósito de obtener un modelo que a futuro pueda ser probado y evaluado para las posteriores mejoras del mismo.

2.3.16 Fase de evaluación y pruebas del prototipo.

La fase de evaluación y pruebas del prototipo tiene como objetivo principal el verificar el funcionamiento del sistema, así como la identificación de errores existentes, carencias identificadas o limitaciones antes de avanzar hacia una versión más completa, con todo lo anterior siendo corregido, en esta etapa el prototipo prueba sus funcionales con el fin de comprobar que si se cumplen los requerimientos establecidos y que responde de manera correcta (Sommerville, 2016).

2.3.17 Fase de refinamiento e implementación del sistema.

De acuerdo con (Pressman & Maxim, 2020), la fase de refinamiento e implementación del sistema consiste en mejorar constantemente el prototipo con base a los resultados obtenidos durante la evaluación y las pruebas realizadas. En esta etapa se corrigen las fallas detectadas, se optimizan funcionalidades y se incorporan mejoras que permitan transformar el prototipo inicial en una versión funcional del sistema.

2.3.18 Html.

De acuerdo con (Zapata Materon, 2025), el HTML (HyperText Markup Language) es un lenguaje de marcado utilizado para la creación y estructuración de páginas web. Permite la organización del contenido mediante etiquetas las cuales definen los elementos como los

encabezados, párrafos, imágenes, enlaces y tablas, facilitando la presentación para la información en navegadores web. HTML constituye la base estructural de los sistemas web, ya que establece la organización del contenido que posteriormente puede ser complementado con hojas de estilo (CSS) y lenguajes de programación como JavaScript para mejorar la apariencia y funcionalidad de las páginas.

2.3.19 Conjuntos de datos

Un conjunto de datos (dataset) se define como una colección organizada de datos relacionados entre sí, estructurados de manera que puedan ser almacenados, procesados y analizados mediante herramientas computacionales. Generalmente, los conjuntos de datos se presentan en forma tabular, donde las filas representan observaciones y las columnas variables o atributos medidos. En el contexto de sistemas de monitoreo, un conjunto de datos está conformado por las mediciones obtenidas de sensores a lo largo del tiempo, permitiendo el análisis de patrones, tendencias y anomalías como lo sugiere (García, Luengo, & Herrera, 2015).

2.3.20 ESP32S.

El ESP32S es un microcontrolador desarrollado por una empresa china de nombre Espressif Systems, diseñado para la realización de aplicaciones de sistemas embebidos e Internet de las Cosas (IoT). Integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth en un solo chip, además de múltiples pines de entrada y salida (GPIO), convertidores analógico-digitales (ADC), interfaces para la comunicación serial como UART, SPI e I2C, y capacidad suficiente de procesamiento para ejecutar tareas de adquisición y transmisión de datos en tiempo real. En sistemas de monitoreo ambiental, como el monitoreo de la calidad del agua, el ESP32S permite recibir señales de sensores fisicoquímicos, convertirlas en datos digitales y enviarlas a plataformas web o servidores remotos mediante conexión inalámbrica, facilitando la supervisión continua y remota de los parámetros medidos como lo menciona (Yan, 2025).

2.3.21 Página web.

Una página web es un documento digital que es accesible a través de Internet y se encuentra estructurado normalmente mediante lenguajes de marcado como HTML que puede integrar

elementos multimedia como lo son los hipervínculos además de distintos recursos interactivos, esta, forma parte de la World Wide Web y es visualizada a través de los navegadores web en todo el internet, permitiendo una presentación más organizada de la información y la interacción entre usuarios, en el ámbito tecnológico, una página web puede incorporar distintos lenguajes para complementar sus funciones e interacción como lo son CSS usado para el diseño visual de la página y JavaScript para la interacción de los usuarios y la pagina, en conjunto permiten desarrollar sistemas más dinámicos capaces de mostrar datos en tiempo real, almacenar la información y facilitar los procesos de consulta y análisis de datos según (Kurose, 2005).

2.3.22 Ccss.

Cascading Style Sheets, o CSS es un lenguaje de estilo utilizado en páginas web para definir la presentación visual de documentos estructurados en HTML, esto permite controlar distintos aspectos de la página como los colores, las tipografías de las letras que serán usadas, los márgenes, el tamaño de las tablas, letras, el posicionamiento de todo lo anterior mencionado y el diseño en general de una página web. CSS facilita en gran medida la creación de las interfaces web haciéndolas más organizadas, reutilizables y adaptables para distintos dispositivos, esto mejora la experiencia del usuario mientras está en la página. En cuanto a los sistemas de monitoreo, el uso de CSS permite una estructura visual la cual presenta la información obtenida en tablas, gráficas o paneles de datos, haciendo que la información sea más clara y la interpretación de los resultados fuese más sencilla tanto para conocedores del tema, así como para el público en general (World Wide Web Consortium, 2003).

2.3.23 JavaScript.

JavaScript es un lenguaje de programación interpretado, de alto nivel y orientado a objetos, diseñado para la creación de contenido más interactivo en páginas web, permitiendo manipular la estructura y el comportamiento de la mayoría de los elementos dentro de un documento HTML, desde la actualización dinámica de los datos hasta una interacción directa

con el usuario sin necesidad de recargar la página. JavaScript es un componente clave en las páginas web modernas, ya que se complementa en gran medida con HTML y CSS para así crear experiencias web más dinámicas, además de reactivas y con la capacidad de procesamiento de datos en tiempo real. En el contexto de sistemas de monitoreo, JavaScript ofrece la actualización de las interfaces gráficas, la representación de los datos de manera gráfica, facilitando la visualización, el fácil entendimiento de la información así como el manejo de la misma, esta proveniente tanto de sensores como de microcontroladores según (Flanagan, 2011).

3. Planteamiento del problema.

El agua es un recurso natural indispensable para el desarrollo social, económico y ambiental de cualquier región. Sin embargo, en México, el constante crecimiento de las actividades industriales, urbanas y agrícolas ha generado una contaminación constante sobre los cuerpos de agua, provocando el deterioro de su calidad. Una parte considerable de los ríos, lagos y cuerpos de agua superficiales del país presentan señales de contaminación, lo que compromete tanto a los ecosistemas acuáticos como su uso para los humanos, además del sector agrícola e industrial. Uno de los principales elementos que contribuyen a esta problemática es la descarga de aguas residuales e industriales sin ningún tipo de monitoreo. En particular, la industria textil es reconocida por generar altos niveles de contaminantes fisicoquímicos, tales como cambios extremos de pH, altas concentraciones de sales disueltas, colorantes además de compuestos químicos que alteran en gran medida la calidad del agua. Estas descargas, en pequeña escala son inofensivas, pero cuando empiezan a ser masivas y no son controladas de manera adecuada, pueden generar impactos ambientales graves en los cuerpos de agua que reciben estas descargas. En el municipio de Almoloya del Río, Estado de México, existe una fábrica de textiles cuyas descargas de agua residual están generando una creciente contaminación en los cuerpos de agua cercanos. Esta situación ha despertado preocupación debido a los posibles efectos negativos sobre el entorno, las actividades productivas locales y la salud de la población. A pesar de la existencia de normativas y lineamientos para el control de la calidad del agua en México, los métodos tradicionales de monitoreo suelen basarse en análisis de laboratorio, los cuales, aunque precisos, presentan

distintas limitaciones importantes. Estos métodos son en su mayoría costosos, requieren a personal especializado y pueden generar retrasos entre la recolección y las muestras además de la obtención de los resultados, lo que impide una respuesta inmediata ante variaciones en los parámetros de calidad del agua. Desde un punto de vista científico y tecnológico, existe una oportunidad clara para integrar tecnologías como, el Internet de las Cosas (IoT), sensores fisicoquímicos y plataformas de visualización de datos, con el fin de desarrollar unos sistemas de monitoreo más eficientes, accesibles y adaptables.

La ausencia de un sistema de monitoreo en tiempo real limita la capacidad de reacción de las autoridades correspondientes o las propias industrias para gestionar adecuadamente los recursos hídricos y prevenir posibles daños ambientales mayores. Esta problemática no solo tiene implicaciones ambientales, sino que también sociales y económicas.

4. Justificación.

El agua es un recurso indispensable para nosotros los humanos sino para la vida en general además de ciertas actividades sociales, productivas e industriales, por lo que su preservación y el control de dicho recurso representa una prioridad para nuestra sociedad. En las últimas décadas el incremento en la contaminación en cuerpos de agua superficiales y subterráneos ha evidenciado la necesidad que tenemos de contar con herramientas más eficientes que permitan detectar de manera oportuna alteraciones en sus parámetros comunes y/o normales para el estándar de esa zona, con el fin de prevenir daños ambientales y riesgos a la salud pública, además de saber constantemente el estado del cuerpo de agua.

En México, los procesos de monitoreo de la calidad del agua se realizan, en muchos casos de forma manual y no se realizan constantemente, lo que limita la capacidad de respuesta y prevención ante situaciones de riesgo para la comunidad o en el peor de los casos situaciones más críticas de contaminación. Esta situación genera retrasos en la obtención de información y dificulta la supervisión continua del cuerpo de agua, además de que reduce las acciones correctivas. Ante este panorama, es necesario la implementación sistemas automatizados que permitan monitorear de manera eficiente datos en tiempo real, facilitando una vigilancia constante y no solamente para ciertas personas, sino que para cualquiera que esté interesado.

El desarrollo de una red de monitoreo de la calidad del agua se plantea como una alternativa tecnológica para fortalecer la gestión ambiental de recursos mediante el uso de sensores y plataformas digitales trabajando en conjunto. Este tipo de sistemas permite recopilar información de forma continua sin necesidad de intervenir con las muestras, reduciendo la dependencia de los muestreos manuales y apoyar la detección temprana de anomalías en el cuerpo de agua, contribuyendo a una evaluación más precisa y oportuna de este recurso. Los principales beneficiarios de este proyecto son las instituciones públicas y privadas responsables de la gestión y supervisión del agua, así como las comunidades cercanas a esos cuerpos de agua y personas en general además de zonas industriales que dependen de este recurso para consumo humano, actividades agrícolas o productivas. El proyecto representa una contribución importante para el área de ingeniería en sistemas computacionales, al integrar funciones de comunicación de bases de datos, desarrollo web e Internet de las Cosas (IoT), como una solución a un problema ambiental real. Aunado a esto promueve el uso de tecnologías de bajo costo, lo que incrementa su potencial de implementación en otros ámbitos, su desarrollo contribuye a la preservación de cuerpos de agua, un tema de vital importancia hoy en día.

5. Objetivos.

5.1 Objetivo general.

Desarrollar un sistema IoT de monitoreo de la calidad del agua mediante una página web que visualice datos obtenidos por sensores conectados a un microcontrolador ESP32S, para apoyar la gestión sostenible de agua residual textil del lavado de la mezclilla.

5.2 Objetivos específicos.

1. Diseñar y construir un sistema de monitoreo que integre sensores fisicoquímicos con un microcontrolador ESP32S para la adquisición continua de datos de calidad del agua en tiempo real.

2. Proponer un mecanismo de transmisión inalámbrica que permita enviar los datos obtenidos por los sensores hacia una plataforma web para su procesamiento.
3. Evaluar la funcionalidad del sistema mediante el almacenamiento y consulta de la información recolectada, con el fin de facilitar su análisis y seguimiento.
4. Diseñar una interfaz web que permita la visualización clara y comprensible de los datos de calidad del agua mediante gráficos y registros accesibles para el usuario.
5. Calibrar y evaluar los sensores usando soluciones estándares de concentración conocida.
6. Evaluar y comparar los resultados obtenidos por el sistema y dispositivo desarrollado contra un dispositivo comercial en condiciones reales de monitoreo de aguas residuales textiles reales.

6. Hipótesis.

El sistema “Plataforma de Monitoreo en Tiempo Real para la Calidad del Agua” (PMCA) de monitoreo automatizado de la calidad del agua, basado en sensores fisicoquímicos y un microcontrolador ESP32S con visualización web, permite la correcta detección de anomalías en parámetros como pH, temperatura y conductividad, reduciendo el tiempo de identificación y aumentando la precisión respecto a los métodos tradicionales de muestreo.

7. Metodología.

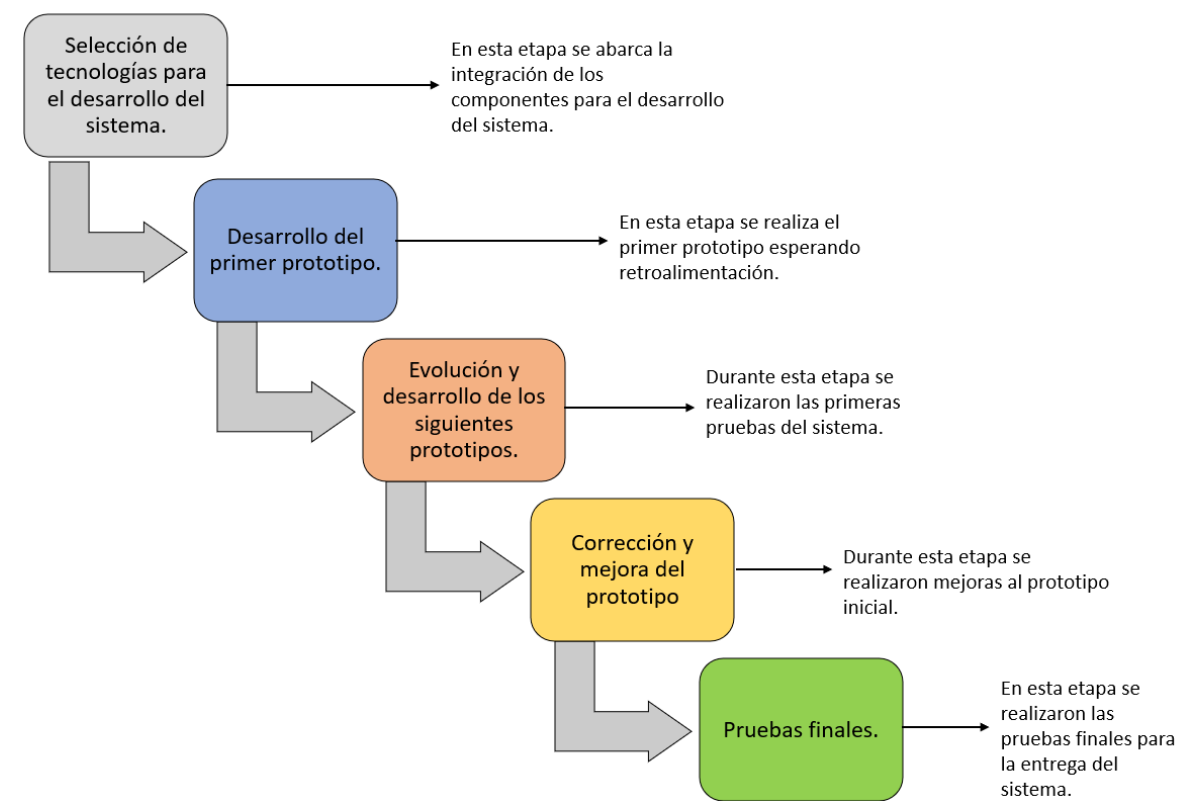


Figura 1 Diagrama de la metodología general del proyecto, Fuente: Creación propia

7.1 Selección de tecnologías para el desarrollo del sistema.

En esta primera etapa se seleccionaron las diferentes tecnologías que se usaran durante en el desarrollo del sistema como lo pueden ser los lenguajes de programación, los sensores requeridos y el microcontrolador que se usara para el procesamiento de la medición de los sensores y el envío de datos en tiempo real. Como lenguajes de programación se usaron HTML5, CSS y JS para la creación de la página web usando Visual Studio Code como editor de código, los sensores utilizados para el sistema son el sensor de PH014 Arduino Raspberry y un sensor TDS analógico de conductividad eléctrica, el microcontrolador ESP32S el cual fue programado con el software Arduino IDE con el lenguaje de programación C++, además de una placa de expansión de 38pines, para finalizar se usó Google Apps Script el cual se usó como base de datos.

7.2 Desarrollo del primer prototipo.

Durante la segunda etapa se realizó el primer prototipo de la página web, así como el del ESP32S, para esto se sometido a pruebas básicas, como la conexión entre diferentes secciones de la página, sus funciones principales y el diseño preliminar, la misma está diseñada para ejecutarse en el navegador local, para la programación del ESP32S, se realizó un código funcional para que se conecte con la página web, por otra parte, se realizó el ensamble del ESP32S en la placa de expansión de 38pines, esto con el fin de ser más eficientes en el ensamble de los sensores, los cuales se integraran directamente en la placa de expansión en los pines 35 y 32 para pH y conductividad respectivamente, así logrando que los datos captados por los sensores sean enviados a la página web en tiempo real, sin embargo los datos no son exactos ya que aún no se calibran los sensores de manera adecuada.

7.3 Evolución y desarrollo de los siguientes prototipos.

Durante la tercera etapa se realizaron dos objetivos principales los cuales fueron la calibración de los sensores y el envío de datos en tiempo real tanto a la página web como a Google Sheets, empezando por la calibración de los sensores, se realizaron pruebas con soluciones estándar tanto de pH como de conductividad, dichas soluciones estándar tienen un nivel de pH ya definidos en este caso valores de 4, 7 y 10 respectivamente, por lo cual mediante una fórmula para la calibración del sensor, cambiando valores iterativamente se logró llegar a la medida más aproximada de la solución estándar como lo muestra la figura 2. En cuanto el envío de datos en tiempo real, los sensores mandan datos cada 5 segundos a la página web local, así actualizándose constantemente al mismo tiempo que cada 60 segundos envía un dato a Google Sheets para el almacenamiento de datos históricos.

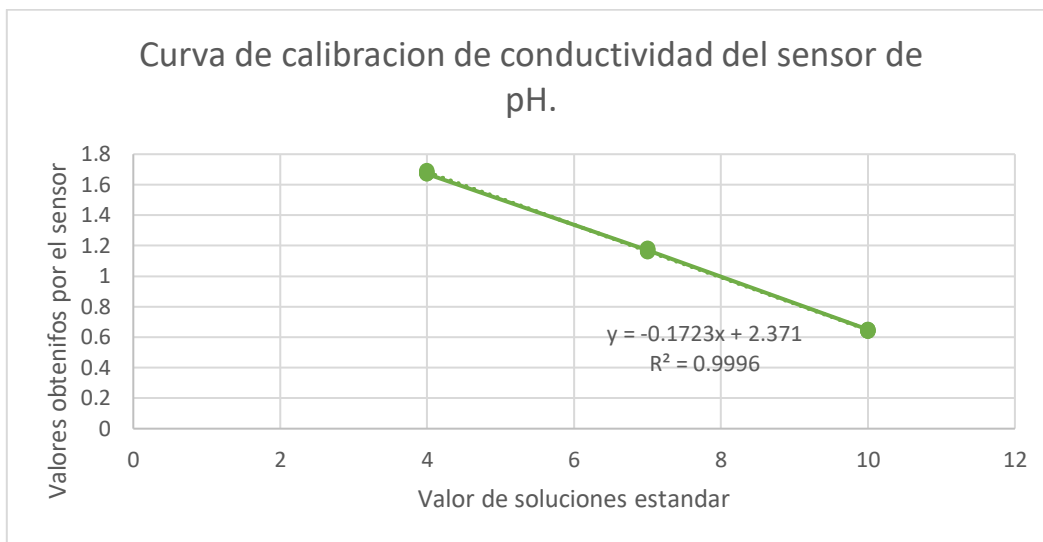


Figura 2 Grafica de calibración de pH. (Elaboración propia).

En cuanto a la calibración del sensor de conductividad eléctrica se realizó el mismo procedimiento, se sometió el sensor a varias pruebas de calibración con distintas soluciones estándar de 190, 759 y 1413 respectivamente, variando su fórmula iterativamente hasta llegar a la respuesta del sensor más aproximada como se muestra en la figura 3, todas estas pruebas de calibración se llevaron a cabo en un laboratorio de manera controlada como se muestra en la figura 4.

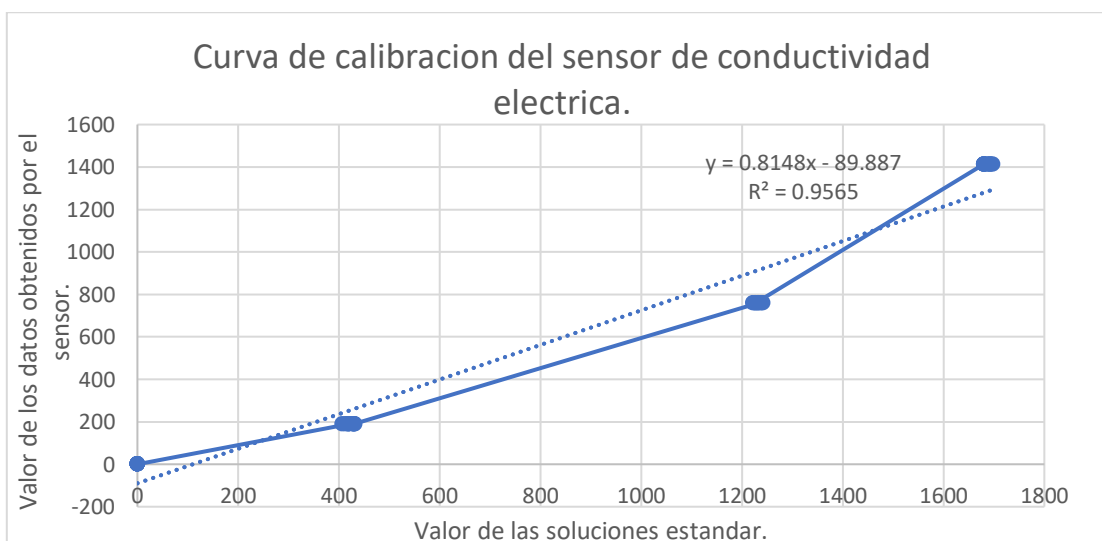


Figura 3 Grafica de calibración de conductividad eléctrica. (Elaboración propia).

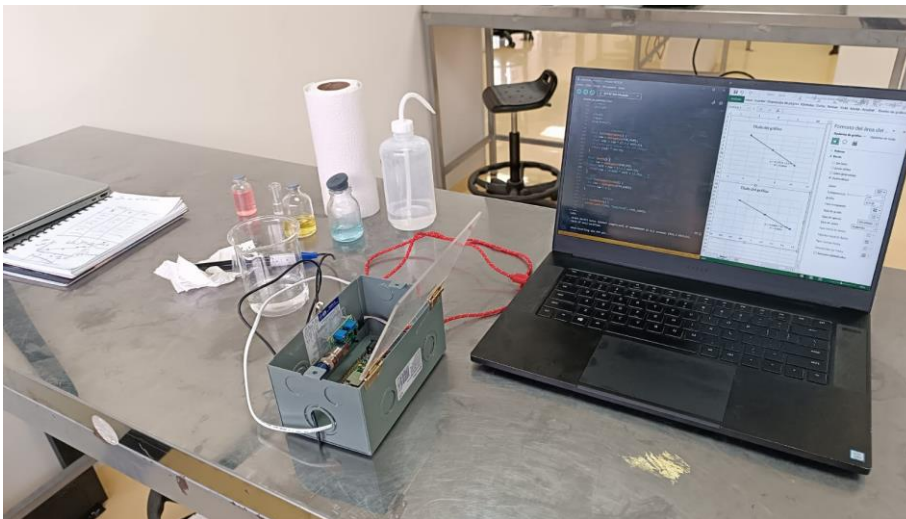


Figura 4 Prueba de calibración en laboratorio. (Elaboración propia).

Para finalizar esta etapa se realizó el código de Google Apps Script para la recepción de datos del ESP32S al mismo tiempo que se modificó el código del microcontrolador para que los datos que sean capturados de los sensores se envíen, a la página web y al mismo tiempo a Google sheets para guardar información histórica de los datos recolectados.

7.4 Corrección y mejora del prototipo.

En esta etapa se realizó una prueba de campo en una fábrica textil, en la cual el sistema estaría funcionando a la par que el dispositivo HQ4200 (un dispositivo certificado), en esta prueba los dos dispositivos estarían funcionando al mismo tiempo registrando datos del mismo cuerpo de agua esto con el fin de verificar si los datos registrados por el sistema eran correctos, durante un aproximado de 2 horas consecutivas en las cuales ambos dispositivos registraron una gran cantidad de datos similares demostrando la confiabilidad del sistema ante un monitoreo de campo, sin embargo se admite que en cuanto a conductividad eléctrica debido a la fórmula de calibración del sensor pasando los 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ los datos empiezan a fluctuar más, aun con esto por debajo de ese parámetro no hay diferencia significativa en los datos obtenidos, además de esto se encontró que el sistema necesita de una red de internet estable para su funcionamiento debido a como está programado.

7.4 Pruebas finales.

Para finalizar, se llevó el dispositivo nuevamente a una prueba de campo, en la que estaría funcionando durante una jornada laboral completa en la fábrica textil, aproximadamente 8 horas seguidas, demostrando su eficacia y consistencia a la hora de transmitir datos correctamente en tiempo real sin inconvenientes tanto en la página web como en Google Sheets como se muestran en la figura 5. Se adjunta en la figura 6 el diagrama del circuito utilizado para la integración del dispositivo.



Figura 5 Prueba de integración del dispositivo en un entorno real. (Elaboración propia)

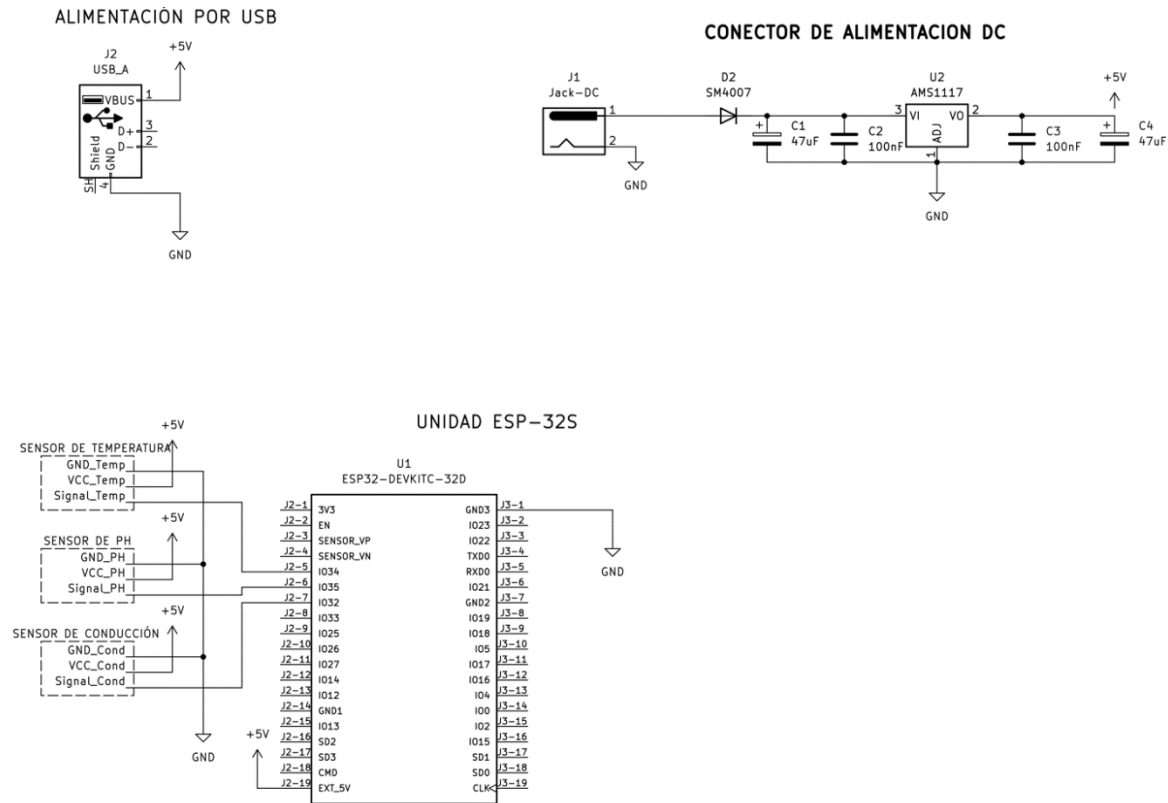


Figura 6 Prueba de recepción de datos en Google Sheets. (Elaboración propia).

8. Enfoque metodológico.

El presente proyecto se desarrolló con un enfoque metodológico descriptivo y tecnológico, ya que se basa en la observación, medición y visualización de datos de la calidad del agua, sin realizar procesos de predicción ya que este no es el objetivo del proyecto, la inferencia estadística o modelado inteligente tampoco forman parte de este. El sistema que propongo se limita a recopilar la información de los sensores fisicoquímicos y mostrar dicha información de forma clara y comprensible mediante una plataforma web.

El proyecto tiene un alcance experimental, debido a que se implementará un prototipo funcional en un entorno controlado con el propósito de evaluar la viabilidad del proyecto, y verificar si es posible realizar la red de monitoreo. Este enfoque más controlado permite analizar el comportamiento de los sensores de manera más segura, la fiabilidad en la recolección de datos y la correcta transmisión de los datos desde el microcontrolador ESP32S hacia la página web. El enfoque metodológico adoptado es adecuado para proyectos de este

tipo ya que la ingeniería orientada al desarrollo de soluciones tecnológicas muchas veces se basa en el ensayo y error, ya que facilita la validación de la información y funcionamiento del sistema. Dicho esto, el proyecto se enfocará en demostrar la factibilidad del monitoreo automatizado como una herramienta de apoyo para la gestión de cuerpos de agua.

8.1 Arquitectura del sistema.

El sistema de monitoreo propuesto se compone de cuatro elementos principales:

- Sensores fisicoquímicos, encargados de medir parámetros como pH, temperatura, conductividad y potencial redox.
- Microcontrolador ESP32, responsable de la adquisición y transmisión de los datos.
- Base de datos, utilizada para el almacenamiento estructurado de la información.
- Plataforma web, que permite la visualización de los datos en tiempo real y la consulta de registros históricos.

8.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

La obtención de datos se realiza mediante sensores conectados a un microcontrolador ESP32. Cada sensor generara datos constantemente, los sensores estarán funcionando individualmente para medir parámetro que le corresponde, los datos que se obtengan de los sensores son procesadas por el microcontrolador y convertidas en valores digitales para la página web. Los datos obtenidos se enviarán a la página web de forma remota, donde se almacenan en una base de datos y se representan gráficamente para una correcta interpretación de estos. Esta técnica permite obtener información confiable y continua sobre los cuerpos de agua que se estén monitoreando.

8.3 Justificación del sistema.

En este apartado se podrá ver como interactúa el sistema entre si y como va fluyendo la información a lo largo de su uso.

8.3.1 Sensores.

Los sensores funcionan de la siguiente manera; tanto el Sensor De Temperatura Ds18b20, como el Tds Analógico Sensor Conductividad y el Sensor De Ph014 Arduino Pic Raspberry generan señales electromagnéticas al entrar en contacto con el agua, dichas señales son enviadas posteriormente al ESP32S, mientras tanto seguirán recolectando las señales continuamente.

8.3.2 ESP32S.

El ESP32S es un microcontrolador encargado de “traducir” las señales enviadas de los sensores mediante un código echo en ARDUINO UNO el cual será cargado en el mismo, este código puede ser modificado según las necesidades del usuario, por ejemplo, controla el tiempo en el cual se cargarán los datos a la página en este caso cada 5 segundos, también puede modificar la calibración de los sensores uno por uno.

8.3.3 API.

El sistema implementa un servidor web embebido en el ESP32s expone una API HTTP básica que se usa para la consulta de datos en tiempo real mediante el endpoint /data, devolviendo información en formato de texto, lo cual permite su integración con interfaces web y servicios externos.

8.3.4 Base de datos.

La base de datos usada en este proyecto no es una base de datos común ni ocupa un SGBD, sin embargo, cumple con su función, para dicha base de datos se usó un libro de Excel en Google Sheets el cual se encarga de recibir los datos enviados desde el ESP32S cada minuto, en tiempo real con un ligero retraso de 0.1 segundos, el cual se debe a la conexión de internet al que esté conectado el ESP32S.

8.3.5 Interfaz gráfica.

La interfaz gráfica se diseñó para ser amigable a la vista sin usar colores cansados para la vista del usuario como se puede ver en la figura 7 así como en la figura 8.

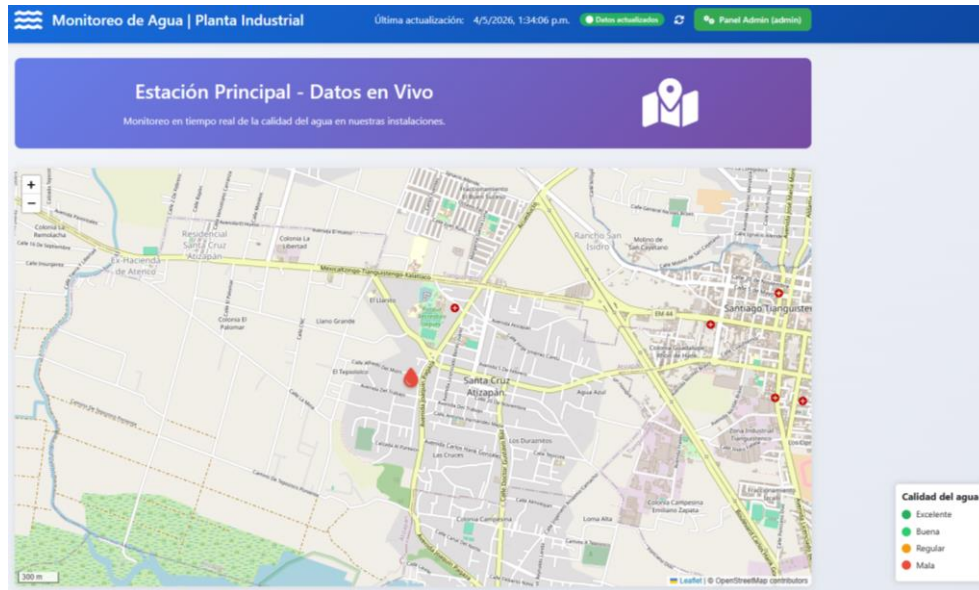


Figura 7 Interfaz gráfica principal Elaboración propia.

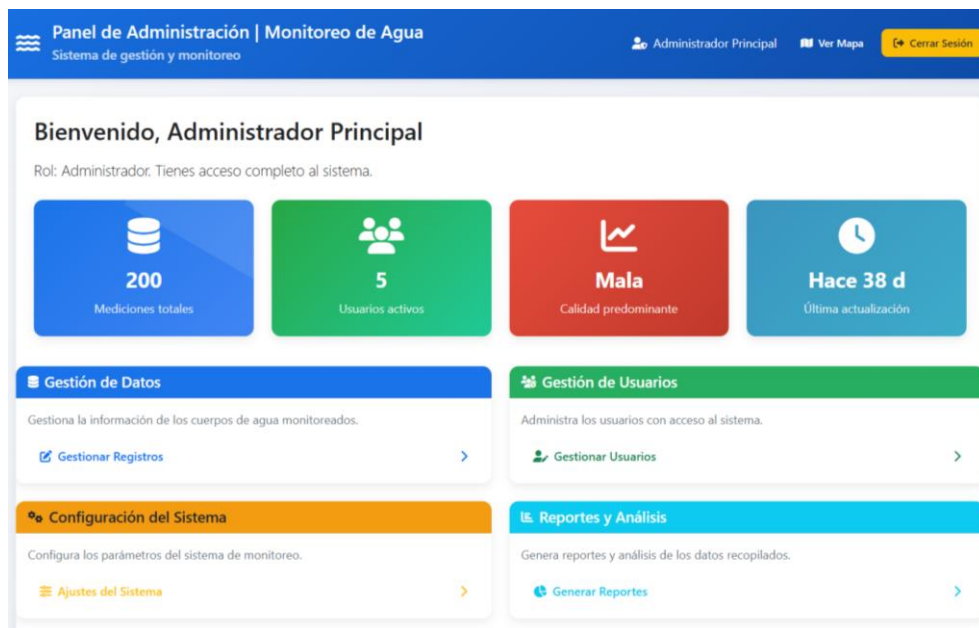


Figura 8 Interfaz gráfica de administrador Elaboración propia.

8.3.6 Lenguaje backend.

No se implementó un backend tradicional tipo PHP o Node.js, el sistema es completamente cliente-side (frontend puro), la comunicación con el ESP32 se realiza mediante peticiones

fetch directas desde el navegador al endpoint del ESP32 (<http://10.240.123.50/data>), los datos se almacenan localmente en localStorage e IndexedDB.

8.3.7 Lenguaje frontend.

Para el lenguaje frontend de este sistema se usaron los siguientes lenguajes:

- HTML5: Para la estructura semántica de las páginas.
- CSS3: para los estilos personalizados y la organización en dos archivos.
- JavaScript: Para la lógica de la aplicación (módulos, promesas, async/await y eventos).

8.3.8 Librerías de visualización

- Chart.js: Se uso para la generación de gráficas de tendencias en el módulo de reportes y análisis.
- Leaflet.js: Se uso para el mapa interactivo en el que se muestra la ubicación de la estación principal, con marcadores personalizados según la calidad del agua (mapa.js).
- Bootstrap 5: Se uso para los framework CSS para diseño responsive, componentes UI (navbar, tarjetas, modales, botones) y sistema de rejilla.
- Font Awesome: Se uso para agregar iconos más amigables para el usuario.

8.3.9 API RESET para recibir datos del ESP32S

No se construyó una API REST separada. El ESP32S actúa como servidor HTTP exponiendo un endpoint (<http://10.240.123.50/data>) el cual devuelve un JSON para su confirmación de funcionalidad ({“temp”: 23.5, “ph”: 7.2, “cond”: 350}). El ESP32s ya implementa un servidor web mínimo; reutilizar su endpoint elimina la necesidad de un backend intermedio, la comunicación es simple y directa, adecuada para una red local la IP 10.240.123.50 sugiere una red privada industrial.

8.3.10 Escalabilidad.

El sistema es escalable a nivel de cliente (puede manejar grandes volúmenes locales), pero no es escalable a nivel de organización porque no comparte datos entre diferentes puntos de monitoreo o usuarios. Para una verdadera escalabilidad se requiere un backend con base de datos (PostgreSQL, MongoDB) y una API REST completa, aun con esto está diseñado de tal manera que estas modificaciones son posibles en un futuro.

8.3.11 Mantenimiento.

El código está bien estructurado y sigue buenas prácticas de desarrollo de software moderno, un desarrollador con conocimientos básicos de frontend puede entenderlo perfectamente y ampliarlo de ser necesario sin gran esfuerzo ya que cada archivo tiene una responsabilidad clara, facilitando depuración y extensiones. Además de una gestión centralizada de almacenamiento como lo es “StorageManager” abstrae las operaciones con localStorage e IndexedDB lo que permite que, si se cambia la tecnología de persistencia, solo se modifica ese módulo.

8.4 Pruebas de funcionamiento de sensores

Durante las pruebas realizadas en laboratorio para corroborar el funcionamiento de los sensores se comprobó con soluciones estándar, las cuales se usaron para la calibración de los sensores puesto que las mismas ya cuentan con un valor predeterminado tanto de pH así como de conductividad, lo cual fue fundamental para la verificación de los sensores ya que con estas se pudo confirmar que los sensores después de la calibración ya proporcionaban datos de manera correcta.

8.5 Pruebas de comunicación ESP32S-Servidor.

Para la transmisión de datos en tiempo real, se configuró el ESP32S como un servidor web independiente dentro de una red local, asignándole una IP fija por ejemplo 10.243.233.237 (esta puede ser modificada en el código del mismo) y habilitando un endpoint HTTP en el puerto 80. Por el lado del cliente (página web), se realizan peticiones GET periódicas (cada 5 segundos) a la ruta “/data”, obteniendo una respuesta en formato JSON que contiene las

mediciones de temperatura, pH y conductividad. El servidor web del ESP32S atiende estas solicitudes, obtiene los datos de los sensores en ese instante y devuelve los valores sin necesidad de un servidor intermedio. Adicionalmente, como respaldo, el ESP32S envía los mismos datos cada 60 segundos a una hoja de cálculo de Google Sheets mediante peticiones POST, lo que permite un almacenamiento externo para análisis posteriores.

8.6 Pruebas de carga de base de datos.

Para evaluar la capacidad del sistema ante la inserción continua de mediciones, se probó el sistema durante periodos de tiempo de hasta 10 horas en los cuales se obtenían hasta 200 registros (límite de 200 mediciones en memoria) durante estos periodos, verificando tiempos de escritura y lectura mostrando su funcionamiento. Como mecanismo de respaldo externo, se configuró el ESP32S para enviar datos, cada 60 segundos, mediante una petición HTTP POST a un script de Google Apps Script. Dicho script recibe los parámetros de temperatura, pH y conductividad, los registros obtenidos por los sensores llegan con una marca de tiempo y los anexa automáticamente a una hoja de cálculo de Google Sheets (identificador 1K2L2aMXPykUewNuUsxxR8oQFuKknuc-Z-wHaUBh4-Fc, hoja “Prueba”).

8.7 Ajustes realizados.

Durante el desarrollo del sistema se implementaron diversos ajustes para garantizar su estabilidad y precisión. Se modificaron las fórmulas de conversión analógica-digital (por ejemplo, la relación voltaje-pH) y se añadieron filtros para descartar valores atípicos o negativos. En el frontend, se ajustó el intervalo de actualización de 5 segundos para equilibrar la carga de la base de datos IndexedDB, limitando el historial a 200 registros. Por último, se modificó el script de Google Apps Script para que respondiera tanto a peticiones GET como POST, y se aumentó el tiempo de espera del cliente HTTP a 10 segundos para evitar fallos por timeout. Estos ajustes permitieron alcanzar un funcionamiento fiable y continuo del sistema de monitoreo.

9. Calibración de sensores.

La calibración de los sensores se llevó a cabo en un laboratorio, utilizando muestras de agua con valores de pH y conductividad eléctrica ya estandarizados, esto con el objetivo ajustar las ecuaciones de conversión usadas en la programación de cada sensor, para que así las mediciones sean lo más cercanas posibles al valor de la solución estándar que se usó.

En el caso del sensor de pH partiendo de la lectura analógica que se obtiene del microcontrolador, es a su vez convertida en voltaje a partir de este valor, se realizaron pruebas ajustando los parámetros de la ecuación en cada prueba, hasta obtener una relación lineal adecuada entre el voltaje y el valor de pH. El resultado de realizar este proceso diversas veces fue la correcta calibración del sensor, a su vez se estableció una ecuación para la calibración que permitió reducir el error en las mediciones y mejorar la precisión del sensor significativamente.

En cuanto a el sensor de conductividad eléctrica fue similar el proceso realizado, iniciando con la obtención de varias muestras para calcular el valor de la señal analógica para posteriormente transformarlo a voltaje, para continuar con el proceso, se realizaron ajustes en la ecuación de conversión, realizando un proceso de ensayo y error, se logró obtener una aproximación bastante parecida al valor de la solución estándar.

Durante el proceso de calibración del sensor de conductividad eléctrica se logró identificar que, si el sensor captaba señales de más de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los datos arrojados comenzaban a presentar desviaciones cada vez más significativas al valor de la solución estándar, esto se atribuye a la naturaleza del sensor y a la curva de respuesta del mismo. Sin embargo, se concluyó que este comportamiento, aunque normal, puede ser cambiado con un ajuste adicional en la ecuación de calibración, esto permitirá la mejorará en la precisión del sistema en los rangos que sean convenientes según sea el caso.

En general, el proceso de calibración permitió ajustar correctamente los sensores, logrando una mejora significativa en la exactitud de las mediciones y estableciendo una base confiable para la recolección y análisis de los datos en las etapas posteriores del proyecto.

9.1 Recolección, análisis y presentación de datos.

Durante las pruebas finales del sistema se recolectaron datos de los parámetros de pH y conductividad eléctrica estas dos debido a que derivado de sus datos podemos calcular algunas estimaciones y derivados útiles para los cuerpos de agua por ejemplo la concentración de H^+ (acidez), también se pudo calcular Sólidos Disueltos Totales (TDS), así como Fuerza iónica (I), estos datos pueden obtenerse mediante una serie de cálculos no tan complejos lo cual brinda más información sobre el cuerpo de agua que se esté monitoreando. En la tabla 1 de anexo 1D se presentan los valores obtenidos del dispositivo H2OG, así como en la tabla 2 del anexo 1D se muestran los valores obtenidos por el dispositivo HQ4200.

Como se observa en las tablas anteriores, los valores obtenidos por el dispositivo H2OG representan valores similares a los del dispositivo HQ4200, en la mayoría de las mediciones la diferencia entre uno y otro es mínima o entra en el rango de lo aceptable tanto para el PH como para la Conductividad eléctrica lo cual indica el éxito en cuanto a la calibración de los sensores ya que cumplieron con lo esperado además del hecho de que fue probado en un entorno de trabajo real.

En la Figura 9 se muestra la representación gráfica del comportamiento del parámetro de conductividad en el dispositivo H2OG con 20 datos obtenidos con sus marcas de tiempo de cada uno, en esta se puede apreciar de mejor manera como se comportó.

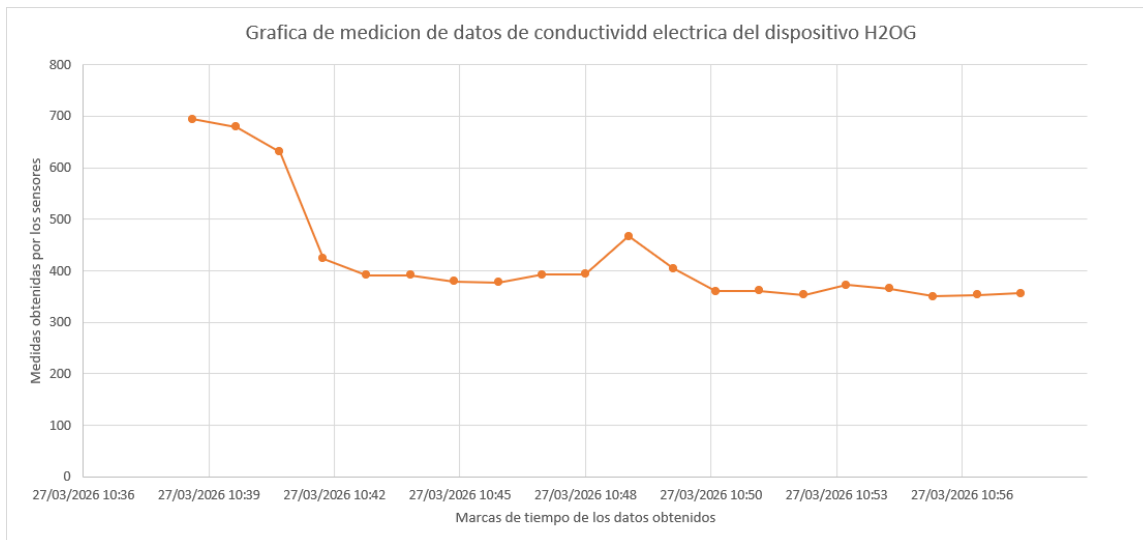


Figura 9 Grafica de comportamiento de conductividad eléctrica del dispositivo H2OG (Elaboración propia).

En contraste, en la Figura 10 se pudo ver de igual manera gráficamente el comportamiento del dispositivo HQ4200 con las mismas marcas de tiempo que el anterior dispositivo, sin embargo, con sus propios datos obtenidos.

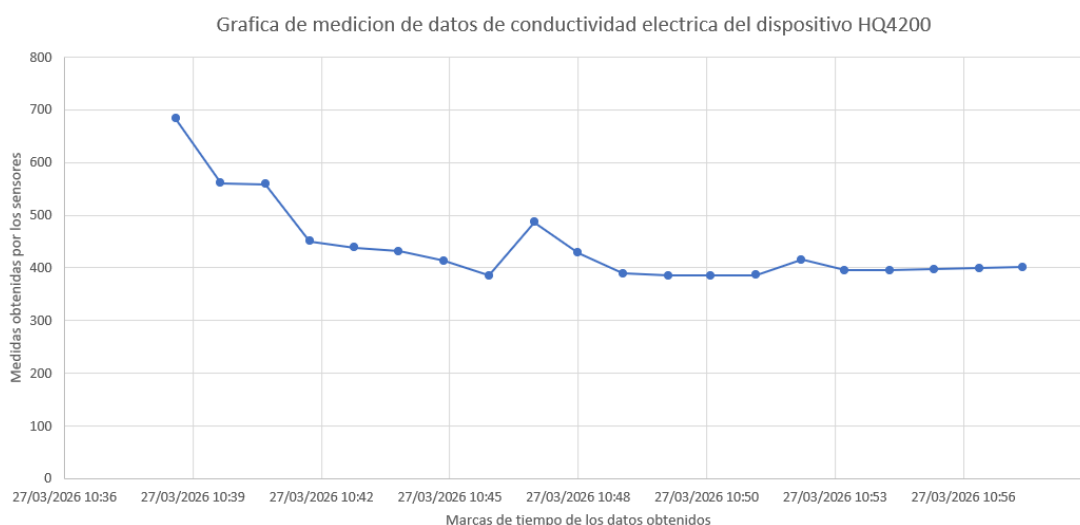


Figura 10 Grafica de comportamiento de conductividad eléctrica del dispositivo HQ4200 (Elaboración propia).

A partir del análisis de los anteriores datos se identificó que el dispositivo mantiene un comportamiento estable en la mayoría de las mediciones, sin embargo, en rangos de conductividad mayores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se presentan variaciones en los datos como ya lo

habíamos mencionado anteriormente, lo cual coincide con las limitaciones observadas durante la etapa de calibración.

9.2 Comparación con el equipo HQ4200.

A partir de los resultados presentados en la sección anterior, se realizó la comparación entre las mediciones obtenidas por dispositivo H2OG desarrollado y el equipo de referencia HQ4200 en este caso la comparativas se llevó a cabo con datos de pH como se muestra en la Figura 11, la gráfica muestra la estabilidad en las mediciones registradas durante el periodo de evaluación, observándose variaciones menores. Las gráficas y las tablas muestran el comportamiento de ambos dispositivos evidenciando su similitud y confirmando el correcto funcionamiento del dispositivo H2OG. Se observaron diferencias en ambos dispositivos que aun que mínimas se encuentran en el rango de lo aceptable en cuanto a la medición de los parámetros se refiere. En términos generales, los resultados confirman que el dispositivo desarrollado presenta un nivel de precisión adecuado en comparación con el equipo de referencia, validando su funcionamiento para el monitoreo de la calidad del agua.

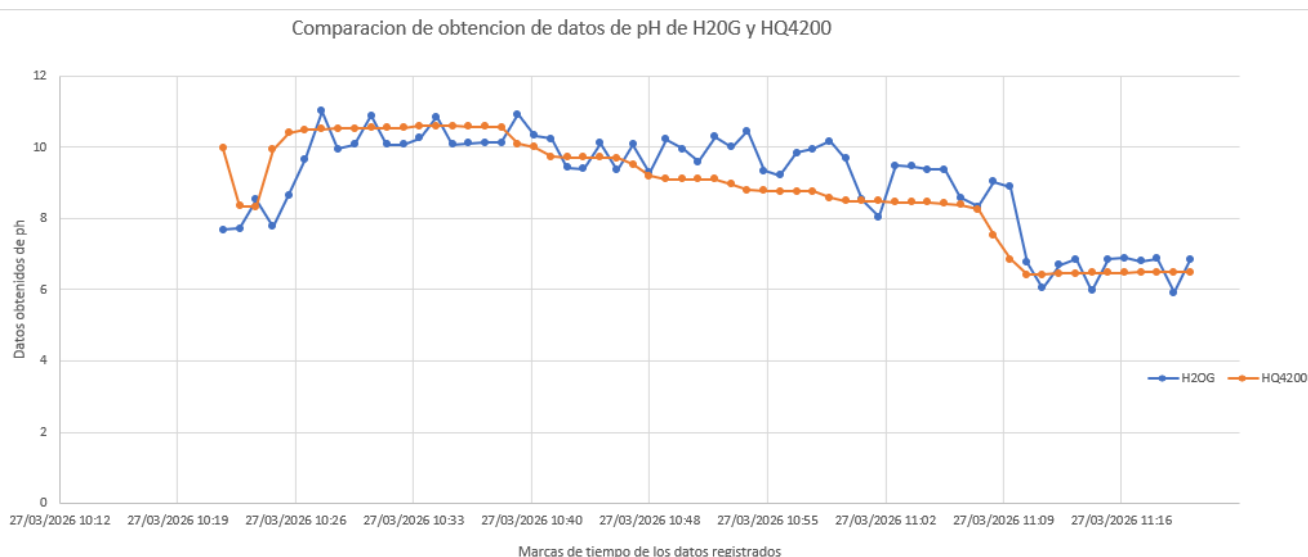


Figura 11 Grafica de comparación de ambos dispositivos midiendo pH. (Elaboración propia).

9.3 Análisis estadístico.

Con el objetivo de corroborar si existen diferencias significativas en las mediciones obtenidas por el dispositivo H2OG y el equipo HQ4200, se realizó un análisis estadístico en este caso

se utilizó el método de análisis de varianza (ANOVA). Este análisis permite evaluar si las variaciones observadas entre ambos conjuntos de datos son estadísticamente significativas o si pueden atribuirse a variaciones aleatorias del sistema.

En la Figura 12 se presentan los resultados obtenidos del análisis ANOVA aplicado a un grupo de 20 datos de los dispositivos H2OG y HQ4200 el parámetro que se usó para este análisis fue el de conductividad eléctrica.

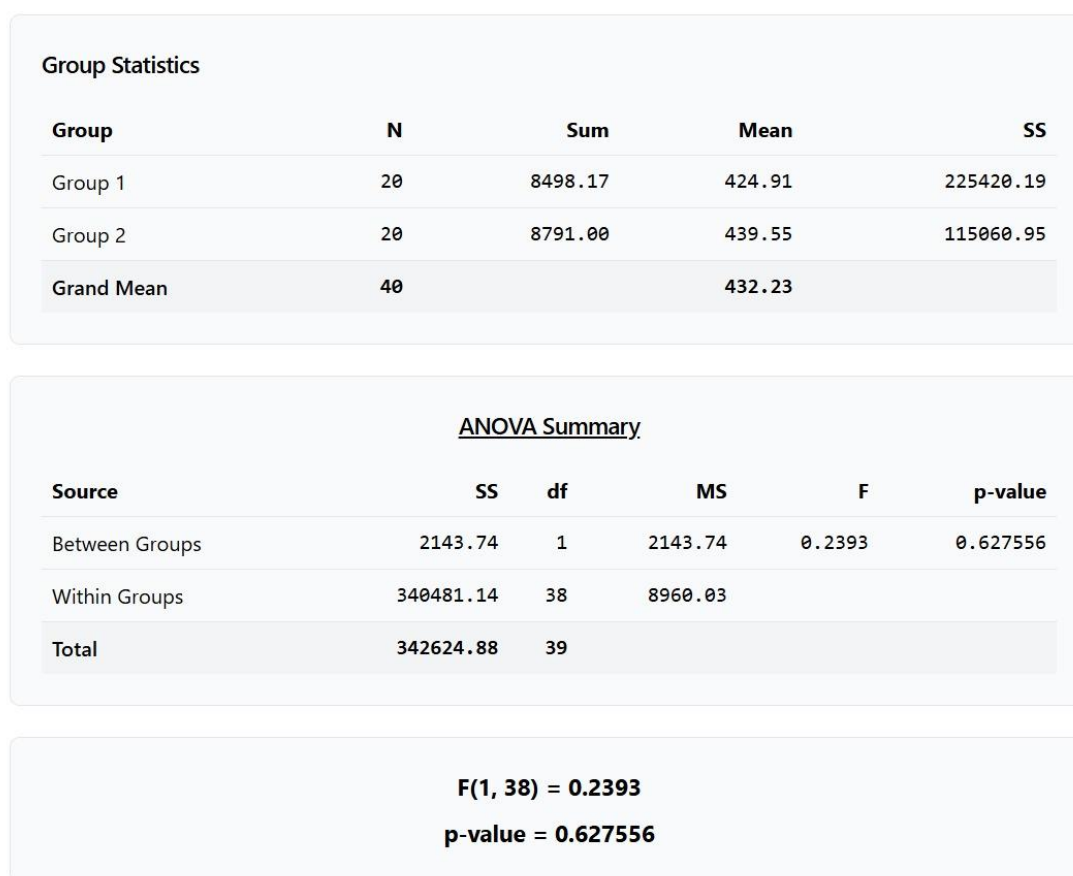


Figura 12 Análisis estadístico (ANOVA) entre los dispositivos H2OG y HQ4200 (Elaboración propia).

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos, el valor de significancia (p-value) es mayor a 0.05, se observó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones en ambos sistemas, esto apunta a que las variaciones en ambos conjuntos de datos son mínimas. A pesar de las diferencias observadas, este análisis permitió evaluar el correcto desempeño de H2OG de manera objetiva en conjunto con los resultados previamente mostrados, se puede afirmar que el dispositivo desarrollado presenta un comportamiento

consistente y una gran capacidad para monitorear la calidad del agua, dentro de los rangos establecidos recuperado de (Social Science Statistics, 2026).

9.4 Resultados y discusión.

Los resultados obtenidos a lo largo de las pruebas realizadas tanto en entornos controlados como en entornos de trabajo real permiten evaluar el desempeño real del dispositivo H2OG en la medición tanto de la conductividad eléctrica, así como el PH del agua, a partir de la calibración de los sensores, se logró obtener una formula ajustable para obtener mediciones más precisas y estables según las condiciones del cuerpo de agua, esto se reflejó de manera clara en la consistencia de los datos recolectados. Sin embargo, la curva de calibración que se obtuvo para el sensor de conductividad permitió identificar durante las pruebas que, para los valores menores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el sensor presentó una respuesta estable sin alguna diferencia notable respecto a los valores de referencia obtenidos mediante el equipo HQ4200, pero a partir de mediciones superiores a los 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se observó un incremento gradual en la desviación de las mediciones. Este comportamiento muestra una pérdida de linealidad para la respuesta del sensor, provocando diferencias notables entre los valores registrados y el dispositivo H2OG y los obtenidos mediante el equipo de referencia. Dicha variación puede atribuirse a las limitaciones propias del sensor utilizado, ya que la sensibilidad y precisión disminuyen conforme aumenta la concentración de iones presentes en la muestra, como consecuencia, el error de medición tiende a incrementarse en rangos elevados de conductividad eléctrica.

La comparación que se realizó con el equipo de referencia HQ4200 evidenció como ambos dispositivos presentan un comportamiento similar, con tendencias equivalentes en la mayoría de los datos obtenidos. Las variaciones observadas en valores elevados indica que el parámetro de conductividad, coincide con las limitaciones que se identificaron durante la etapa de calibración, lo que muestra que el desempeño del dispositivo está influenciado por la respuesta no lineal del sensor en dichos rangos. Aunado a esto, el análisis estadístico mediante ANOVA confirmó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los datos obtenidos por ambos dispositivos. Este análisis fue realizado mediante la página web, Social Science Statistics (ANOVA Calculator), empleando 2 grupos de 20 datos

seleccionadas aleatoriamente a partir de mediciones realizadas en la etapa de pruebas durante un aproximado de 20 a 30 minutos. Las mediciones utilizadas corresponden a valores reales registrados tanto por el dispositivo H2OG como por el equipo de referencia HQ4200. La selección aleatoria de las muestras tuvo como propósito minimizar posibles sesgos en la comparación y garantizar una evaluación objetiva del desempeño de ambos equipos. Lo anterior respalda la confiabilidad del dispositivo desarrollado, ya que los resultados obtenidos confirman que el sistema H2OG cumple con los requerimientos necesarios para el monitoreo de la conductividad eléctrica y el pH en cuerpos de agua.

10. Conclusiones.

El desarrollo del presente proyecto cumplido con el objetivo general planteado, el cual consistió en diseñar e implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua utilizando tecnologías accesibles y de bajo costo. El sistema desarrollado integra sensores de pH, temperatura y conductividad eléctrica conectados a un microcontrolador ESP32S, realizando la medición de los parámetros fisicoquímicos relevantes de manera efectiva en un entorno real. Durante el desarrollo del sistema, las pruebas preliminares permitieron identificar y corregir errores en la obtención de datos de los sensores mediante los procesos de calibración esto en un entorno controlado, en un laboratorio con soluciones de agua ya estandarizadas, lo cual contribuyó en gran medida a mejorar la precisión del dispositivo, posteriormente, en las pruebas finales se demostró un comportamiento estable y consistente tanto en condiciones controladas y en escenarios reales de trabajo. La comparación de los datos obtenidos con un equipo de referencia (HQ4200) demostró que el sistema desarrollado presenta una tendencia similar en las mediciones. Aunado a esto, un análisis estadístico mediante ANOVA confirmó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos dispositivos ($p > 0.05$), lo cual valida la confiabilidad del sistema. En este aspecto, el sistema H2OG demostró ser una herramienta viable para el monitoreo de la calidad del agua, ofreciendo una alternativa funcional y de bajo costo frente a equipos comerciales costosos además de no depender de pruebas de laboratorio para un monitoreo constante en los mismos. No obstante, se reconoce como limitación que, si parámetros como la conductividad exceden por ejemplo los $2000\mu\text{S}/\text{cm}$, los datos proporcionados por el dispositivo comienzan a fluctuar en gran medida, aun así, esto es un comportamiento anticipado durante las pruebas de laboratorio sin

embargo esto puede ser ajustado en la formula del sensor dependiendo de las condiciones del cuerpo de agua.

10.1 Trabajo futuro y/o recomendaciones

Se recomienda ampliar el sistema de monitoreo incorporando sensores adicionales, tales como oxígeno disuelto o turbidez, con el fin de obtener una evaluación más completa de los cuerpos de agua. Otra recomendación es realizar pruebas del sistema en entornos reales, como ríos, lagos o cuerpos de agua urbanos, para evaluar su desempeño bajo condiciones ambientales variables. Se recomienda tener una red estable de internet a aproximadamente 5 metros del dispositivo H20G, esto debido a la cobertura del ESP32S.

10.2 Experiencia personal y profesional adquirida

La participación en este proyecto permitió aplicar conocimientos teóricos adquiridos durante mi formación académica, fortaleciendo la capacidad de análisis, la resolución de problemas y la toma de decisiones. Aunado a esto, el proyecto contribuyó al desarrollo de una visión integral sobre la importancia del monitoreo ambiental y el uso de la tecnología moderna para su cuidado. La experiencia obtenida en la planificación, realización y documentación del sistema representó un aprendizaje fundamental para el desarrollo profesional futuro, especialmente en el área de ingeniería y el medio ambiente.

10.3 Competencias desarrolladas y/o aplicadas

Entre las principales habilidades desarrolladas durante esta residencia profesional se encuentran el diseño e integración de sistemas electrónicos, la programación de microcontroladores, la obtención y el procesamiento de datos, así como el desarrollo de interfaces graficas para la visualización de páginas web. De igual manera, se fortalecieron competencias relacionadas con la investigación, la gestión de proyectos y la documentación técnica. También se aplicaron habilidades de organización de información las cuales fueron fundamentales para la elaboración de este informe.

Bibliografía

- (SEMARNAT), S. d. (2022). *Portal de la SEMARNAT (Gobierno de México)*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2025, de <https://www.gob.mx/semarnat>
- Agricultura, O. d. (2020). *Water quality monitoring and assessment*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2025, de <http://www.fao.org/3/cb1776en/cb1776en.pdf>
- Agua, C. N. (2023). *Marco legal y normativo del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua>
- Alliance, L. (2021). *LoRaWAN® specification*. Beaverton, Oregón, EE. UU. (sede de la alianza): LoRa Alliance.
- Atanacio Rojas, R. A. (2018). Determinación de los parámetros físicos químicos para evaluar la calidad de agua en la laguna la encantada provincia de Huaura-2016.
- Bórquez-López, R. A., Martínez-Córdova, L. R., Casillas-Hernández, R., López-Elías, J. A., Barraza-Guardado, R. H., Ibarra-Gámez, J. C., & Gil-Núñez, J. C. (2017). Monitoreo del índice de calidad del agua para camaronicultura por medio de un hardware de acceso abierto y un sistema de inferencia difusa. *Biotecnia*, 3--10.
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control*. Hoboken, Nueva Jersey, EE. UU.: John Wiley & Sons.
- Cámara de Diputados. (2023). *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*. Ciudad de México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Comisión Nacional del Agua. (2023). *Administración y conservación de las aguas nacionales*. Ciudad de México: CONAGUA. Recuperado el 14 de Septiembre de 2025, de <https://www.gob.mx/semarnat>
- Comision Nacional del Agua. (2023). *Estadísticas del Agua en México 2023*. Ciudad de México: Conagua. Recuperado el 17 de Septiembre de 2025, de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/198546>
- Comisión Nacional del Agua. (2023). *Estadísticas del Agua en México 2023*. Ciudad de México: CONAGUA. Recuperado el 20 de Septiembre de 2025, de <https://www.gob.mx/conagua>
- Comisión Nacional del Agua. (2023). *Marco legal y normativo del agua en México*. Ciudad de México: CONAGUA. Recuperado el 10 de Septiembre de 2025, de <https://www.gob.mx/conagua>
- Comisión Nacional del Agua. (2023). *Responsabilidad institucional en la gestión y conservación del agua en México*. Ciudad de México: CONAGUA. Recuperado el 13 de Septiembre de 2025, de <https://www.gob.mx/conagua>

- CONAGUA, C. N. (2022). *Protocolos de vigilancia hidrológica y monitoreo de cuerpos de agua*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 11 de Septiembre de 2025, de <https://www.gob.mx/conagua>
- De la Peña, M. E. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México.
- Delauney, L., Compère, C., & Lehaitre, M. (2010). Biofouling protection for marine environmental sensors. *Ocean Science*.
- Few, S. (2020). *Now You See It: Simple Visualization Techniques for Quantitative Analysis*. Oakland, California: Analytics Press.
- Few, S. (2020). *Show me the numbers: Designing tables and graphs to enlighten*. Oakland, California, EE. UU. : Analytics Press.
- Fielding, R. T. (2014). *Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Semantics and content*. Internet Engineering Task Force (IETF).
- Flanagan, D. (2011). *JavaScript: The definitive guide: Activate your web pages*. O'Reilly Media, Inc.
- Futuro Ambiental. (2025). Futuro Ambiental. *Futuro Ambiental*, 4--10. Recuperado el 17 de Septiembre de 2025, de <https://www.futuroambiental.org/sustentabilidad/fundamentos-del-agua-i-parametros-de-calidad>
- García, S., Luengo, J., & Herrera, F. y. (2015). *Data preprocessing in data mining*. Springer.
- García,, J., & López,, M. (2020). *Sistemas de adquisición de datos y monitoreo ambiental*. Ciudad de México, México: Editorial Alfaomega.
- Gómez Arias, W. A. (2020). Los millonarios del agua: Una aproximación al acaparamiento del agua en México. *Argumentos estudios críticos de la sociedad*, 17--38.
- Gómez-Reyes, E. y.-S. (2020). Caracterización hidrológica de las subregiones de estudio. *La gestión de los usos del agua en tres subregiones hidrológicas: Río San Juan, Valle de México y Bajo Grijalva*, 21--54.
- Hernández, ,. R., & Torres, J. (2020). *Procesamiento y análisis de datos ambientales*. Ciudad de México, México: Editorial McGraw-Hill.
- Hunkeler, U., Truong, H. L., & Stanford-Clark, A. (2008). MQTT-S — A publish/subscribe protocol for wireless sensor networks. *IEEE*.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020). *Arquitectura de sistemas de monitoreo: lineamientos de hardware y software*. Nueva York: IEEE.
- Instituto de Hidrología, M. y. (2018). *IDEAM - Biblioteca de Publicaciones*. Bogotá, D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto de Hidrología, M. y. (2018). *Monitoreo y evaluación de la calidad del agua*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2025, de

- <https://www.ideam.gov.co/documents/24277/38289038/Protocolo+Monitoreo+Agua.pdf>
- Instituto de Hidrología, M. y. (2021). *Monitoreo y evaluación de la calidad del agua*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2025, de <https://www.ideam.gov.co/documents/24277/38289038/Protocolo+Monitoreo+Agua.pdf>
- Instituto de Hidrología, M. y., & Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras . (2021). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2025, de <https://www.ideam.gov.co/documents/24277/38289038/Protocolo+Monitoreo+Agua.pdf>
- Instituto del Agua. (2024). *Parámetros fisicoquímicos en el monitoreo de la calidad del agua*. Ciudad de México: Instituto del Agua. Recuperado el 16 de Septiembre de 2025, de <https://institutodelagua.es/calidad-del-agua/parametros-fisicos-de-la-calidad-del-agua>
- Instituto del Agua. (2024). *Parámetros físicos en el monitoreo de la calidad del agua: la temperatura como indicador ambiental*. Ciudad de México: Instituto del Agua. Recuperado el 16 de Septiembre de 2025, de <https://institutodelagua.es>
- Instruments. (2021). *Guía de calidad del agua para consumo humano*. Madrid: Instruments.
- Kurose, J. F. (2005). *Computer networking: A top-down approach featuring the internet, 3/E*. Pearson Education India.
- Lopez Ramos, A. M., & Polo Mejia, M. Y. (2024). Evaluación de la calidad del agua e impacto ambiental en la cuenca baja del río Huaura, 2023.
- Márquez, G. (1996). Embalses en Colombia: Ecología, impacto ambiental, biodiversidad. 211.
- Nedvedovich, S. S. (2007). Elementos de análisis de la propuesta de Ley General de Aguas en México a partir del Derecho Humano al Agua y sus repercusiones en el quehacer científico, docente y en la investigación. *Revista de El Colegio de San Luis*.
- Noemi. (2026). *Referencias* (Primera ed.). Metepec: Publicaciones ISC.
- OCDE. (2020). *Indicadores ambientales: desarrollo, medición y aplicación*. París, Francia: OCDE Publishing.
- OMS. (2020). *Agua potable y salud*. Ginebra, Suiza: OMS.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, I. C. (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos*. París, Francia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, I. C. (2021). *Tecnologías digitales para la gestión sostenible del agua*. París, Francia.

- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, I. C. (2021). *Tecnologías digitales para la gestión sostenible del agua*. UNESCO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, I. C. (2021). *Water governance and sustainable development*. París, Francia.: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura,.
- Organization, W. H. (2021). *WHO Global Water, Sanitation and Hygiene Annual Report 2021*. Geneva: World Health Organization.
- Peinado Guevara, V. M. (2015). Análisis de la producción agrícola y gestión del agua en módulos de riego del distrito 063 de Sinaloa, México. *Estudios sociales (Hermosillo, Son.*, 114--136.
- Pérez, J., Rodríguez, M., & Gómez, L. (2020). Sensores de calidad de agua para el control de la contaminación fisicoquímica en los acuíferos de Latinoamérica. *Revista de Ciencias Ambientales*.
- Pineda Arzimendi, M. (2025). Cuerpos de agua. *Interesante*, 1, 1-500.
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). *Ingeniería del software: Un enfoque práctico*. McGraw-Hill Education.
- Ramírez, A. (2024). *Seguimiento de la contaminación con nitratos en acuíferos de Cartago mediante sistemas de información geográfica*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Salud, O. M. (2021). Recuperado el 3 de Octubre de 2025, de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/350804>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). *Marco legal y estandarización en la calidad del agua*. Ciudad de México: SEMARNAT. Recuperado el 13 de Septiembre de 2025, de <https://www.gob.mx/semarnat>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). *Normas aplicables a la calidad del agua en México*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024). *Cumplimiento normativo en la gestión ambiental y la calidad del agua*. Ciudad de México: SEMARNAT. Recuperado el 10 de Septiembre de 2025, de <https://www.gob.mx/semarnat>
- Shafranovich, Y. (2005). *Common Format and MIME Type for Comma-Separated Values (CSV) Files*. RFC Editor.
- Social Science Statistics. (04 de 04 de 2026). *ANOVA Calculator*. Obtenido de Social Science Statistics: <https://www.socscistatistics.com/tests/anova/calculator/>
- Sommerville, I. (2016). *Software Engineering* (Décima edición ed.). Boston: Pearson.
- UNDRR, O. d. (2022). *Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres*. Naciones Unidas.

- UNESCO. (2021). *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. París: UNESCO.
- Vidal Álvarez, M. (2018). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *Rinderesu*, 41--58.
- Vijayakumar, N. y. (2015). The real time monitoring of water quality in IoT environment. 1--5.
- World Wide Web Consortium. (2003). *W3C*. Obtenido de W3C: <https://www.w3.org/Style/CSS/>
- Yan, P. (2025). Architectural Evolution and Performance Optimization in Embedded Systems: A Comparative Analysis of ESP8266, ESP32-S3, and ESP32-C6 Platforms. 51--56.
- Zapata Materon, J. D. (2025). *Optimización de la Red, Diseño de modulo de monitoreo basado SNMP y análisis de su rendimiento en una unidad educativa*. ESPOL. FIEC.

Anexo 1A congreso en Ciudad madero Tamaulipas.



Figura 13 Reconocimiento de participación en congreso en Ciudad Madero Tamaulipas.

Anexo 1B Congreso de Barcelona España.

Desde EnviWorld 2026 | Hybrid Event <environment@magnusconferences.org>

Fecha Sáb 11/04/2026 3:01

Para mariaguadalupe.pineda.arizmendi@gmail.com <mariaguadalupe.pineda.arizmendi@gmail.com>

CC María Guadalupe Pineda Arizmendi <maria_pa@test.edu.mx>

Dear Maria Guadalupe Pineda Arizmendi,

Greetings.

We are pleased to inform you that we have received your two abstract submissions titled "**Smart Network for Water Contaminant Detection and Pollution Monitoring Based on the Internet of Things (IoT)**" and "**Classical optimization vs. artificial intelligence models for color removal in wastewater from denim washing.**" Both abstracts have been accepted under the **Oral Presentation (In-Person) category**.

We kindly request you to confirm your participation by completing your registration using the link :<https://environmentalscienceconference.com/register>

If you require any further assistance, please do not hesitate to let us know. We look forward to the prospect of you speaking at our conference.

Regards
Alex Morgan
Conference Manager

From: environment@magnusconferences.org
Sent: April 10th, 2026 06:38 PM
To: mariaguadalupe.pineda.arizmendi@gmail.com
Subject: Abstract Acknowledgement - EnviWorld-2026

Dear Maria Guadalupe Pineda Arizmendi,

Greetings for the day.

Once again, thank you for submitting your abstract entitled "**Smart Network for Water Contaminant Detection and Pollution Monitoring Based on the Internet of Things (IoT)**" to EnviWorld-2026. The scientific team and a group of expert reviewers have assessed your submission.

We are delighted to inform you that, the submitted abstract is accepted for the conference under **Oral Presentation (In-Person) category**.

We now request you to confirm your participation by registering at <https://environmentalscienceconference.com/register>

If you require any further assistance, do let us know.

We look forward to the prospect of you speaking at our conference.

Figura 14 Aceptación de congreso en Barcelona, España.

Anexo 1C Artículo de divulgación



Red de monitoreo inteligente de la calidad del agua

Deivid Irineo Rojas Zetina¹, María Guadalupe Pineda-Arizmendi¹, Luis Antonio Castillo-Suárez².

(1) Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango, Santiago-La Marquesa km 22, 52600, Santiago Tilapa, Estado de México

(2) Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Posgrado Maestría en Ingeniería, Carretera Tenango, Santiago-La Marquesa km 22, 52600, Santiago Tilapa, Estado de México

Correo electrónico del autor correspondiente: mariaguadalupe.pineda.arizmendi@gmail.com

Eje temático: Ingeniería en Sistemas Computacionales

Resumen

El presente proyecto, surge como una propuesta orientada a fortalecer la gestión ambiental mediante la aplicación de tecnologías de inteligencia artificial y sistemas de monitoreo en tiempo real. En México, la contaminación de cuerpos de agua representa un problema ambiental de gran magnitud, derivado de la descarga incontrolada de desechos industriales, agrícolas y domésticos. Esta situación genera afectaciones ecológicas y sociales significativas, limitando el acceso al agua potable y reduciendo la calidad de los ecosistemas acuáticos. La falta de herramientas tecnológicas automatizadas para la detección temprana de contaminantes a evidenciado una brecha en la gestión sostenible del recurso hídrico, lo que motiva la presente investigación. La metodología usada para este proyecto fue "prototipado" ya que tiene un enfoque de desarrollo de modelos funcionales tempranos, su característica principal es que se construyen versiones preelminares del sistema, los usuarios lo prueban y dan retroalimentación, además de que mejora constantemente el sistema. Su funcionalidad esta compuesta por sensores inteligentes distribuidos estratégicamente en distintos puntos de observación. Dichos sensores recopilarán datos en tiempo real sobre parámetros físico-químicos del agua, como pH, turbidez, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y presencia de metales pesados. La información recolectada será procesada mediante algoritmos de aprendizaje automático, específicamente redes neuronales artificiales, que permitirán identificar patrones, detectar anomalías y generar alertas automáticas ante niveles críticos de contaminación. Además, el sistema contará con una interfaz digital interactiva que permitirá a los usuarios autoridades, instituciones y comunidades locales consultar los resultados, visualizar reportes gráficos y descargar análisis históricos de calidad del agua. Entre los resultados esperados destacan la optimización del proceso de monitoreo ambiental, la reducción de los tiempos de respuesta ante emergencias ecológicas y la mejora en la toma de decisiones estratégicas. Se estima que el sistema propuesto contribuya a incrementar la eficiencia en la detección de contaminantes en al menos un 40%, comparado con los métodos manuales tradicionales. Asimismo, se prevé una disminución significativa en los costos operativos de las campañas de muestreo y una mayor disponibilidad de información confiable para proyectos de saneamiento y conservación de ecosistemas acuáticos. En conclusión, el desarrollo de esta red neuronal representa una innovación tecnológica de alto impacto dentro del ámbito de la ingeniería sostenible, al integrar inteligencia artificial, automatización y análisis predictivo en la gestión de recursos naturales. Su implementación permitirá fortalecer la capacidad de respuesta ante problemas de contaminación hídrica, fomentar la participación social en la protección del medio ambiente y promover la transición hacia modelos de monitoreo más inteligentes, sostenibles y eficientes.

Figura 15 Artículo de divulgación.

Anexo 2A Prueba de recepción de datos en Google Sheets.

	A	B	C	D	E
1	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad	Sólidos disueltos totales (mg/L)
2	25/3/2026 10:42:15	0	9.29	2432.94	1557.0816
3	25/3/2026 10:43:12	0	8.46	2436.34	1559.2576
4	25/3/2026 10:44:39	0	8.45	2468.78	1580.0192
5	25/3/2026 10:46:07	0	9.23	2470.49	1581.1136
6	25/3/2026 10:47:07	0	9.2	2468.78	1580.0192
7	25/3/2026 10:48:06	0	9.17	2453.39	1570.1696
8	25/3/2026 10:49:07	0	9.15	2446.56	1565.7984
9	25/3/2026 10:50:07	0	8.3	2373.78	1519.2192
10	25/3/2026 10:51:09	0	8.31	2392.3	1531.072
11	25/3/2026 10:52:07	0	8.32	2350.32	1504.2048
12	25/3/2026 10:53:07	5.08	8.23	230.1	147.264
13	25/3/2026 10:54:07	93.56	8.04	38	24.32
14	25/3/2026 10:55:07	6.93	7.64	51.89	33.2096
15	25/3/2026 10:56:15	14.67	6.96	47.67	30.5088
16	25/3/2026 10:57:10	0	7.43	50.91	32.5824
17	25/3/2026 10:58:09	0	6.95	0	0
18	25/3/2026 10:59:13	72.93	6.45	0	0
19	25/3/2026 11:00:09	0	5.68	3152.12	2017.3568
20	25/3/2026 11:01:09	0	5.67	3152.12	2017.3568
21	25/3/2026 11:02:11	1.45	5.6	3161.79	2023.5456
22	25/3/2026 11:03:10	0	6.63	3154.05	2018.592
23	25/3/2026 11:04:11	0	6.6	3157.92	2021.0688
24	25/3/2026 11:05:11	0	6.6	3157.92	2021.0688
25	25/3/2026 11:06:09	1.69	5.81	3152.12	2017.3568
26	25/3/2026 11:07:11	0	6.65	2795.62	1789.1968
27	25/3/2026 11:08:09	0	5.93	2312.03	1479.6992

Figura 16 Prueba de recepción de datos en tiempo real. (Elaboración propia.).

Anexo 2B Tabla de valores obtenidos del H2OG y HQ4200.

Fecha	pH	Conductividad
27/03/2026 10:21	7.69	444.51
27/03/2026 10:23	7.72	450.55
27/03/2026 10:24	8.53	449.04
27/03/2026 10:25	7.77	442.25
27/03/2026 10:25	8.66	493.89
27/03/2026 10:27	9.66	729.54
27/03/2026 10:28	11.01	727.65
27/03/2026 10:29	9.95	902.42
27/03/2026 10:30	10.07	883.62
27/03/2026 10:31	10.89	879.47
27/03/2026 10:31	10.07	871.19
27/03/2026 10:32	10.08	865.01
27/03/2026 10:34	10.26	309.43
27/03/2026 10:34	10.85	981.72
27/03/2026 10:36	10.08	736.2
27/03/2026 10:36	10.11	738.11
27/03/2026 10:38	10.14	716.32
27/03/2026 10:38	10.14	693.91
27/03/2026 10:39	10.93	679.16
27/03/2026 10:40	10.34	631.37

27/03/2026 10:41	10.24	423.65
27/03/2026 10:42	9.43	391.81
27/03/2026 10:43	9.4	391.1
27/03/2026 10:44	10.12	379.81
27/03/2026 10:46	9.35	377.71
27/03/2026 10:47	10.08	392.52
27/03/2026 10:48	9.28	393.94
27/03/2026 10:49	10.23	466.59
27/03/2026 10:50	9.95	404.7
27/03/2026 10:50	9.6	360.41
27/03/2026 10:51	10.29	361.1
27/03/2026 10:53	10.01	352.92
27/03/2026 10:53	10.45	372.13
27/03/2026 10:54	9.34	365.22
27/03/2026 10:55	9.21	350.21
27/03/2026 10:57	9.85	353.6
27/03/2026 10:57	9.95	356.31
27/03/2026 10:58	10.17	441.5
27/03/2026 10:59	9.69	2516.96
27/03/2026 11:00	8.53	2859.71
27/03/2026 11:02	8.05	2321.99
27/03/2026 11:03	9.48	1890.09
27/03/2026 11:04	9.46	1660.03

27/03/2026 11:04	9.37	1539.58
27/03/2026 11:05	9.37	1496.39
27/03/2026 11:06	8.59	1258.43
27/03/2026 11:08	8.34	1305.68
27/03/2026 11:08	9.04	1405.3
27/03/2026 11:10	8.89	1487.03
27/03/2026 11:11	6.77	2536.02
27/03/2026 11:12	6.04	736.2
27/03/2026 11:13	6.7	3150.19
27/03/2026 11:14	6.86	3119.36
27/03/2026 11:15	5.97	3020.21
27/03/2026 11:16	6.85	3056.26
27/03/2026 11:17	6.89	3018.32
27/03/2026 11:18	6.8	2865.23
27/03/2026 11:19	6.88	2764.75
27/03/2026 11:20	5.92	2750.28
27/03/2026 11:21	6.83	2741.26

Tabla 1 Valores obtenidos del dispositivo HO2G. (Elaboración propia).

Fecha	pH	Conductividad
27/03/2026 10:21	9.97	-173.8
27/03/2026 10:23	8.35	422
27/03/2026 10:24	8.33	421
27/03/2026 10:25	9.94	542

27/03/2026 10:25	10.41	657
27/03/2026 10:27	10.5	683
27/03/2026 10:28	10.52	688
27/03/2026 10:29	10.53	691
27/03/2026 10:30	10.53	676
27/03/2026 10:31	10.54	357
27/03/2026 10:31	10.54	340
27/03/2026 10:32	10.54	370
27/03/2026 10:34	10.6	715
27/03/2026 10:34	10.6	716
27/03/2026 10:36	10.6	417
27/03/2026 10:36	10.58	0.255
27/03/2026 10:38	10.58	0.208
27/03/2026 10:38	10.57	683
27/03/2026 10:39	10.1	561
27/03/2026 10:40	10	559
27/03/2026 10:41	9.74	451
27/03/2026 10:42	9.72	439
27/03/2026 10:43	9.71	432
27/03/2026 10:44	9.71	414
27/03/2026 10:46	9.7	385
27/03/2026 10:47	9.52	487
27/03/2026 10:48	9.19	429

27/03/2026 10:49	9.11	389
27/03/2026 10:50	9.1	385
27/03/2026 10:50	9.1	385
27/03/2026 10:51	9.1	386
27/03/2026 10:53	8.96	416
27/03/2026 10:53	8.8	396
27/03/2026 10:54	8.79	395
27/03/2026 10:55	8.77	397
27/03/2026 10:57	8.77	400
27/03/2026 10:57	8.77	402
27/03/2026 10:58	8.58	1305
27/03/2026 10:59	8.5	1686
27/03/2026 11:00	8.5	1759
27/03/2026 11:02	8.5	1618
27/03/2026 11:03	8.45	1064
27/03/2026 11:04	8.45	1040
27/03/2026 11:04	8.45	961
27/03/2026 11:05	8.42	950
27/03/2026 11:06	8.39	893
27/03/2026 11:08	8.26	811
27/03/2026 11:08	7.54	936
27/03/2026 11:10	6.86	1236
27/03/2026 11:11	6.42	1402

27/03/2026 11:12	6.43	1371
27/03/2026 11:13	6.45	1330
27/03/2026 11:14	6.46	1314
27/03/2026 11:15	6.47	1297
27/03/2026 11:16	6.48	1295
27/03/2026 11:17	6.48	1159
27/03/2026 11:18	6.49	244
27/03/2026 11:19	6.49	130.8
27/03/2026 11:20	6.49	246
27/03/2026 11:21	6.49	187.8

Tabla 2 Valores obtenidos por el dispositivo HQ4200. (Elaboración propia).

Anexo 3A Manual de usuario.

Mapa de monitoreo.

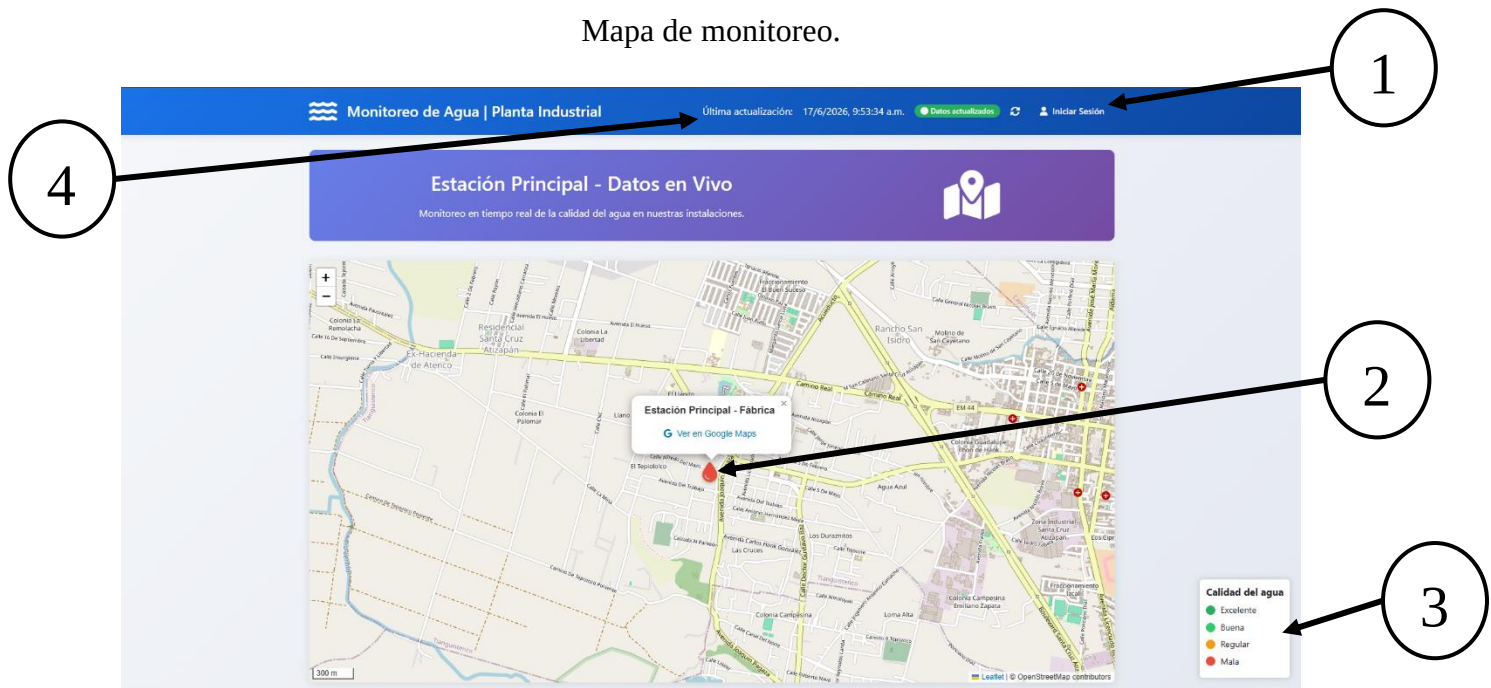


Figura 17 Imagen de la interfaz principal de un mapa del cuerpo de agua monitoreado (Elaboración propia).

- 1) En la parte superior derecha se encuentra el botón llamado “Iniciar sesión”, al hacer click en ese botón el sistema abrirá un nuevo panel para agregar datos del usuario.
- 2) En el pate central de la interfaz se encuentra un icono en forma de gota de agua, al hacer click en ese icono aparecerá un enlace para ver la dirección de la planta textil en Google Maps.
- 3) En la parte inferior derecha se encuentra una pequeña tabla que muestra el nivel de calidad del agua actualmente monitoreado, con un color específico para cada calidad.
- 4) En la parte superior central de la interfaz se encuentra un reloj que muestra la fecha y hora de la última actualización del sistema.

“Login” de acceso

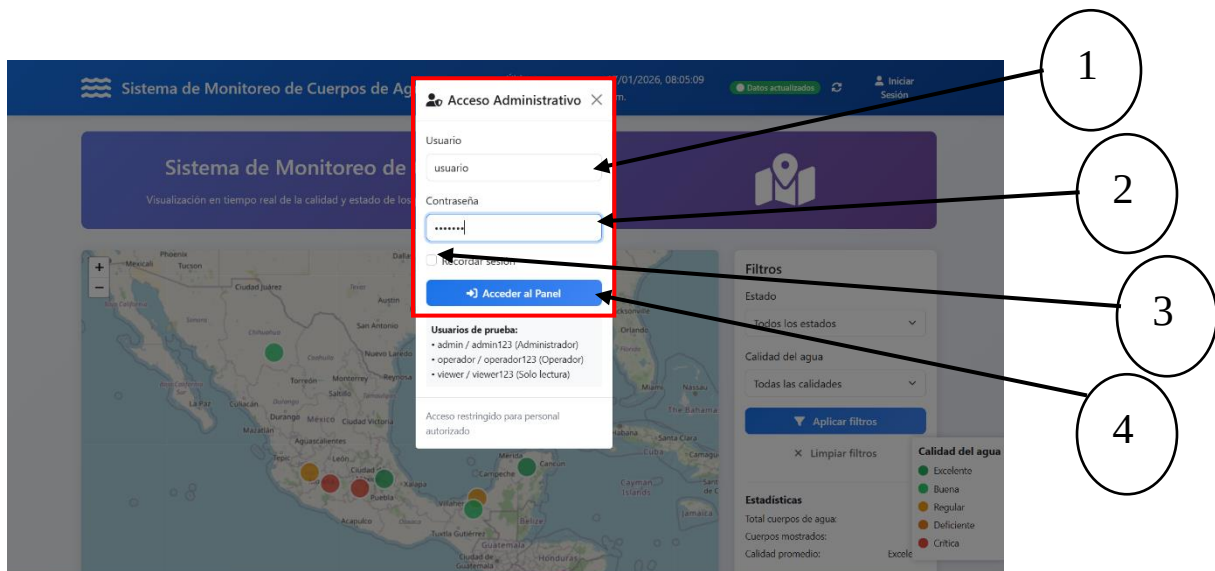


Figura 18 Imagen de la interfaz del login de acceso para los administradores de la página web (Elaboración propia).

- 1) En la parte superior de esta interfaz, se encuentra una barra donde el administrador podría ingresar su nombre de usuario que solo el tendrá.
- 2) Debajo de la barra del nombre del administrador, se encuentra una barra donde el usuario ingresara su contraseña única para ingresar al sistema.
- 3) En la parte inferior se encuentra una casilla de selección, llamada “Recordar usuario”, al seleccionar esa casilla en la página guardara el nombre del usuario.
- 4) En la parte inferior, hay un botón llamado “Acceder al Panel”, al hacer click en este botón se dará acceso al administrador siempre y cuando sus datos este correctos.

Panel de administración

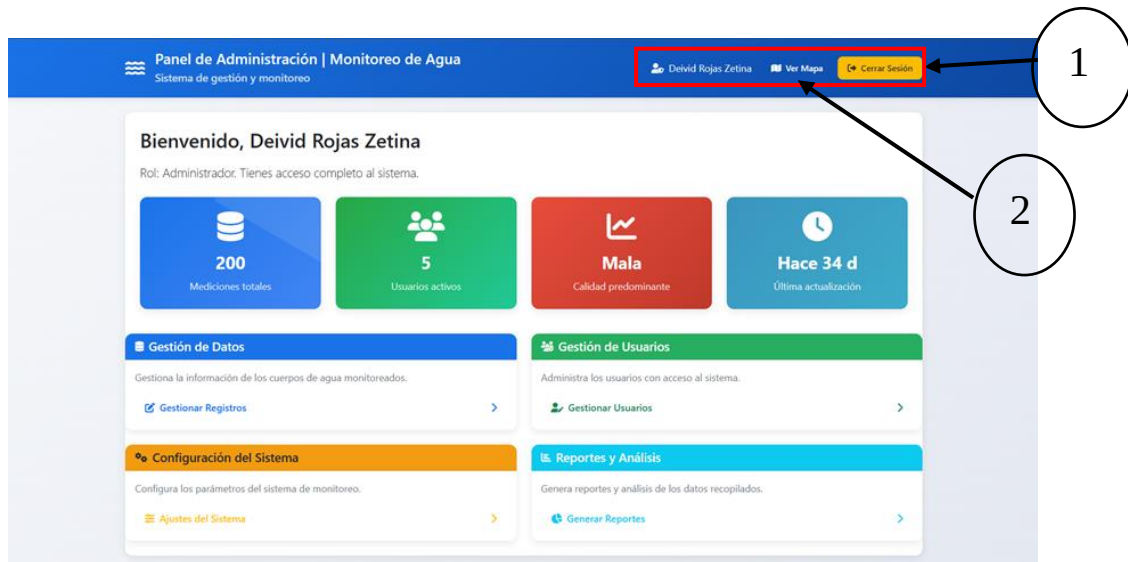


Figura 19 Imagen de la interfaz principal del administrador (Elaboración propia).

- 1) En la parte superior derecha hay un botón llamado “Cerrar Sesión”, al hacer click en ese botón el administrador saldrá del panel de administración y regresará a la página inicial.
- 2) En la parte superior derecha hay un botón llamado “Ver Mapa”, a hacer click en ese botón el administrador podrá ver la página inicial sin cerrar su sesión como administrador.

Panel de administración

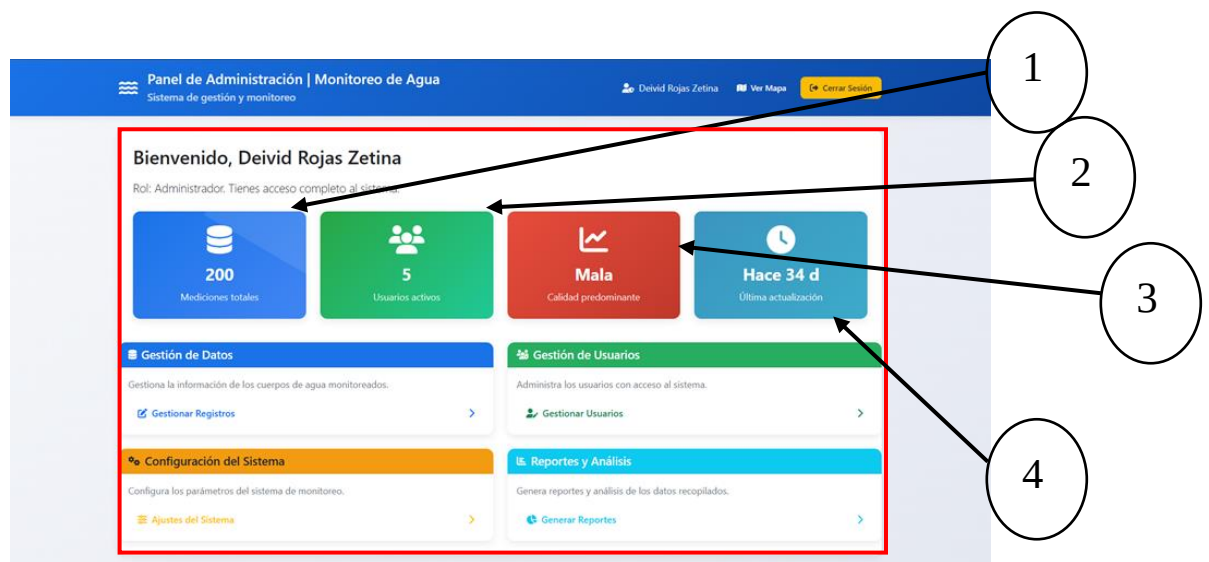


Figura 20 Imagen del panel principal del administrador, con sus funciones (Elaboración propia).

- 1) En la parte superior derecha, hay un panel llamado “Cuerpos de Agua Registrados”, en el cual se podrá ver el total de los cuerpos de agua que están registrados hasta el momento.
- 2) En la parte superior se encuentra un panel llamado “Usuarios activos”, en este apartado se podrá ver el número de usuarios que están activos en el momento que el administrador este en la página.
- 3) En este apartado hay un panel llamado “Calidad Promedio” en este panel se puede ver el promedio en general de la calidad de los datos recopilados de los cuerpos de agua.
- 4) En este panel llamado “Parámetros Monitoreados” se ve la cantidad de parámetros que llegan a través de los sensores.

Panel de administración de usuarios y registros.



Figura 21 Imagen de los paneles principales del administrador.

- 1) En la parte superior izquierda hay un botón llamado “Gestionar Registros”, al hacer click en este botón el administrador será dirigido al panel de gestión de registros.
- 2) En la parte superior derecha hay un botón llamado “Gestionar Usuarios”, al hacer click en este botón el administrador será dirigido al panel de gestión de usuarios.

Panel de administración.



Figura 22 Imagen de los paneles secundarios del administrador (Elaboración propia).

- 1) En la parte inferior izquierda hay un botón llamado “Configuración del Sistema”, al hacer click en este botón el administrador será dirigido al panel de ajustes del sistema.
- 2) En la parte superior derecha hay un botón llamado “Reportes y Análisis”, al hacer click en este botón el administrador será dirigido al panel de generación de reportes.

Panel de monitoreo del ESP32S.

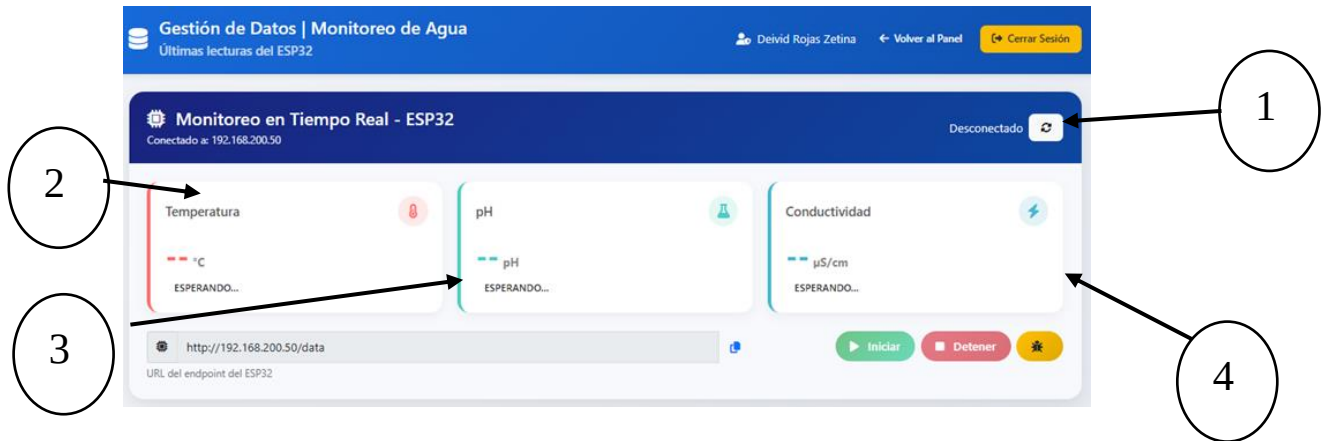


Figura 23 Imagen del panel de “Gestión de datos” del administrador (Elaboración propia).

- 1) En la parte superior derecha, hay un botón de refrescar, el cual al hacer click en él se extraerán los datos justo en el momento en el que el botón es seleccionado.
- 2) En la parte superior izquierda, se muestra un panel donde se ven los datos de la temperatura que recolecto el sensor ya sea de forma manual o automática.
- 3) En la parte superior, se muestra un panel donde se ven los datos del pH que obtuvo el sensor el sensor ya sea de forma manual o automática.
- 4) En la parte superior, se muestra un panel donde se ven los datos de la conductividad eléctrica del cuerpo de agua que obtuvo el sensor ya sea de forma manual o automática.

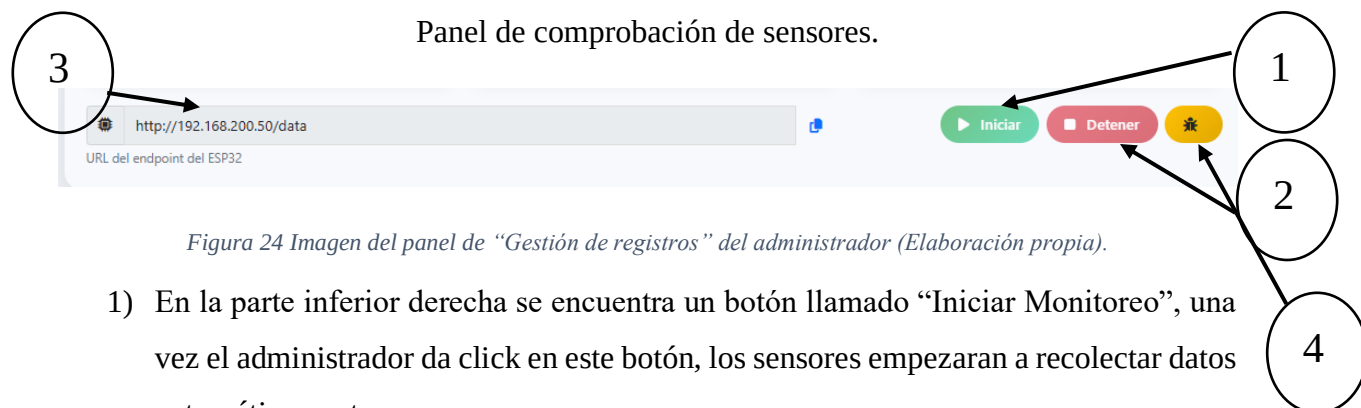


Figura 24 Imagen del panel de “Gestión de registros” del administrador (Elaboración propia).

- 1) En la parte inferior derecha se encuentra un botón llamado “Iniciar Monitoreo”, una vez el administrador da click en este botón, los sensores empezaran a recolectar datos automáticamente.
- 2) En la parte inferior derecha se encuentra un botón llamado “Detener”, una vez que el administrador de click en él, se detendrá el monitoreo automático de los sensores.
- 3) En la parte inferior izquierda, hay un “link” de acceso para los administradores, al ingresar ese “link” en el navegador, el administrador podrá ver los registros hechos.
- 4) En la parte inferior derecha hay un botón, llamado “Diagnostico”, una vez que el administrador da click en ese botón, se muestra la información de conexión del ESP32S como se muestra en la figura 25.

Notificación de diagnóstico.

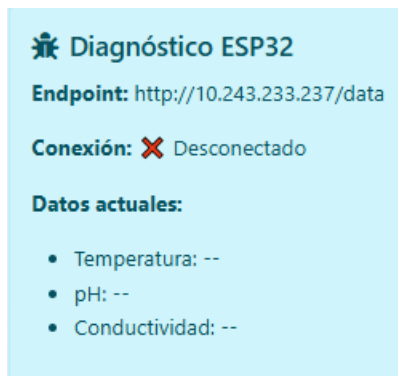


Ilustración 25 Imagen del diagnóstico del ESP32S. (Elaboración propia).

Panel de gestión de usuarios.

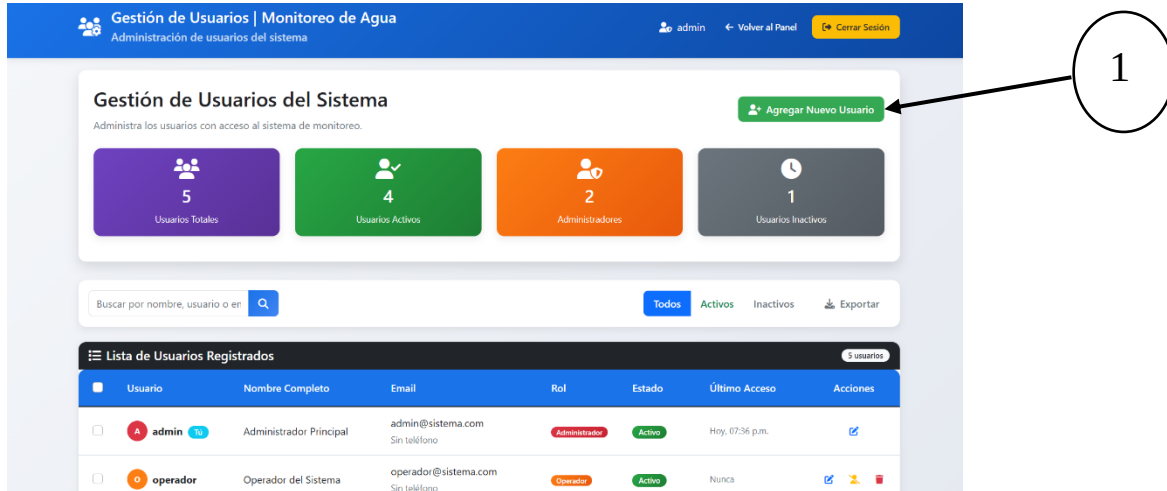


Figura 26 Imagen del panel para la gestión de usuarios del sistema (Elaboración propia).

- 1) En la parte superior derecha se ubica un botón llamado “Agregar Nuevo Usuario”, al hacer click en se botón se abrirá un formato para que el administrador agregue a un nuevo usuario.

Formato para agregar nuevo usuario.

Figura 27 Imagen del formato para agregar un nuevo usuario (Elaboración propia).

- 1) En la parte izquierda se encuentra una caja de texto donde el administrador deberá ingresar el nombre del nuevo usuario, con ese nombre es con el que el nuevo usuario deberá iniciar sesión.

- 2) En la parte izquierda se encuentra una caja de texto donde el administrador deberá ingresar el nombre completo del nuevo usuario.
- 3) En la parte izquierda se encuentra un menú desplegable donde el administrador podrá determinar el rol que tendrá el nuevo usuario.
- 4) En la parte derecha se encuentra una caja de texto donde el administrador deberá ingresar una contraseña especial para el nuevo usuario.
- 5) En este apartado el administrador deberá ingresar el correo electrónico del nuevo usuario.
- 6) En este apartado el administrador deberá ingresar el número de teléfono del nuevo usuario.
- 7) En la parte inferior derecha se encuentra un botón llamado “Guardar Usuario”, una vez llenado los datos del nuevo usuario al hacer click en el botón se registrará al nuevo usuario con los datos ingresados.
- 8) En la parte inferior del formato se encuentra un botón llamado “Cancelar”, al hacer click en este botón todos los datos ingresados se borrarán sin registrar al nuevo usuario.

Panel de gestión de usuarios.

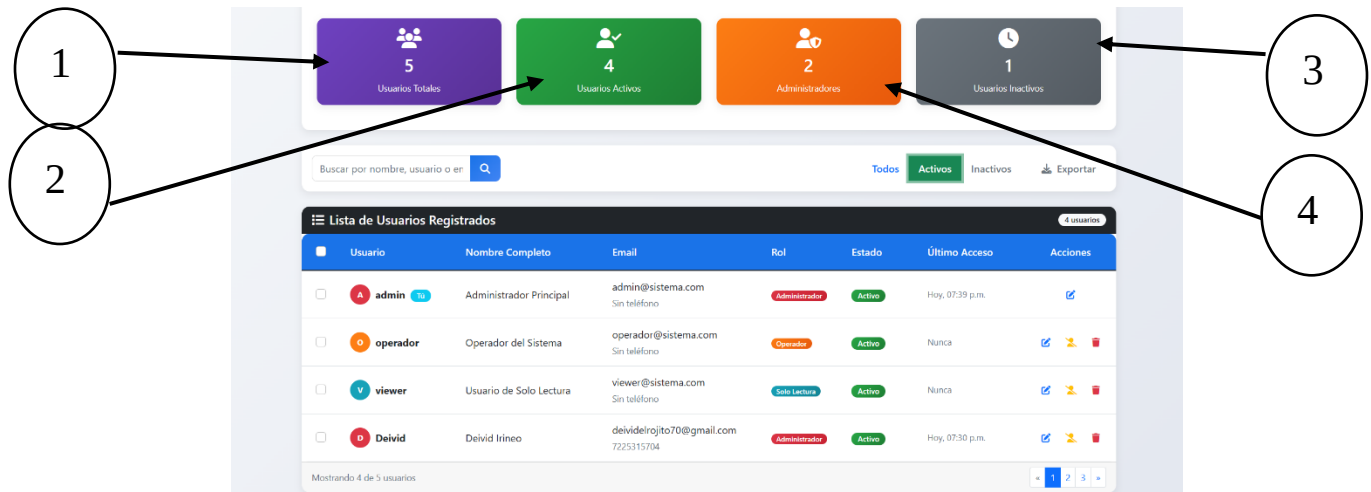


Figura 28 Imagen del panel de administración de usuarios (Elaboración propia).

- 1) En este panel ubicado en la parte superior se ve el número de usuarios registrados hasta el momento.
- 2) En este panel ubicado en la parte superior se ve el número de usuarios activos hasta el momento.
- 3) En este panel ubicado en la parte superior derecha se ve el número de usuarios inactivos hasta el momento.
- 4) En este panel ubicado en la parte superior se ve el número de administradores en el sistema.

Panel de usuarios y roles.

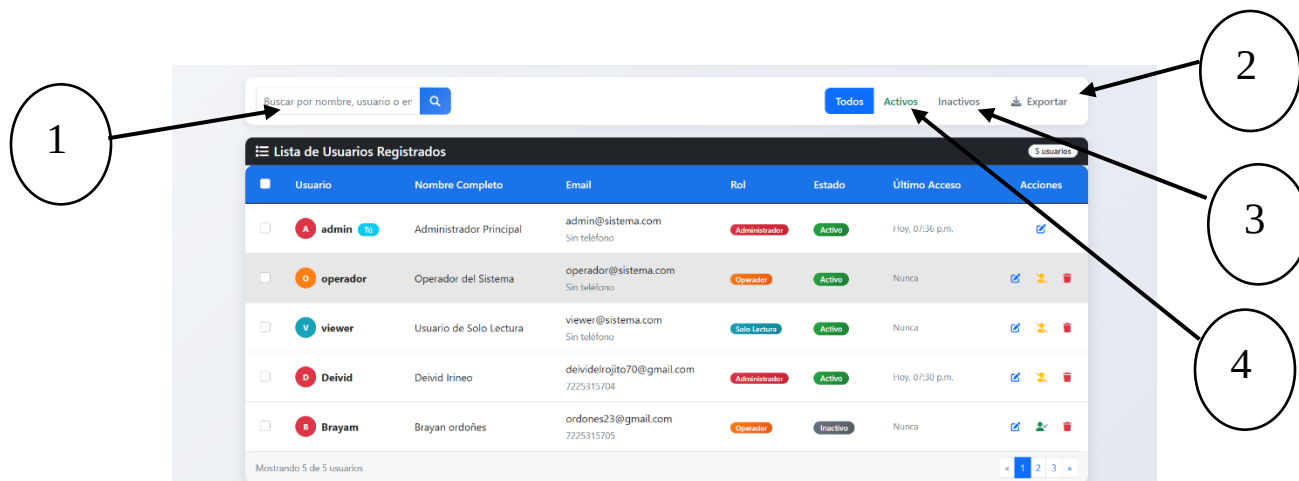


Figura 29 Imagen del panel de administración de usuarios (Elaboración propia).

- 1) En este apartado se encuentra una barra de búsqueda, donde el administrador podría ingresar los datos del usuario que le interese.
- 2) En la esquina superior derecha se encuentra un botón llamado “Exportar”, el cual al hacer click en el botón se descargará una lista de Excel donde se podrán ver los datos de todos los usuarios.
- 3) En este apartado hay un botón llamado “Inactivos”, en cuanto el administrador de click en ese botón se verán únicamente los usuarios que estén inactivos.
- 4) En este apartado hay un botón llamado “Activos”, en cuanto el administrador de click en ese botón se verán únicamente los usuarios que estén activos hasta el momento.

Panel de Configuración del Sistema.

Configuración del Sistema | Monitoreo de Agua
Límites de parámetros

Límites de Parámetros
Define los rangos aceptables para los parámetros del cuerpo de agua monitoreado.

Límites por tipo de cuerpo de agua + Agregar Tipo

Configura los límites máximos y mínimos permitidos para cada parámetro. El sistema mostrará alertas cuando los valores excedan estos límites.

Tipo de Cuerpo	pH Mín	pH Máx	Oxígeno Min (mg/L)	Oxígeno Máx (mg/L)	Conductividad Min (µS/cm)	Conductividad Máx (µS/cm)	Temp Min (°C)	Temp Máx (°C)	Acciones
Lago	6.5	8.5	5	10	50	500	10	25	
Rio	6	8	6	12	50	500	15	28	
Cenote	7	8	7	10	50	500	18	26	
Laguna	6.8	8.2	5	9.5	50	500	20	30	
Manantial	7	8.5	8	12	50	500	15	25	
Fabrica	6.5	8.5	5	10	50	500	10	25	
Estación Principal	6.5	8.5	5	10	50	5000	-6.6	50	

Recomendaciones:
• pH: El rango ideal para la mayoría de cuerpos de agua es 6.5-8.5

Restablecer Valores por Defecto ✓ Configuración Guardada

Figura 30 panel de los límites de los parámetros (Elaboración propia).

- 1) En la parte superior derecha de la tabla de valores, se encuentra el botón “Agregar tipo”, al hacer click en ese botón el usuario podrá agregar un cuerpo de agua diferente con sus propios parámetros de conductividad, así como de pH y temperatura.
- 2) En la parte central de la interfaz se encuentra la tabla de parámetros, en la cual el usuario podrá ajustar los valores que se deseen para el cuerpo de agua que se esté monitoreando.
- 3) En la parte central derecha se encuentran los botones de “Editar” y “Eliminar cambios”, al hacer click en el primero, el usuario podrá modificar los parámetros establecidos para el cuerpo de agua que se haya seleccionado, si hace click en el botón de eliminar parecerá una ventana donde el usuario podrá eliminar el cuerpo de agua, así como sus configuraciones PERMANETEMENTE.

- 4) En la parte inferior, se encuentran los botones “Restablecer valores por defecto” y “Guardar Cambios” este botón solo se activara una vez que el usuario haya interactuado con los valores que desee modificar, al hacer click sobre este, el usuario guardara cualquier cambio que haya realizado en los parámetros de los cuerpos de agua.

Panel de reportes y análisis.

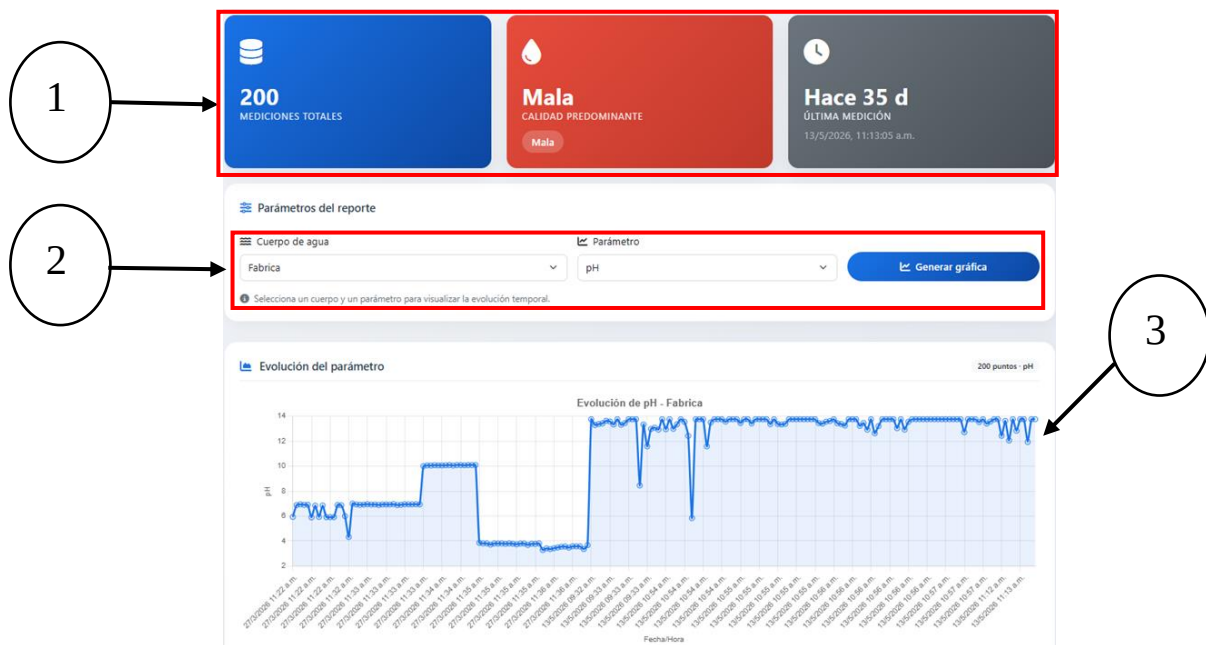


Figura 31 Panel de análisis de los datos generados por los sensores.

- 1) En esta sección se muestran tanto los registros totales de los cuerpos de agua, así como el promedio de su calidad, de los registros además de el ultimo dia que se hizo un monitoreo.
- 2) En esta sección se pueden configurar los datos que se deseen para el resultado de la gráfica que se encuentra en la parte inferior al hacer click en el menú desplegable de “Parámetro”, el usuario podrá seleccionar el parámetro que quiera ver reflejado en la gráfica, ya sea pH, conductividad o temperatura. Si el usuario hace click en el menú desplegable, “Cuerpo de agua”, el usuario podrá seleccionar que cuerpo de agua quiere que se vea reflejado en la gráfica de monitoreo.

- 3) En la parte inferior se encuentra una gráfica, la cual muestra los resultados de la selección previa del parámetro, así como del cuerpo de agua que el usuario haya seleccionado.

Anexo 3B Manual técnico

Introducción y objetivo

Sistema integral de monitoreo de calidad de agua que combina hardware embebido (ESP32S) con una plataforma web para la obtención, procesamiento, almacenamiento y visualización de parámetros fisicoquímicos en tiempo real. Su objetivo principal es proporcionar una herramienta de bajo costo para la vigilancia de cuerpos de agua, permitiendo la detección temprana de contaminación.

Alcance técnico:

- Hardware: Microcontrolador ESP32S con sensores analógicos.
- Frontend: Aplicación web responsiva con mapa interactivo.
- Backend: Servidor web embebido en el microcontrolador.
- Persistencia: Almacenamiento local en navegador (localStorage).
- Comunicación: Protocolo HTTP/JSON sobre WiFi.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

Requerimientos de hardware:

Tabla de requerimientos

Componente	Especificación	Propósito
Microcontrolador	ESP32S-WROOM-32	Procesamiento y comunicación
Sensores	Analógicos (0-3.3V)	Medición de pH, temperatura, conductividad

Alimentación	5V DC/ 500mA	Energía para sensores y ESP32S
	mínimo	
Comunicación	Wifi 802.11\$ b/g/n	Transmisión de datos

Tabla 3 Requerimientos del hardware

Requerimientos del cliente:

- Navegador web moderno (Chrome 90+, Firefox 88+, Safari 14+).
- Conexión WiFi para acceso al ESP32S.
- JavaScript habilitado.
- Resolución mínima: 320×568 px (iPhone SE).

Arquitectura del software:

Patrones de diseño implementados, todos los componentes JavaScript utilizan este patrón para encapsulación:

```
const Componente = (function() {
  let estadoPrivado = {};

  function funcionPrivada() { /* Lógica interna */ }

  return {
    inicializar: function() { funcionPrivada(); },
    obtenerEstado: function() { return estadoPrivado; }
  };
})();
```

Separación de responsabilidades, todos los módulos tienen una responsabilidad única, por ejemplo: ESP32S Firmware tiene como función la adquisición de datos y servidor web. esp32-monitor.js comunica en tiempo real los datos de los sensores con la página web. gestion-datos.js se encarga de las acciones como el CRUD. common.js comparte utilidades con todo el sistema.

Estructura de directorios:

Organización de archivos

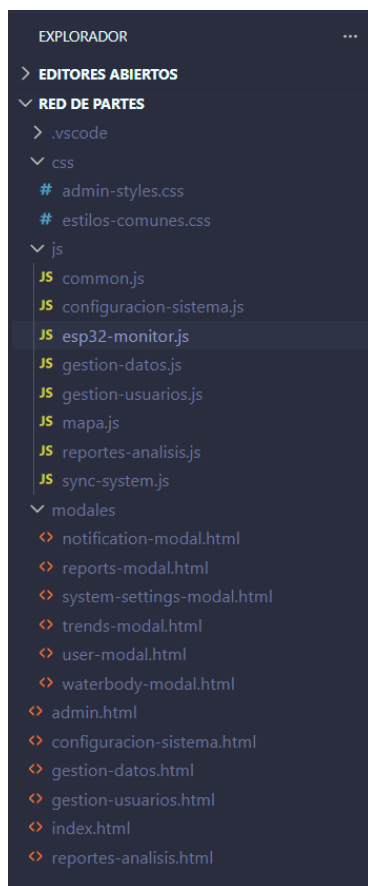


Figura 32 estructura de los directorios y archivos del sistema (Elaboración propia).

Módulo de hardware (ESP32S):

Configuración del microcontrolador (pines y conexiones).

Conexiones del ESP32S con los sensores

Pin ESP32S	Función	Sensor	Circuito Asociado
GPIO34	ADC1_CH6	Temperatura	Divisor de voltaje
GPIO35	ADC1_CH7	pH	Amplificador operacional
GPIO32	ADC1_CH4	Conductividad	Acondicionamiento
3.3V	Alimentación	Todos	Regulador de voltaje
GND	Tierra	Todos	Referencia común

Tabla 4 Conexiones de los sensores hacia el ESP32S con su función. (Elaboración propia).

Algoritmos de conversión de datos:

Temperatura:

```
float leerTemperatura() {  
    int raw = analogRead(PIN_TEMP);           // 0-4095  
    float voltaje = raw * (3.3 / 4095.0);      // Convertir a voltaje  
    return voltaje * 100.0;                    // LM35: 10mV por °C  
}
```

pH:

```
float leerPH() {  
    int raw = analogRead(PIN_PH);  
    float voltaje = raw * (3.3 / 4095.0);  
    return 7.0 + ((2.5 - voltaje) * 3.0);      // Calibración: pH 7 = 2.5V  
}
```

Servidor Web Embebido:

- Modo: Access Point (AP).
- SSID: ESP32_MONITOR.
- Contraseña: 12345678.

- IP estática: 192.168.4.1.
- Puerto: 80 (HTTP).

Módulo de comunicación:

Implementación del patrón Módulo Revelador:

```
const ESP32Monitor = (function() {
  let isMonitoring = false;
  let monitoringInterval = null;
  let lastData = null;

  function obtenerDatosESP32() { /* ... */ }

  return {
    initialize: init,
    startMonitoring: iniciarMonitoreo,
    stopMonitoring: detenerMonitoreo
  };
})();
```

Algoritmo de obtención de datos:

```
async function obtenerDatosESP32() {
  actualizarEstadoConexion('conectando');

  try {
    const response = await fetch(`${ESP32_IP}/data`, {
      method: 'GET',
      mode: 'cors',
      headers: { 'Accept': 'application/json' },
      timeout: 3000
    });

    if (!response.ok) throw new Error(`HTTP ${response.status}`);
```

```

    const data = await response.json();
    lastData = data;
    actualizarInterfazConDatos(data);
    actualizarEstadoConexion('conectado');

  } catch (error) {
    actualizarEstadoConexion('desconectado');
    mostrarErrorConexion();
  }
}

```

Sistema de alertas visuales:

Temperatura:

```

if (temp >= 18 && temp <= 25) {
  color = '#28a745'; // Verde - Óptimo
} else if (temp > 25 && temp <= 30) {
  color = '#ffc107'; // Amarillo - Advertencia
} else {
  color = '#dc3545'; // Rojo - Crítico
}

```

pH:

```

if (pH >= 6.5 && pH <= 7.5) {
  color = '#28a745'; // Verde - Neutro (ideal)
} else if ((pH >= 6 && pH < 6.5) || (pH > 7.5 && pH <= 8)) {
  color = '#ffc107'; // Amarillo - Ligeramente ácido/alcalino
} else {
  color = '#dc3545'; // Rojo - Fuera de rango aceptable
}

```

Arquitectura de los datos:

```
const waterBodySchema = {
  id: "number",           // Identificador único
  nombre: "string",       // Nombre descriptivo
  ubicacion: "string",    // Ubicación geográfica
  calidad: "string",      // Excelente/Buena/Regular/Mala
  tipo: "string",         // Lago/Río/Cenote/Presa/Laguna/Manantial
  ph: "number",           // Potencial de hidrógeno (0-14)
  oxigeno_disuelto: "number", // Oxígeno disuelto (mg/L)
  temperatura: "number",  // Temperatura (°C)
  fecha_registro: "string", // Timestamp ISO 8601
  fuente: "string"        // Manual/ESP32_Automático
}
```

Sistema de CRUD (**Create, Read, Update, Delete**).

Creación de registros:

```
function crearRegistroAutomatico(sensorData) {
  const nuevoRegistro = {
    id: generarNuevoId(),
    nombre: `Sensor_${formatDate(new Date())}`,
    ubicacion: "Lectura automática del sensor",
    calidad: determinarCalidadAutomatica(sensorData.ph, sensorData.temp),
    tipo: "Monitoreo Automático",
    ph: parseFloat(sensorData.ph),
    oxigeno_disuelto: 8.0,
    temperatura: parseFloat(sensorData.temp),
    fecha_registro: new Date().toISOString(),
    fuente: "ESP32_Sensor_Automático"
  };

  // Persistir en LocalStorage
  const registrosExistentes = obtenerRegistros();
  registrosExistentes.push(nuevoRegistro);
  guardarRegistros(registrosExistentes);
}
```

```

    return nuevoRegistro;
}

Algoritmo de clasificación:
function determinarCalidadAutomatica(ph, temperatura) {
    const phNum = parseFloat(ph) || 7;
    const tempNum = parseFloat(temperatura) || 25;

    // Evaluación multicriterio basada en normativas
    if (phNum >= 6.5 && phNum <= 7.5 && tempNum >= 18 && tempNum <= 25) {
        return "Excelente"; // Condiciones óptimas
    } else if (phNum >= 6.0 && phNum <= 8.0 && tempNum >= 15 && tempNum <= 28) {
        return "Buena"; // Dentro de límites aceptables
    } else if (phNum >= 5.5 && phNum <= 8.5 && tempNum >= 10 && tempNum <= 32) {
        return "Regular"; // Límites permisibles
    } else {
        return "Mala"; // Fuera de especificaciones
    }
}

```

Algoritmo de validación:

```

function validarParametros(ph, oxigeno, temperatura) {
    const errores = [];

    if (ph < 0 || ph > 14) {
        errores.push(`pH (${ph}) fuera del rango válido [0-14]`);
    }

    if (oxigeno < 0 || oxigeno > 20) {
        errores.push(`Oxígeno disuelto (${oxigeno}) fuera de rango [0-20 mg/L]`);
    }
;

    if (temperatura < -10 || temperatura > 50) {
        errores.push(`Temperatura (${temperatura}) fuera de rango [-10-50°C]`);
    }
}

```

```

    }

    return {
      valido: errores.length === 0,
      errores: errores,
      mensaje: errores.length > 0 ? errores.join('; ') : 'Datos válidos'
    };
  }
}

```

Módulo de acciones compartidas.

Arquitectura principal:

```

const Common = (function() {
  // Estado privado global
  let currentUser = null;
  let waterBodies = [];
  let users = [];
  let systemSettings = {};

  // Inicialización
  function initialize() {
    loadAllData();
    checkAuthentication();
    setupBasicUI();
    return true;
  }

  // Interfaz pública
  return {
    initialize,
    get currentUser() { return currentUser; },
    get waterBodies() { return waterBodies; },
    showAlert,
    saveToLocalStorage
  };
})();

```

Sistema de autenticación:

```
const defaultUsers = [
  {
    id: 1,
    username: 'admin',
    password: 'admin123',
    fullname: 'Administrador Principal',
    role: 'admin', // admin/operator/viewer
    active: true
  },
  {
    id: 2,
    username: 'operador',
    password: 'operador123',
    role: 'operator',
    active: true
  },
  {
    id: 3,
    username: 'viewer',
    password: 'viewer123',
    role: 'viewer',
    active: true
  }
];
```

Sistema de notificaciones:

```
function showAlert(message, type = 'info', duration = 3000) {
  // Eliminar alertas existentes
  document.querySelectorAll('.common-alert').forEach(alert => alert.remove());

  // Crear nueva alerta
  const alertDiv = document.createElement('div');
  alertDiv.className = `alert alert-${type} alert-dismissible common-alert`;
  alertDiv.style.cssText = `
```

```

        position: fixed;
        top: 20px;
        right: 20px;
        z-index: 9999;
        min-width: 300px;
        max-width: 500px;
        animation: slideInRight 0.3s ease;
    `;

    alertDiv.innerHTML = `
        ${message}
        <button type="button" class="btn-close" data-bs-dismiss="alert"></button>
    `;

    document.body.appendChild(alertDiv);

    // Auto-eliminación
    if (duration > 0) {
        setTimeout(() => {
            if (alertDiv.parentNode) alertDiv.remove();
        }, duration);
    }
}

```

Sistema de interfaz de usuario (paletas de colores).

Diseño visual de la interfaz general:

```

:root {
    /* Colores primarios */
    --primary-color: #1a73e8;      /* Azul principal */
    --primary-dark: #0d47a1;       /* Azul oscuro */
    --secondary-color: #34a853;    /* Verde (éxito) */
    --accent-color: #4285f4;       /* Azul acento */
    --warning-color: #fbbc05;      /* Amarillo (advertencia) */
    --danger-color: #ea4335;       /* Rojo (peligro) */

    /* Colores de calidad del agua */
    --quality-excellent: #27ae60;  /* Verde excelente */
}

```

```

--quality-good: #2ecc71;      /* Verde bueno */
--quality-regular: #f39c12;   /* Naranja regular */
--quality-poor: #e67e22;      /* Naranja oscuro deficiente */
--quality-critical: #e74c3c;  /* Rojo crítico */

/* Variables de diseño */
--border-radius: 12px;
--box-shadow: 0 4px 12px rgba(0, 0, 0, 0.08);
--box-shadow-hover: 0 8px 20px rgba(0, 0, 0, 0.12);
--transition: all 0.3s ease;
}

```

Botones:

```

.btn-primary {
  background: linear-gradient(135deg, var(--primary-color) 0%, var(--accent-color) 100%);
  border-color: var(--primary-color);
}

.btn-success {
  background: linear-gradient(135deg, var(--secondary-color) 0%, #34a853 100%);
  ;
  border-color: var(--secondary-color);
}

```

Inicialización de mapa:

```

// Configuración del mapa centrado en México
const map = L.map('map').setView([23.6345, -102.5528], 5);

// Capa base de OpenStreetMap
L.tileLayer('https://{s}.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png', {
  attribution: '© OpenStreetMap contributors'
}).addTo(map);

```

Marcadores de calidad:

```
function agregarMarcador(lat, lng, datos) {
  const color = obtenerColorCalidad(datos.calidad);

  const icono = L.divIcon({
    className: 'custom-marker',
    html: `

90


```

Sistema de animaciones:

```
@keyframes fadeIn {  
  from { opacity: 0; transform: translateY(20px); }  
  to { opacity: 1; transform: translateY(0); }  
}  
  
@keyframes pulse {  
  0% { transform: scale(1); }  
  50% { transform: scale(1.05); }  
  100% { transform: scale(1); }  
}  
  
@keyframes slideInRight {  
  from { transform: translateX(100%); opacity: 0; }  
  to { transform: translateX(0); opacity: 1; }  
}
```

Sistema de autenticación de roles:

Roles del sistema.

Rol	Permisos	Páginas Accesibles
admin	Gestión completa (CRUD) y ajustes de configuración del sistema.	Acceso total a todas las secciones de la plataforma.
operator	Gestión de datos (CRUD) sin acceso a administración de usuarios o sistema.	Secciones de gestión de datos y generación de reportes.
viewer	Permisos restringidos exclusivamente a la lectura de información.	Visualización de dashboards y consulta de reportes.

Tabla 5 roles y permisos dentro del sistema (Elaboración propia).

Control de accesos:

```
function requireAuth(requiredRole) {  
  return function() {  
    if (!Common.currentUser) {  
      window.location.href = 'index.html';  
    }  
  }  
}
```

```

        return false;
    }

    if (requiredRole && Common.currentUser.role !== requiredRole) {
        Common.showAlert('Permisos insuficientes para esta acción', 'warning
    ');
        return false;
    }
    return true;
};
}
// Uso en páginas protegidas
if (!requireAuth('admin')()) {
    // Redirigir o mostrar error
}

```

Gestión de inicio de sesiones:

```

function handleLogin(username, password, rememberMe) {
    const user = validateCredentials(username, password);
    if (user) {
        // Almacenar según preferencia del usuario
        if (rememberMe) {
            localStorage.setItem('currentUser', JSON.stringify(user));
        } else {
            sessionStorage.setItem('currentUser', JSON.stringify(user));
        }

        // Actualizar estado global
        Common.currentUser = user;

        // Redirigir según rol
        redirectBasedOnRole(user.role);

        return true;
    }
    return false;
}

```

```
}
```

Limpieza de inicio de sesión:

```
function handleLogout() {  
    // Limpiar almacenamiento  
    sessionStorage.removeItem('currentUser');  
    localStorage.removeItem('currentUser');  
  
    // Limpiar estado global  
    Common.currentUser = null;  
  
    // Redirigir a página principal  
    window.location.href = 'index.html';  
}
```

Validación del sistema.

Se realizaron varias pruebas para comprobar el funcionamiento del sistema, la prueba unitaria que validan las funciones individuales, como el login de acceso por roles. La prueba de integración que verifica la comunicación entre los distintos módulos del sistema, como lo pueden ser el index.html al iniciar sesión te dirige a admin.html. La prueba del sistema que se hizo identificando que los sensores daban señales al ESP32S, el cual transmitió los datos de manera eficiente hacia la página web.

Recomendaciones futuras.

Red de sensores distribuida:

- Múltiples ESP32S en diferentes ubicaciones
- Comunicación mesh entre nodos
- Agregación central de datos

Añadir más sensores:

- Turbidez

- Nitratos y fosfatos

Limitaciones Técnicas:

- Alcance WiFi: Limitado a ~100 metros en espacio abierto
- Persistencia local: Datos confinados a un solo navegador/dispositivo
- Escalabilidad: Máximo ~10,000 registros en localStorage
- Calibración manual: Requiere intervención periódica para mantener precisión