Diseño de un prototipo para el control de parámetros en sistemas acuáticos

Cesar Giovanny Calderón Malagón

Andrés Edilberto Guzmán Pulido

Universitaria Agustiniana – Uniagustiniana

Facultad de ingeniería

Ingeniería en telecomunicaciones

Bogotá D.C.

2026

Diseño de un prototipo para el control de parámetros en sistemas acuáticos

Cesar Giovanny Calderón Malagón

Andrés Edilberto Guzmán Pulido

Tutor

Edgar Fabian Rodríguez Veloza

Trabajo para optar al título de ingeniero en telecomunicaciones

Universitaria Agustiniana – Uniagustiniana

Facultad de ingeniería

Ingeniería en telecomunicaciones

Bogotá D.C.

2026

Tabla de contenido

Resumen (Abstract) *8*

Abstract (Resumen) *9*

Planteamiento del problema *10*

Justificación *12*

Objetivos *14*

Objetivo general **14**

Objetivos específicos **14**

Estado del arte *15*

Marco teórico **22**

Monitoreo ambiental **22**

Sostenibilidad hídrica **25**

Telemetría **27**

Internet de las cosas (IoT) **30**

Calidad del agua **33**

Marco conceptual *37*

Marco legal *42*

Metodología *46*

Cronograma *49*

Presupuesto *51*

Desarrollo del proyecto *53*

Objetivo 1 ..... **53**

Objetivo 2 ..... **56**

Objetivo 3 ..... **78**

Conclusiones *83*

Recomendaciones *86*

Delimitación del proyecto *89*

Alcances **89**

Limitaciones **89**

Referencias *90*

Anexos *94*

Lista de Tablas

Tabla 1..... 44

Tabla 2..... 49

Tabla 3..... 51

Tabla 4..... 51

Tabla 5..... 52

Tabla 6..... 52

Tabla 7..... 55

Tabla 8..... 58

Tabla 9..... 60

Tabla 10..... 61

Tabla 11..... 63

Lista de Figuras

Figura 1 57

Figura 2 59

Figura 3 61

Figura 4 62

Figura 5 64

Figura 6 64

Figura 7 65

Figura 8 66

Figura 9 68

Figura 10 69

Figura 11 70

Figura 12 72

Figura 13 73

Figura 14 74

Figura 15 75

Figura 16 77

Figura 17 79

Figura 18 80

Figura 19 81

Tabla de fórmulas

Fórmula 1 53

Resumen (Abstract)

El recurso hídrico constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo sostenible, la salud pública y el equilibrio de los ecosistemas. En las últimas décadas, factores como el cambio climático, el crecimiento poblacional y la contaminación han incrementado la degradación de este recurso, generando la necesidad de implementar estrategias más eficientes para su monitoreo y control. En este contexto, comunidades, entidades gubernamentales y sectores productivos enfrentan desafíos relacionados con la disponibilidad y calidad del agua, especialmente en países en desarrollo como Colombia.

Desde el ámbito académico y tecnológico, la gestión ambiental y la transformación digital han impulsado el uso de herramientas innovadoras. En particular, la telemetría y el Internet de las Cosas (IoT) permiten la supervisión continua de variables ambientales mediante la recolección y el análisis de datos en tiempo real. Asimismo, el índice NSF-WQI proporciona un marco estandarizado para interpretar parámetros fisicoquímicos del agua y facilitar la toma de decisiones.

En Colombia, aunque existen normativas para la protección del recurso hídrico, aún predominan procesos de monitoreo manuales o de baja frecuencia, lo que dificulta la detección oportuna de alteraciones en la calidad del agua, el objetivo de este trabajo es diseñar un prototipo a escala para el monitoreo de parámetros fisicoquímicos en cuerpos de agua, basado en el índice NSF-WQI, mediante la integración de sensores y tecnologías de comunicación LTE. Esta propuesta busca ofrecer una solución accesible, eficiente y escalable que contribuya a la gestión ambiental.

Palabras clave: telemetría, internet de las cosas, calidad del agua, monitoreo ambiental, sostenibilidad hídrica

Abstract (Resumen)

Water resources constitute one of the fundamental pillars for sustainable development, public health, and ecosystem balance. In recent decades, factors such as climate change, population growth, and pollution have increased the degradation of this resource, creating the need to implement more efficient strategies for its monitoring and control. In this context, communities, governmental entities, and productive sectors face challenges related to water availability and quality, especially in developing countries such as Colombia.

From an academic and technological perspective, environmental management and digital transformation have driven the adoption of innovative tools. In particular, telemetry and the Internet of Things (IoT) enable continuous monitoring of environmental variables through real-time data collection and analysis. Likewise, the NSF-WQI index provides a standardized framework for interpreting physicochemical water parameters and supporting informed decision-making.

In Colombia, although regulations exist for the protection of water resources, manual or low-frequency monitoring processes still predominate, making it difficult to detect timely alterations in water quality. The objective of this work is to design a scaled prototype for monitoring physicochemical parameters in water bodies, based on the NSF-WQI index, through the integration of sensors and LTE communication technologies. This proposal aims to provide an accessible, efficient, and scalable solution that contributes to environmental management.

Keywords: telemetry, internet of things, water quality, environmental monitoring, water sustainability

Planteamiento del problema

En la actualidad, la gestión del recurso hídrico enfrenta múltiples desafíos derivados del crecimiento poblacional, la contaminación y la necesidad de optimizar los procesos de monitoreo. En este contexto, el uso de tecnologías digitales ha permitido transformar la manera en que se supervisan los sistemas ambientales, dejando de hacer todo manual y resaltando el Internet de las Cosas (IoT) como una solución que integra sensores, redes o incluso plataformas de análisis para la recolección de datos en tiempo real, además la fácil adaptación con entornos volátiles como podría ser una página web o incluso un equipo físico que solo muestre lo transmitido (Panahi, 2018).

A pesar de estos avances tecnológicos, el desarrollo de soluciones eficientes depende en gran medida de la implementación de metodologías adecuadas que permitan estructurar sistemas adaptables, escalables y orientados a la toma de decisiones. En este sentido, el uso de metodologías ágiles y enfoques de desarrollo de sistemas de soporte a decisiones (DSS) permite mejorar la eficiencia en el diseño e implementación de soluciones tecnológicas, especialmente en entornos dinámicos y complejos de un entorno simulado o real, dando estabilidad a través del tiempo y un posible crecimiento por la fácil adaptación que esto implica. (Gharaibeh, 2018).

Asimismo, el IoT se fundamenta en la interconexión de dispositivos capaces de recopilar información desde el entorno, transmitirla a través de redes de comunicación y procesar la información adquirida en tiempo real. Esta capacidad lo convierte en una herramienta clave para aplicaciones como el monitoreo ambiental, donde la disponibilidad de datos oportunos permite mejorar la toma de decisiones y la gestión de recursos, dando así una ventaja sobre otros esquemas usados, hoy en día incluso usable con equipos de ciberseguridad, dándonos confiabilidad y automatización (Panahi, 2018).

Por otra parte, la problemática del agua ha sido reconocida a nivel global como un desafío crítico que requiere soluciones sostenibles y tecnológicamente avanzadas. Informes internacionales destacan la necesidad de implementar estrategias innovadoras que permitan mejorar la gestión del recurso hídrico frente a factores como el cambio climático y la presión sobre los ecosistemas, y si se puede mitigar los momentos muertos donde el humano no puede estar, el prototipo entra a cumplir una función fundamental, de gran ayuda a la comunidad y centro educativos. (UNESCO, 2022)

¿Cómo puede la ingeniería en telecomunicaciones aportar en el diseño de un sistema de telemetría que permita medir y transmitir información de la calidad del agua, para evitar la contaminación y el deterioro de fuentes hídricas?

Justificación

El agua es un recurso vital, cuya calidad incide directamente en la salud de las comunidades y en la sostenibilidad de los ecosistemas a largo plazo. A nivel global, se ha evidenciado la necesidad de fortalecer los mecanismos de monitoreo y control del recurso hídrico, especialmente frente a problemáticas como la contaminación y el cambio climático (UNESCO, 2020). En Colombia, estos procesos no siempre se ejecutan de manera constante ni eficiente, debido a que gran parte de los métodos utilizados son manuales o dependen de equipos aislados que no permiten la integración, transmisión ni análisis de datos en tiempo real a un costo accesible. Esta situación dificulta la detección oportuna de eventos de contaminación y limita la capacidad de tomar decisiones informadas que eviten impactos ambientales y sanitarios.

En este contexto, el diseño de un sistema de telemetría aplicado al monitoreo de la calidad del agua adquiere gran relevancia, ya que permite integrar tecnologías de comunicación y sensores capaces de recolectar, transmitir y procesar datos de forma continua. El uso del Internet de las Cosas (IoT) facilita la interconexión de dispositivos que operan de manera autónoma, reduciendo la intervención humana y permitiendo mitigar los tiempos sin supervisión directa. De esta manera, se mejora el seguimiento de parámetros ambientales, se optimizan los recursos disponibles y se fortalecen las propuestas de protección del medio ambiente mediante información oportuna, confiable y poco manual. (Ray, 2018).

Desde la ingeniería en telecomunicaciones, este proyecto representa una oportunidad para aplicar conocimientos en redes, protocolos de comunicación, transmisión de datos y arquitecturas IoT orientadas a la sostenibilidad. Asimismo, la implementación de metodologías de desarrollo tecnológico permite estructurar soluciones más eficientes, escalables y adaptables a distintos entornos, garantizando un mejor desempeño del sistema propuesto (Avison &

Fitzgerald, s.f.). En consecuencia, la propuesta no solo genera un aporte académico y conceptual, sino que también establece una base para futuros desarrollos por parte de entidades públicas y privadas, promoviendo una gestión inteligente, continua y responsable de los recursos hídricos.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un prototipo electrónico para el monitoreo de parámetros fisicoquímicos en cuerpos de agua, basado en el índice NSF-WQI, con el fin de sistematizar la evaluación de la calidad.

Objetivos específicos

1. Investigar y seleccionar los parámetros fisicoquímicos del índice NSF-WQI aplicables a cuerpos de agua, fundamentando su elección en la normativa vigente y en los requerimientos técnicos de monitoreo ambiental.
2. Integrar el sistema electrónico de adquisición y procesamiento de datos, incorporando sensores específicos para entornos acuáticos y un módulo de comunicación móvil que permita el seguimiento remoto de las variables.
3. Validar el funcionamiento del prototipo mediante pruebas de campo en un entorno simulado, para verificar la fiabilidad en el cálculo del índice de calidad del agua.

Estado del arte

En la revisión de diferentes investigaciones, tesis y artículos relacionados con el monitoreo ambiental, se evidencia el uso de tecnologías de telemetría aplicadas al control y evaluación de la calidad del agua para el aporte de los ecosistemas; estas herramientas permiten obtener datos en tiempo real sobre variables para la optimización, gestión y preservación de los recursos hídricos. A partir de ello, se presentan a continuación diversos antecedentes que abordan el desarrollo e implementación de sistemas de telemetría en el contexto de la calidad del agua, con el propósito de analizar sus aportes y enfoques metodológicos.

Ramírez, Roca (2024), investigación realizada en Perú, titulada "***Diseño de un sistema Telemetría empleando el protocolo OPC UA para una planta de almacenamiento de agua potable"*** esta investigación tuvo como objetivo diseñar un sistema de monitoreo y control por telemetría basado en el protocolo OPC UA para un reservorio de agua, la propuesta se enfoca en la supervisión de variables críticas del proceso, como el nivel, flujo y presión del agua, mediante el uso de un Controlador Lógico Programable (PLC) y un sistema de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) que permitió visualizar y gestionar en tiempo real el estado de la planta, Se analizo los requisitos generales necesarios para el sistema de reservorio de agua con el propósito de implementar soluciones de telemetría basadas en (IoT) que permitan la incorporación de nuevos dispositivos y funciones sin necesidad de rediseñar la infraestructura completa.

De manera complementaria, Zambrano (2024) proyecto denominado ***"Modelo predictivo en telemetría mediante técnicas de aprendizaje automático para anticipar degradación del agua en acuicultura"*** este proyecto fue realizado en Ecuador y tuvo como Desarrollar un modelo predictivo basado en datos de un sistema de telemetría y aprendizaje automático con el

fin de detectar y prevenir alteraciones en la calidad del agua de sistemas acuícolas, este modelo permite la detección proactiva de condiciones que podrían conducir a la degradación del hábitat acuático, posibilitando la alerta temprana sobre posibles incidentes. La recolección de datos telemétricos es fundamental para demostrar la capacidad del modelo en prever la degradación del agua en entornos reales de acuicultura. Estos hallazgos no solo mejoran la gestión del agua en las granjas acuícolas para una operación más sostenible, sino que también abren nuevas oportunidades de investigación en el campo acuícola mediante la integración sinérgica de tecnologías de Internet de las cosas (IoT) y ciencia de datos.

Por otra parte, Alburquerque, García (2023), estudio denominado ***"Automatización del sistema primario de tratamiento de agua aplicando telemetría y lazo de control cerrado"*** este estudio hecho en ecuador tuvo como objetivo Automatizar el sistema primario de tratamiento de agua aplicando monitoreo a través de telemetría, mediante conexión remota de los PLC a una workstation, envío de datos a Node-RED, InfluxDB y Grafana, e implementar un lazo de control cerrado en la entrada del sistema primario (caudalímetro, estación de bombeo, filtro rotatorio y tanque de igualación) para evitar desviaciones en los indicadores de la planta, en vista de haber realizado diversos muestreos de datos en la entrada de la BTS se determina que para obtener datos por una anomalía presentada en el proceso no es suficiente para tener un buen análisis. Es decir, es preferible realizar pruebas para registrar el comportamiento de la planta ante esos escenarios.

En la misma línea, Osorio (2023), análisis denominado ***"Sistema de telemetría para adquisición y transmisión de variables ambientales"*** este análisis se realizó en Colombia y tuvo como objetivo diseñar un sistema de telemetría que utilice un globo meteorológico para la adquisición, monitoreo, almacenamiento y visualización de variables ambientales según el

estándar, con el desarrollo de este trabajo se espera sentar las bases para un sistema de evaluación atmosférico con el cual se puedan adquirir datos referentes a la contaminación y de este modo realizar el seguimiento a estas condiciones para determinar acciones a tomar con el fin de seguir los objetivos de desarrollo sostenible, se logró construir un prototipo capaz de realizar las mediciones, se implementó el sistema necesario para recibir la información transmitida y monitorearla en tiempo real mediante un display, el sistema de telemetría aquí desarrollado es un sistema funcional que no está ligado a una aplicación específica y que su implementación se puede dar en muchas aplicaciones fuera de las mediciones meteorológicas.

En un contexto más amplio, Gonzáles (2023) estudio titulado ***"Sistemas de monitoreo de aguas: análisis y propuestas para la red nacional"*** este estudio fue hecho en Chile y tuvo como objetivo analizar los sensores disponibles en el mercado, el estado actual del monitoreo de agua nacional y evaluar la posible implementación de nuevos sensores de monitoreo continúo considerando ventajas e inconvenientes de las soluciones disponibles, una red de monitoreo continuo de calidad de aguas permite una respuesta temprana ante la ocurrencia de eventos, generando alertas inmediatas a medida que ocurre un cambio, lo cual disminuye el tiempo de respuesta y toma de decisiones por las entidades correspondientes; en conclusión, se considera que una opción viable sería disponer de una red de monitoreo establecida en varios niveles de confianza en la generación de datos mezclando las opciones comerciales con las de bajo costo en la medida de lo posible.

Como complemento a lo anterior, Andrews (2024), investigación titulada "***Desarrollo de un sistema para determinar la calidad del agua para ser implementado en el proyecto Paramundos a partir de la implementación de sensores de bajo costo"*** esta investigación fue elaborada en Colombia y tuvo como objetivo Desarrollar un sistema para determinar la calidad

del agua para ser implementados en el proyecto Paramundos a partir de la implementación de sensores de bajo costo, se describió el diseño, desarrollo y evaluación de un sistema de monitoreo en tiempo real para medir la conductividad del agua en los páramos colombianos, para la transmisión de los datos recolectados, se utilizó el módulo SIM800L junto con la plataforma Thingspeak, lo que permitió enviar la información en tiempo real a servidores para su monitoreo y análisis. Los resultados obtenidos evidenciaron la efectividad del diseño y su potencial aplicación para la conservación y gestión de recursos hídricos.

Complementando Fuentes Amín y Romero Torres (2023), investigación titulada *"**Diseño de un sistema de monitoreo de calidad de agua basado en IoT, aplicado a unidades de producción acuícola**,"* realizada en Colombia, tuvo como objetivo general diseñar un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua mediante sensores de bajo costo integrados a plataformas IoT. El proyecto se desarrolló en unidades piscícolas donde se aplicaron tecnologías de medición de pH, oxígeno disuelto y temperatura, logrando automatizar la recolección de datos para fortalecer la toma de decisiones en tiempo real. Concluyendo que la implementación de herramientas IoT optimiza la eficiencia en la gestión hídrica y contribuye a la sostenibilidad de los sistemas acuícolas del país.

Por su parte, Herrera Cuevas (2025), en la investigación titulada *"**Sistema de monitoreo en tiempo real del consumo de agua en entornos residenciales (IoT)**,"* realizada en México, tuvo como objetivo general implementar un sistema económico y escalable que permitiera medir y visualizar el consumo doméstico de agua mediante sensores conectados a una red inalámbrica. El estudio evidenció que la integración de dispositivos IoT con plataformas en la nube permite un seguimiento constante del gasto hídrico y fomenta prácticas responsables de consumo en los hogares, fortaleciendo la sostenibilidad desde el ámbito residencial.

Así mismo, Bernal Suárez, Rodríguez y Méndez (2024), en su investigación titulada *"**Sistema automatizado soportado en IoT para monitoreo de parámetros de calidad del agua**,"* desarrollada en Colombia, propusieron un modelo de medición automatizado para el control en tiempo real de variables como pH, temperatura y oxígeno disuelto. La investigación demostró que el uso de plataformas digitales y sensores IoT garantiza registros precisos, calidad y veracidad en los datos, asi logrando mejora en las estrategias de control y monitoreo ambiental en fuentes hídricas naturales y artificiales.

En una línea similar, Lechuga Sierra, Navarro y Peña (2023), en la investigación *"**Sistema de monitoreo para cuerpos de agua en la ciudad de Cartagena basado en Internet de las Cosas**,"* realizada en Colombia, desarrollaron una red de sensores inalámbricos para la vigilancia ambiental de cuerpos de agua urbanos. Su trabajo permitió evidenciar que la tecnología IoT con un monitoreo establecido posibilita la obtención de información en tiempo real sobre la calidad del agua, contribuyendo a la detección temprana de contaminantes y a una gestión más eficiente de los ecosistemas urbanos, en un ambiente controlado.

Por otro lado, el Instituto Nacional de Salud (2022), en su estudio *"**Informe nacional de calidad del agua para consumo humano – INCA 2022**,"* desarrollado en Colombia, evaluó el cumplimiento de los estándares nacionales de calidad del agua potable. El informe destacó avances en la cobertura de monitoreo en el control de parámetros establecidos de salubridad en los cuerpos de agua y fuentes hídricas, aunque también identificó la necesidad de fortalecer los sistemas de vigilancia en regiones rurales para garantizar el acceso a agua segura, eficiente y de calidad en el uso diario.

En el ámbito urbano, Manfrini (2025), en su investigación *"**Gestión inteligente del agua en Bogotá: monitoreo y optimización hídrica**,"* realizada en Colombia, propuso un modelo

integral de gestión que combina sensores IoT, inteligencia artificial y almacenamiento en la nube. Su estudio evidenció que la convergencia de estas tecnologías permite anticipar patrones de consumo, optimizar la distribución del recurso y reducir pérdidas significativas del recurso natural, consolidando la idea de una ciudad inteligente para conservación y prevención en la calidad del agua a través del tiempo.

Por su parte, Ángeles Pato (2024), en la investigación *"**Implementación de un sistema de telemetría basado en IoT para monitoreo de niveles de agua en reservorios**,"* realizada en Perú, diseñó un sistema de sensores ultrasónicos conectados a plataformas IoT para medir el nivel y la temperatura del agua. El desarrollo se enfocó en zonas rurales con limitaciones tecnológicas establecidas por el proyecto, demostrando que los sistemas en telemetría pueden adaptarse a contextos de baja infraestructura sin perder precisión ni confiabilidad, logrando identificar parámetros de calidad de agua como reserva natural.

De manera institucional, el Ministerio de Ambiente de Panamá (2025), con su estudio *"**Registros históricos de Índice de Calidad de Agua (2002–2023)**,"* Realizada en Panamá, analizó la evolución del índice de calidad del agua en distintas cuencas hidrográficas del país. Este trabajo reveló mejoras progresivas derivadas de políticas ambientales a nivel nacional, aunque también señaló la persistencia de retos en zonas de alta presión industrial y agrícola, especialmente en zonas urbanas, donde la contaminación sigue representando un riesgo considerable, en los cuerpos de agua y como se puede llegar a prevenir la pérdida del recurso ambiental.

Asimismo, González-Orozco (2023), en la investigación *"**Sistema de monitorización IoT para la producción de agua potable y variables climáticas**,"* realizada en Costa Rica, propuso un modelo IoT que supervisa simultáneamente la producción de agua potable y las

condiciones meteorológicas. Los resultados demostraron que la integración de datos ambientales mediante tecnologías IoT y telemetría, aporta en la operación de mejora de eficiencia en los procesos de potabilización y calidad del recurso natural. Permitiendo una respuesta más rápida frente a variaciones climáticas, sobre cuerpos de agua.

Finalmente, Álvarez y Pérez (2024), en el estudio *"**Desarrollo de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de la calidad del agua en lagos urbanos de la Ciudad de México",*** desarrollado en México, implementado en una red de sensores WSN conectados a plataformas IoT para medir parámetros de calidad como pH, turbidez y oxígeno disuelto. Este proyecto demostró que las tecnologías de bajo costo pueden ofrecer medición sobre parámetros en el monitoreo de forma confiable y escalable, promoviendo la transparencia y eficiencia en la gestión ambiental de recursos hídricos en zonas urbanas.

Los antecedentes revisados evidencian el creciente interés por aplicar tecnologías inteligentes en la supervisión y gestión del recurso hídrico. Se concluye que la integración de IoT, telemetría e inteligencia artificial ha permitido avances significativos en la optimización de procesos de monitoreo y la detección temprana de alteraciones en la calidad del agua. Estas investigaciones demuestran que el aprovechamiento tecnológico no solo impulsa la sostenibilidad ambiental, sino que también fomenta la creación de sistemas más accesibles, precisos en distintos contextos geográficos. En consecuencia, la evolución de estas soluciones constituye una base sólida para el desarrollo de nuevos modelos de telemetría aplicados a la gestión integral del agua.

Marco teórico

Se establecerán las bases conceptuales que sustentan el desarrollo del proyecto, donde se abordan fundamentos que respaldan el diseño del prototipo para el monitoreo de la calidad del agua.

Monitoreo ambiental

El monitoreo ambiental es el grupo de acciones o actividades que permiten obtener información válida, comprobable y periódica a través del tiempo sobre el estado de los recursos naturales, con el fin de orientar la gestión ambiental y la toma de decisiones que contribuyan a las buenas prácticas para el desarrollo sostenible.

La importancia de este proceso genera relevancia sobre la gestión sostenible del entorno, ya que permite detectar cambios ocasionados en los recursos naturales, cómo también los factores externos provocados por terceros, con ello se genera la recopilación de información para el análisis de datos en un tiempo periódico definido para evaluar la tendencia y establecer las medidas preventivas ante los impactos reflejados, con el fin de evitar la degradación del ecosistema o la extensión del mismo (Mouthon Bello, Blanco B., Acevedo M., & Miller M., 2002).

Dentro del monitoreo ambiental tenemos el monitoreo del agua que se especializa en la observación de las condiciones físicas, químicas y bilógicas de los recursos hídricos, con el fin de evaluar y determinar su calidad y posibles procesos de contaminación por terceros, este seguimiento incluye la medición en variables como el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto y la presencia de nutrientes o metales pesados, para así definir el estado del cuerpo de agua y su posible uso o cuidado a tener en cuenta sobre el recurso natural.

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha definido las directrices técnicas para la recolección, análisis y revisión de la calidad de la data, relacionado con la calidad del agua en términos superficiales o subterráneos, estos criterios buscan unificar la medición a nivel nacional, para así garantizar la confiabilidad y veracidad de los resultados en la gestión del monitoreo en fuentes hídricas. (IDEAM & INVEMAR, 2021)

También encontramos en el monitoreo ambiental, el monitoreo del aire se enfoca en la medición continua en un tiempo acordado sobre factores de contaminación atmosférica como lo son, materiales particulados, óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre(SO_2), monóxido de carbono (CO), entre otros, con estos indicadores se logra evaluar los niveles de contaminación en zonas de población urbana o rural, para medir y establecer alertas de salud pública.

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se ha dado la tarea de realizar seguimiento del comportamiento de los principales contaminantes en distintas regiones del país, gracias a esto se realiza formulación de políticas y control de emisiones para la mejora en la calidad ambiental (IDEAM & Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2022).

Asimismo, en el monitoreo ambiental se incluye el monitoreo del suelo que identifica bajo la observación y evaluación periódica, la regulación de las propiedades físicas, químicas y biológicas, con el fin de determinar su calidad y alertar su nivel de degradación para el potencial productivo, los factores con mayor relevancia en este monitoreo son:

- La erosión
- La salinización
- La estructura del suelo

- El contenido de materia orgánica y su capacidad de retener sustancias o agua

Este seguimiento permite anticipar riesgos para los ecosistemas terrestres, para definir restauración o conservación del suelo.

En Colombia, bajo la política de gestión sostenible del suelo elaborada por el Ministerio de Ambiente, se proporcionan los protocolos y metodologías para el monitoreo de la calidad del suelo a nivel nacional, con el fin de fortalecer las buenas prácticas y criterios a tener en cuenta para su estudio (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

Tras abordar los principales tipos de monitoreo ambiental, se procede a centrar en uno de los componentes más sensibles y determinantes en la sostenibilidad de los recursos naturales, el monitoreo de agua, el cual es la base del proyecto a realizar.

En Colombia el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH), establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, busca enfocar la generación de conocimiento e información sobre los procesos naturales en el ciclo del agua, permitiendo evaluar su calidad e impactos, de forma natural como derivados por terceros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2025).

Esto ha permitido generar estudios e implementaciones con el uso de la herramienta de sistemas de telemetría en Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ha identificado que el uso de estos sistemas contribuye a la mejora de la calidad del recurso hídrico y genera un seguimiento más detallado del cumplimiento de estándares establecidos a nivel nacional (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2018).

Sostenibilidad hídrica

La sostenibilidad hídrica hace alusión al manejo eficiente del agua, así como a la conservación de su calidad. Este concepto se basa en garantizar el recurso natural y el acceso equitativo, para las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de uso del agua en un futuro, con el fin de promover la protección de los ecosistemas hídricos y la cobertura de las necesidades humanas (Díaz Embus & Medina Valencia, 2025).

De acuerdo con la política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), aplicada en Colombia, la sostenibilidad hídrica implica la gestión administrativa e integral del recurso natural, en ámbitos sociales, económicos y ambientales, bajo un orden territorial establecido por un cuerpo de estado.

Según lo establecido por la Ley 99 de 1993 y el Decreto-Ley 216 de 2003, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT, como coordinador del Sistema Nacional Ambiental, de manera específica en temas hídricos, le corresponde al MAVDT1, regular las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente (Ministerio de Ambiente, 2010).

La importancia de la sostenibilidad hídrica implica la prevención del equilibrio ambiental y el bienestar humano. A nivel global, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), resalta la importancia del agua como recurso vital para el desarrollo sostenible, por su gran impacto en el área de salud, producción y sostenimiento de recursos de primer uso.

La ONU afirma que la gestión sostenible del agua es clave para enfrentar desafíos climáticos y sociales como lo puede ser la resiliencia en comunidades o pobreza, esto no se limita únicamente al acceso de agua potable, sino a su protección como recurso natural, la

eficiencia y gestión de nuevas tecnologías para asegurar la disponibilidad de este recurso en un futuro (Naciones Unidas, 2015)

En Colombia el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), señala que el país presenta grandes desafíos sobre las fuentes hídricas debido al crecimiento poblacional, la expansión del trabajo agrícola y los efectos de cambios climáticos a nivel global, por ello promueve una gestión basada en conocimiento técnico y científico del recurso natural, apoyada en sistemas de monitoreo y en la toma de decisiones sustentadas en información confiable y certificable a nivel nacional (Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial, 2021).

La sostenibilidad hídrica requiere información constante y que contribuya a avances continuos sobre la calidad y cantidad del recurso natural, así la telemetría se posiciona como una herramienta estratégica para el monitoreo de forma remota y autónoma del agua. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha realizado proyectos y estudios con esta herramienta, permitiendo reducir errores humanos, mejorando la frecuencia de muestreos y alertas oportunas sobre desviaciones o anomalías en los parámetros de calidad establecidos, este enfoque tecnológico soporta el cumplimiento de estándares ambientales y la intervención proactiva en la gestión sostenible del agua a través del tiempo.

En Colombia tanto el IDEAM como otras entidades ambientales de carácter privado, han realizado implementaciones de sistemas de telemetría y monitoreo hidrológico, los cuales permiten optimizar los procesos de recolección de datos. Estas iniciativas fortalecen el conocimiento técnico y la trazabilidad en la conservación de ecosistemas ante posibles riesgos y alteraciones, consolidando la telemetría como una herramienta clave para la sostenibilidad hídrica en el país (IDEAM, INVEMAR & Fundación Natura Colombia, 2021).

La gestión y el estudio de fuentes hídricas en Colombia se encuentran asociadas bajo normativas y políticas ambientales, que buscan garantizar el uso sostenible del agua y fomentar la implementación de tecnologías modernas para su cuidado como lo es la telemetría. Estas regulaciones establecen los lineamientos a tener en cuenta de forma técnica, administrativa y de control para el cuidado y uso correcto del recurso natural, promoviendo a nivel nacional la generación de datos confiables y verídicos.

Telemetría

La telemetría se ha consolidado como una de las herramientas tecnológicas más relevantes en los procesos de supervisión, control y monitoreo remoto de variables físicas y ambientales. En términos generales, el concepto hace referencia a la medición y transmisión de datos desde un punto determinado hacia una estación receptora o centro de control, a través de medios cableados o inalámbricos (IDEAM, 2018). Este sistema posibilita la observación continua de fenómenos naturales o industriales, permitiendo recopilar información confiable para el análisis y la toma de decisiones en tiempo real.

Históricamente, la telemetría surgió en el ámbito aeroespacial y militar a mediados del siglo XX, como una técnica destinada a registrar información de instrumentos instalados en zonas de difícil acceso o en vehículos a gran distancia (González & Orozco, 2023). Con el paso del tiempo, su implementación trascendió al campo civil y científico, abarcando sectores como la meteorología, la medicina, la agricultura y la gestión ambiental. Hoy en día, su uso resulta esencial en sistemas automatizados que requieren precisión y continuidad en la recopilación de datos, especialmente en los procesos relacionados con el control de recursos naturales y el monitoreo ambiental.

Desde una perspectiva técnica, la telemetría se fundamenta en tres componentes principales: los sensores, el sistema de transmisión y la unidad receptora. Los sensores se encargan de captar variables físicas o químicas —como temperatura, presión, pH o conductividad— y convertirlas en señales eléctricas interpretables. Posteriormente, el sistema de transmisión envía los datos mediante tecnologías como radiofrecuencia, GSM, LoRa, Wi-Fi o satélite, dependiendo de la distancia, el terreno y los recursos disponibles. Finalmente, la unidad receptora almacena o procesa la información, generando reportes o alertas que facilitan la gestión del sistema monitoreado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

En el contexto ambiental, la telemetría ha adquirido una importancia significativa por su capacidad para ofrecer datos continuos, precisos y de fácil acceso. Gracias a esta tecnología, las instituciones encargadas de la gestión del agua, el aire y el suelo pueden realizar un seguimiento en tiempo real de las condiciones ambientales, detectar anomalías y responder oportunamente ante posibles situaciones de riesgo. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2022), los sistemas de telemetría han permitido fortalecer los procesos de vigilancia hidrometeorológica en Colombia, garantizando una mayor frecuencia en los registros y una disminución de los errores asociados al muestreo manual.

De igual forma, el uso de la telemetría en la gestión del recurso hídrico ha permitido el desarrollo de modelos de monitoreo continuo de la calidad del agua en ríos, embalses y humedales. Estos modelos integran sensores de bajo costo y microcontroladores programables que recogen información sobre parámetros esenciales como pH, oxígeno disuelto, turbidez y temperatura, los cuales son transmitidos a servidores o plataformas en la nube para su posterior análisis (Fuentes & Romero, 2023). Con ello, las entidades ambientales y académicas logran

establecer patrones de comportamiento del recurso, identificar posibles fuentes de contaminación y generar estrategias de conservación más eficientes.

En América Latina, el avance de la telemetría se ha vinculado estrechamente con el desarrollo de la ingeniería en telecomunicaciones y de las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). Países como Ecuador, Perú, México y Colombia han implementado proyectos orientados a optimizar el manejo de datos ambientales mediante redes de sensores interconectados. Por ejemplo, investigaciones como la de (Vásquez, 2024) sobre la "Pasarela IoT – LoRa para la medición remota de consumo doméstico de agua potable" demuestran que la integración de la telemetría con redes de baja potencia y largo alcance facilita la supervisión eficiente de los recursos hídricos, incluso en zonas rurales con infraestructura limitada.

En el caso colombiano, los esfuerzos institucionales han estado encabezados por el IDEAM, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y algunas corporaciones autónomas regionales, las cuales han implementado estaciones automáticas de monitoreo hidrológico y meteorológico equipadas con sistemas de telemetría (IDEAM & INVEMAR, 2021). Estas estaciones registran datos sobre niveles de agua, caudal, precipitación, temperatura y calidad, que son transmitidos periódicamente a los centros de control en Bogotá y otras ciudades. Dichos sistemas han permitido mejorar la gestión del riesgo, fortalecer los programas de conservación de ecosistemas acuáticos y generar información útil para la planificación territorial y ambiental.

Cabe resaltar que el impacto de la telemetría no se limita únicamente a la recolección de datos, sino también al fortalecimiento del conocimiento científico y técnico. Al automatizar procesos que antes dependían de mediciones manuales, la telemetría permite una gestión más eficiente del tiempo y los recursos, además de proporcionar registros más precisos y continuos.

Esto resulta especialmente relevante en el monitoreo de humedales, donde las condiciones del entorno pueden variar drásticamente en cortos periodos de tiempo (Ramírez & Roca, 2024).

A nivel académico, múltiples investigaciones han resaltado la utilidad de los sistemas telemétricos como herramientas para el desarrollo sostenible y la preservación ambiental. Según (Bernal, Rodríguez & Méndez, 2024), la aplicación de telemetría en la medición automatizada de parámetros de calidad del agua permite fortalecer las políticas públicas de control ambiental y generar una cultura de gestión responsable del recurso hídrico. En esta misma línea, el Ministerio de Ambiente (2025) ha señalado que la implementación de estas tecnologías constituye un paso esencial hacia la construcción de sistemas inteligentes de monitoreo que apoyen la sostenibilidad hídrica y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la ONU (Naciones Unidas, 2015).

En síntesis, la telemetría representa un componente clave en la evolución de la ingeniería moderna aplicada al medio ambiente. Su capacidad para medir, transmitir y analizar información de forma continua la convierte en una herramienta indispensable para la gestión y preservación de los recursos naturales. En el marco del presente proyecto, su aplicación al monitoreo de la calidad del agua, permitirá demostrar cómo la ingeniería en telecomunicaciones puede aportar soluciones viables, sostenibles y escalables a los retos ambientales del país.

Internet de las cosas (IoT)

El Internet de las Cosas, conocido por sus siglas en inglés IoT (Internet of Things), representa una de las transformaciones tecnológicas más importantes de las últimas décadas. Este concepto hace referencia a la conexión de dispositivos físicos a redes digitales para el intercambio automático de datos, permitiendo que objetos cotidianos, sensores o máquinas interactúen entre sí sin necesidad de intervención humana directa (ONU, 2021). En este sentido,

el IoT ha permitido pasar de sistemas aislados a entornos inteligentes e interconectados capaces de recopilar, procesar y analizar información en tiempo real.

El funcionamiento del IoT se basa en una arquitectura compuesta principalmente por sensores, módulos de comunicación, plataformas de procesamiento de datos y aplicaciones de visualización. Los sensores se encargan de capturar variables del entorno —como temperatura, humedad, presión o niveles de pH— y transmitirlas mediante tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, Bluetooth, LoRa o NB-IoT hacia una plataforma de gestión (Gómez & Hernández, 2023). En dicha plataforma, los datos son almacenados, procesados y representados gráficamente para facilitar la toma de decisiones y el control remoto de los sistemas monitoreados.

En la actualidad, esta tecnología tiene aplicaciones en múltiples sectores, como la industria, la salud, el transporte y, de forma creciente, el medio ambiente. En este último campo, el IoT se ha convertido en una herramienta clave para el monitoreo de variables ambientales, ya que permite obtener información constante sobre parámetros físicos y químicos con una precisión que antes solo era posible mediante métodos manuales o laboratorios especializados (IDEAM, 2022). Así, los sistemas de IoT aplicados al monitoreo ambiental promueven una gestión más eficiente, sostenible y automatizada de los recursos naturales.

De igual forma, la incorporación del IoT en el monitoreo hídrico ha permitido el desarrollo de redes inteligentes que contribuyen al cuidado del recurso agua. Por ejemplo, en Colombia, universidades e instituciones ambientales han implementado proyectos piloto en los que sensores conectados a plataformas en la nube registran datos sobre pH, oxígeno disuelto y turbidez en humedales o ríos, con el fin de detectar alteraciones en tiempo real y generar alertas tempranas (Fuentes & Romero, 2023). Este tipo de soluciones son especialmente útiles en zonas

donde la infraestructura de monitoreo tradicional es limitada, ya que el IoT reduce costos y amplía la cobertura de vigilancia ambiental.

Uno de los aspectos más valiosos del IoT es su capacidad para integrarse con otras tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA), el machine learning y la telemetría. La combinación de estas herramientas ha permitido el desarrollo de sistemas predictivos capaces de anticipar cambios en la calidad del agua o el estado de los ecosistemas. De acuerdo con estudios realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2021), esta integración tecnológica facilita la automatización de alertas y el almacenamiento de grandes volúmenes de información, permitiendo construir bases de datos sólidas para la investigación científica y la toma de decisiones.

Por otro lado, el uso del IoT no solo representa un avance técnico, sino también un aporte significativo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el número 6: "Agua limpia y saneamiento" (Naciones Unidas, 2015). Gracias al monitoreo continuo que posibilita esta tecnología, las entidades pueden adoptar medidas preventivas ante situaciones de riesgo y establecer estrategias para la preservación del recurso hídrico. Asimismo, el acceso a datos precisos y actualizados fomenta la transparencia y la participación ciudadana en la gestión ambiental, contribuyendo al fortalecimiento de la gobernanza del agua en contextos locales.

Desde la perspectiva de la ingeniería en telecomunicaciones, el IoT también constituye un campo de desarrollo e innovación. Los profesionales del área pueden diseñar e implementar soluciones adaptadas a las condiciones geográficas, climáticas y sociales de Colombia, promoviendo la creación de sistemas más accesibles y sostenibles. En proyectos con el uso de IoT no solo permitirá recolectar datos sobre la calidad del agua, sino también establecer un

modelo escalable que pueda replicarse en otros ecosistemas del país, fortaleciendo así la gestión integral de los recursos naturales.

En síntesis, el Internet de las Cosas se presenta como una tecnología transversal que impulsa la transformación digital en todos los ámbitos, incluyendo el ambiental. Su integración con la telemetría potencia la eficiencia y confiabilidad en los procesos de monitoreo, facilitando una gestión más dinámica, inteligente y sostenible del recurso hídrico. Por consiguiente, el desarrollo del prototipo permitirá consolidar una solución tecnológica con impacto ambiental y social, orientada a la conservación y mejora de la calidad del agua.

Calidad del agua

La calidad del agua constituye uno de los principales indicadores del estado ambiental y del bienestar de una comunidad. Este concepto se refiere al conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas que determinan la idoneidad del recurso hídrico para distintos usos, ya sean domésticos, agrícolas, industriales o recreativos (IDEAM, 2022). Evaluar la calidad del agua no solo permite conocer su grado de pureza, sino también identificar posibles fuentes de contaminación que puedan afectar la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas.

En términos generales, los parámetros más comunes empleados para medir la calidad del agua incluyen el pH, la turbidez, la temperatura, el oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica y la presencia de metales pesados o compuestos orgánicos. Cada uno de estos indicadores cumple una función específica dentro del análisis del recurso. Por ejemplo, el pH mide el grado de acidez o alcalinidad, mientras que el oxígeno disuelto determina la capacidad del agua para sostener la vida acuática (OMS, 2023). De igual manera, la turbidez refleja la cantidad de partículas suspendidas, y la conductividad eléctrica se asocia con la concentración de sales y minerales disueltos.

En Colombia, la vigilancia de la calidad del agua se encuentra regulada por diferentes normativas que buscan garantizar el acceso a un recurso seguro y apto para el consumo humano. La Resolución 2115 de 2007, emitida por el Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, define los criterios sanitarios y los valores máximos permitidos para los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua potable. Asimismo, el Decreto 1575 de 2007 establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano, el cual define los lineamientos para la supervisión y el manejo del recurso en todo el territorio nacional (Ministerio de Ambiente, 2007). Estas disposiciones constituyen la base legal que orienta las actividades de monitoreo realizadas por las entidades públicas y privadas.

Por otra parte, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) realiza periódicamente estudios sobre la calidad del agua en las principales cuencas del país. Según su Informe Nacional del Recurso Hídrico (IDEAM, 2021), los cuerpos de agua más afectados por la contaminación son aquellos ubicados en zonas urbanas e industriales, donde la presencia de residuos domésticos, vertimientos no tratados y actividades agrícolas intensivas ha generado un deterioro progresivo de los ecosistemas acuáticos. Estos resultados evidencian la necesidad de implementar herramientas tecnológicas que permitan fortalecer el control y seguimiento del recurso hídrico de manera continua.

En este contexto, la aplicación de tecnologías de monitoreo automatizado, como la telemetría y el Internet de las Cosas (IoT), ha surgido como una alternativa eficiente para la gestión de la calidad del agua. Dichas herramientas posibilitan la obtención de datos en tiempo real, la reducción de errores humanos y la creación de sistemas de alerta temprana ante variaciones significativas en los parámetros de calidad. Según un estudio desarrollado por Bernal, Rodríguez y Méndez (2024), el uso de sensores de bajo costo integrados a plataformas

digitales mejora notablemente la precisión de las mediciones y facilita la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales.

A nivel internacional, organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU) han destacado la importancia del agua como recurso vital para el desarrollo sostenible. La ONU, a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promueve el acceso universal al agua limpia y segura, mientras que la OMS establece los estándares de calidad y salubridad que deben cumplir los países en la gestión del recurso (ONU, 2015). Estas directrices refuerzan la necesidad de aplicar políticas y tecnologías que garanticen la sostenibilidad hídrica y la preservación de los ecosistemas acuáticos.

En Colombia, los estudios realizados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021) subrayan la relación directa entre la calidad del agua y el bienestar social. Las comunidades que dependen de fuentes contaminadas enfrentan mayores riesgos de enfermedades hídricas, pérdida de biodiversidad y afectaciones en sus actividades económicas. Por consiguiente, la protección del recurso hídrico debe abordarse desde un enfoque integral que combine aspectos técnicos, sociales y ambientales.

De igual manera, la calidad del agua no se limita únicamente a su potabilidad, sino que también incluye la capacidad de los cuerpos de agua para mantener sus funciones ecológicas. Los humedales, por ejemplo, actúan como filtros naturales que retienen sedimentos, regulan el flujo de agua y sirven como hábitat para diversas especies. Sin embargo, su degradación por contaminación o por el cambio de uso del suelo compromete su papel en la regulación ambiental. Por ello, proyectos de investigación en desarrollo y gestión de cuerpos de agua contribuyen al fortalecimiento de las estrategias de conservación y al monitoreo continuo del recurso, aportando información valiosa para la gestión sostenible.

En síntesis, la calidad del agua representa un factor determinante en la sostenibilidad ambiental y en la salud pública. La incorporación de tecnologías modernas en su evaluación, junto con el cumplimiento de las normas vigentes, constituye una vía efectiva para asegurar la preservación del recurso. En este sentido, el diseño de un sistema orientado al monitoreo del agua, no solo responde a una necesidad tecnológica, sino también a un compromiso con la sostenibilidad y la gestión responsable del entorno natural.

Marco conceptual

Para el desarrollo del presente proyecto, es necesario partir de una serie de conceptos que permiten entender cómo se relaciona la tecnología con el monitoreo del recurso hídrico en la actualidad. Más que verlos como definiciones separadas, la idea es comprender cómo todos estos elementos se conectan entre sí dentro de un mismo sistema. De alguna manera, esto ayuda a tener una visión más clara tanto del problema como de la solución que se plantea. Por eso, se abordan temas como el monitoreo ambiental, la sostenibilidad hídrica, la telemetría, el Internet de las Cosas (IoT) y la calidad del agua, ya que todos están directamente relacionados.

En primer lugar, el monitoreo ambiental puede entenderse como el proceso mediante el cual se recolecta información del entorno para evaluar el estado de los recursos naturales. Sin embargo, no se trata únicamente de medir datos de forma aislada, sino de analizarlos con el paso del tiempo para identificar cambios o posibles afectaciones. Es decir, más allá del dato puntual, lo importante es lo que ese dato representa. En este sentido, el monitoreo permite generar información útil que sirve como base para la toma de decisiones orientadas al cuidado del ambiente (IDEAM, 2024).

Ahora bien, cuando este monitoreo se enfoca específicamente en el agua, su importancia aumenta bastante, ya que se trata de un recurso esencial para la vida. Cualquier cambio en sus características puede afectar tanto a las personas como a los ecosistemas que dependen de ella. Por esta razón, se analizan parámetros como el pH, la turbidez, la temperatura y el oxígeno disuelto, que permiten tener una idea clara del estado del agua. Según el IDEAM (2023), fortalecer estos procesos es clave para mejorar la gestión del recurso hídrico en el país.

A partir de lo anterior, toma sentido hablar de sostenibilidad hídrica, que básicamente se refiere al uso responsable del agua en el presente sin afectar su disponibilidad en el futuro.

Aunque suene como un concepto general, en la práctica implica varios desafíos, sobre todo en contextos como el colombiano. Factores como la contaminación, el crecimiento poblacional y el cambio climático influyen directamente en la disponibilidad del recurso. Por eso, se hace necesario pensar en estrategias que permitan conservarlo y gestionarlo de forma adecuada a largo plazo.

Además, hay algo importante que muchas veces se pasa por alto, y es que no se puede hablar de sostenibilidad sin contar con información confiable. Si no se sabe realmente en qué estado está el agua, es muy difícil tomar buenas decisiones. Por esta razón, hoy en día se insiste tanto en mejorar los sistemas de monitoreo. En esta línea, el uso de tecnologías ha demostrado ser fundamental para obtener datos más precisos y constantes, lo que facilita una mejor gestión del recurso hídrico (IDEAM, 2024).

En este punto entra la telemetría, que en términos simples permite medir variables en un lugar específico y enviar esa información a distancia. Dicho de otra forma, evita tener que estar físicamente en el sitio todo el tiempo para saber qué está pasando. Esto representa una ventaja importante, ya que permite acceder a datos en tiempo real y reaccionar más rápido ante cualquier cambio. Además, reduce errores asociados a mediciones manuales, lo que mejora la confiabilidad de la información.

Si se mira un poco más a fondo, la telemetría funciona a partir de tres elementos principales: los sensores, los sistemas de comunicación y las plataformas donde se procesan los datos. Los sensores captan la información, los sistemas la transmiten y, finalmente, las plataformas permiten visualizarla y analizarla. Lo interesante es que todo este proceso ocurre de forma automática, lo que hace más eficiente el monitoreo. En Colombia, este tipo de tecnologías

ha venido tomando fuerza en el ámbito ambiental, mejorando la calidad de los datos obtenidos (IDEAM, 2023).

La integración de la telemetría en el monitoreo ambiental permite que el índice NSF-WQI se transforme de un cálculo estático a una herramienta de diagnóstico en tiempo real. Al recibir flujos constantes de datos desde los sensores y sistemas de comunicación, la función de agregación ponderada puede procesar de manera automática las variaciones en los subíndices de cada parámetro fisicoquímico. Esta automatización, destacada por el IDEAM (2023), reduce significativamente el error humano en la fase de captura y transmisión, garantizando que el valor final del índice refleje con precisión las dinámicas hidrológicas del cuerpo de agua. De este modo, la plataforma de procesamiento no solo visualiza datos aislados, sino que entrega un valor unificado que permite a los gestores ambientales reaccionar ante cambios súbitos en la calidad del recurso, optimizando la capacidad de respuesta institucional frente a eventos de contaminación o vertimientos no autorizados en las cuencas urbanas.

Bajo este esquema tecnológico, el uso del WQI facilita la traducción de las señales captadas por los sistemas de telemetría en indicadores de cumplimiento normativo y metas de calidad. La fortaleza de este índice radica en su capacidad para estandarizar la heterogeneidad de los datos técnicos obtenidos en el ámbito ambiental colombiano, permitiendo comparaciones multitemporales robustas que son fundamentales para la formulación de estrategias de control (IDEAM, 2023). Al centralizar la información captada por la red de sensores en una única escala cualitativa, se eliminan las ambigüedades en la interpretación de los reportes, lo que agiliza la toma de decisiones en la planeación del recurso hídrico. En última instancia, la convergencia entre la eficiencia de la telemetría y la estructura matemática del WQI dota a las autoridades de

una base científica sólida para evaluar el impacto de las acciones de recuperación y asegurar la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos en el tiempo.

Por otro lado, el Internet de las Cosas, conocido como IoT, complementa muy bien el funcionamiento de la telemetría. Básicamente, se trata de conectar diferentes dispositivos para que puedan intercambiar información entre sí. En este caso, los sensores no solo envían datos, sino que también se integran con plataformas que los almacenan y analizan. Esto permite tener una visión más clara de lo que está ocurriendo en tiempo real y facilita la toma de decisiones.

Además, una de las ventajas más importantes del IoT es que no solo permite recolectar datos, sino también interpretarlos casi de inmediato. Incluso, en algunos casos, es posible generar alertas automáticas cuando los valores se salen de los rangos normales. Estudios recientes han demostrado que este tipo de sistemas mejora significativamente el monitoreo de variables como el pH, la temperatura o la turbidez, aportando a una mejor gestión de la calidad del agua (Fuentes Amín, Romero & Torres, 2024).

Finalmente, todos estos conceptos se relacionan directamente con la calidad del agua, que es el eje central del proyecto. Este concepto hace referencia a las características físicas, químicas y biológicas del agua, las cuales determinan si es apta o no para diferentes usos. Evaluar esta calidad permite identificar posibles problemas de contaminación y tomar medidas a tiempo. De hecho, el uso de índices de calidad del agua facilita entender de forma general el estado de un cuerpo hídrico (Ariza et al., 2023).

En el contexto colombiano, la calidad del agua está regulada por diferentes normativas que establecen los parámetros que debe cumplir para su uso. Estas regulaciones buscan garantizar condiciones adecuadas tanto para el consumo humano como para la conservación de

los ecosistemas. Además, entidades como el IDEAM realizan monitoreos constantes, lo que permite identificar problemáticas y plantear soluciones más efectivas.

Por último, es importante resaltar que el uso de tecnologías como la telemetría y el IoT ha cambiado bastante la forma en que se evalúa la calidad del agua. Antes, muchas mediciones se hacían de forma manual, lo que implicaba más tiempo y mayor posibilidad de error. Hoy en día, es posible obtener datos en tiempo real, lo que permite actuar de manera más rápida y eficiente. En este sentido, estas tecnologías se han convertido en herramientas clave para una gestión más adecuada del recurso hídrico.

En conclusión, los conceptos abordados convergen en un sistema interdependiente donde el monitoreo ambiental actúa como la fuente primaria de información y la sostenibilidad hídrica se establece como el propósito final del proceso. En este esquema, la telemetría y el Internet de las Cosas (IoT) operan como el soporte tecnológico esencial que garantiza la captura, transmisión y análisis de datos en tiempo real, reduciendo la incertidumbre y optimizando la capacidad de respuesta institucional. Finalmente, la evaluación de la calidad del agua a través del índice NSF-WQI permite validar el cumplimiento de los objetivos ambientales planteados, transformando señales técnicas en indicadores de gestión. De esta manera, el desarrollo del prototipo propuesto no surge como un elemento aislado, sino como una respuesta tecnológica integrada.

Marco legal

El humedal de Techo, ubicado en la localidad de Kennedy de la ciudad de Bogotá D.C., forma parte del sistema de humedales de carácter urbano del distrito capital y se encuentra protegido bajo diversas órdenes nacionales y distritales de carácter legal, esto para poder garantizar su conservación, manejo sostenible y uso responsable en investigación académica o autónoma.

En el ámbito nacional, la Ley 357 de 1997 incorpora el ordenamiento jurídico colombiano de la Convención Ramsar, tratado internacional que promueve la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos. Esta ley establece la obligación del Estado y de las entidades del territorio para proteger los ecosistemas de humedales como patrimonio natural y de biodiversidad.

De igual forma, el decreto 2811 de 1974 (Código nacional de recursos naturales renovables y de protección del medio ambiente) y la ley 99 de 1993 (Creación del Ministerio de Ambiente) establecen los principios de prevención, restauración y sostenibilidad ambiental, aplicables a cualquier actividad que implique intervención o muestreo dentro de los ecosistemas estratégicos.

Para fines de investigación, el decreto 1376 de 2013 regula los permisos de recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad bilógica con fines de investigación científica no comercial, los cuales deben ser tramitados y aprobados ante la autoridad ambiental competente , en este caso para el humedal Techo ubicado en Bogotá D.C , la autoridad encargada es la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA),encargada de aprobar permisos y supervisar las actividades de muestreo , instalación de equipos o dispositivos y cualquier otro tipo de intervención en los humedales distritales de la ciudad.

A nivel distrital , el acuerdo 327 de 2008 del consejo de Bogotá y por parte de la secretaria distrital del ambiente , declaran los humedales urbanos como reservas distritales de humedal (RDH) y definen los lineamientos para su administración, restauración y uso sostenible a través del tiempo .El humedal de Techo fue reconocido como reserva distrital de humedal y parque ecológico distrital, por lo que cualquier acción que implique manipulación del cuerpo de agua, muestreo del mismo o, en su defecto, instalación de equipos externos requiere autorización previa.

De igual forma, el plan de manejo ambiental (PMA) del humedal de Techo, elaborado por la entidad (SDA), incluye lineamientos específicos sobre las zonas de conservación estricta, las actividades permitidas y las mediciones de prevención de impactos durante la ejecución de proyectos científicos o académicos sobre validación de parámetros.

La resolución 2115 de 2007, expedida el 22 de junio de 2007 por el Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, integra una de las más importantes normativas para el control y vigilancia de la calidad del agua destinada al consumo humano en Colombia.

El principal propósito de esta resolución es crear criterios sanitarios, parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, mediante esto se garantiza que el agua cumpla estándares mínimos de potabilidad, para proteger la salud de la población (Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, 2007).

La Resolución 1207 de 2014, expedida el 25 de julio de 2014 y publicada el 13 de agosto del mismo año por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, tiene como objetivo promover la reutilización del agua tratada para disminuir la presión sobre las fuentes hídricas naturales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). En relación con otras

disposiciones sobre calidad del agua y su monitoreo, la Tabla 1 presenta un resumen de las principales normativas y su vínculo con el uso de telemetría.

Tabla 1

Normativas y uso en la calidad del agua con telemetría

Norma	Entidad responsable	Ámbito técnico o de regulación	Relación con telemetría y monitoreo del agua
Decreto 1575 de 2007	Ministerio de la Salud y Protección Social	Establece el sistema para el control y manejo de la calidad del agua en consumo humano	Define el marco obligatorio para realizar y gestionar el monitoreo con parámetros de calidad del agua, donde la telemetría puede llegar a realizar automatizaciones
Resolución 2115 de 2007	Ministerio de la Salud y Protección Social	Define las características de instrumentación, frecuencias de control y vigilancia del agua	Los sistemas con telemetría facilitan el cumplimiento de frecuencias admitidas, permitiendo supervisión de forma remota para la búsqueda de la calidad del agua
Resolución de 1207 de 2014	Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible	Regula los vertimientos sobre cuerpos de agua y alcantarillado público	Exige control y seguimiento de parámetros en áreas físicas, químicas u otros ámbitos necesarios, donde la telemetría puede tomar registros de estas mediciones sin novedad.

Nota. Adaptado de la Resolución 1207 de 2014, la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 de 2007, Ministerio de Salud y Protección Social (2007).

Finalmente, la normativa ambiental contempla sanciones administrativas de acuerdo con el decreto 1076 de 2015 y ley 1333 de 2009, para quienes realicen actividades sin el debido

permiso, incluyendo multas monetarias, exclusión de equipos e imposición de medida de restauración ecológica, en este marco normativo se busca contextualizar y entender los requisitos que se deben cumplir para poder realizar implementación del sistema de monitorio de la calidad del agua dentro del humedal Techo, cumpliendo criterios de sostenibilidad, legalidad y ética ambiental, promoviendo así la investigación científica responsable y la preservación de los recursos naturales.

Metodología

Para el desarrollo del proyecto se adopta el modelo V como metodología, que permite organizar de manera estructurada las fases de diseño, implementación y validación del sistema. Este modelo se caracteriza por establecer una relación directa entre cada etapa de desarrollo y su fase de verificación, garantizando así la calidad del producto final. En el lado izquierdo de la "V" se ubican las etapas de análisis y diseño, mientras que en el lado derecho se encuentran las fases de implementación, pruebas y validación.

Inicialmente, se definen los requisitos del sistema, donde se identifican las necesidades principales del proyecto, estableciendo como objetivo el diseño de un prototipo capaz de monitorear la calidad del agua en tiempo real. En esta fase se determinan los parámetros a medir, así como los requerimientos funcionales relacionados con la adquisición, procesamiento y transmisión de datos. Posteriormente, se lleva a cabo el diseño general del sistema, en el cual se define la arquitectura que integra los sensores, el microcontrolador ESP32 y los módulos de comunicación IoT, estableciendo el flujo de información desde la captura de datos hasta su visualización.

Seguidamente, se desarrolla el diseño detallado del sistema, donde se seleccionan los componentes electrónicos específicos y se definen las etapas de acondicionamiento de señal necesarias para el correcto funcionamiento de los sensores. En esta etapa también se establecen los algoritmos para el procesamiento de datos y el cálculo del índice de calidad del agua, además de realizar simulaciones y esquemas eléctricos que permiten validar el diseño antes de su implementación.

Una vez finalizada la etapa de diseño, se procede con la implementación del sistema, la cual incluye el montaje físico de los componentes en protoboard o placa de circuito impreso, así

como la programación del microcontrolador para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos. En esta fase se integran tanto el hardware como el software, permitiendo la operación conjunta del sistema.

Posteriormente, se llevan a cabo las pruebas unitarias, en las cuales se verifica el funcionamiento individual de cada componente, asegurando que los sensores, el microcontrolador y los módulos de comunicación operen correctamente. Luego, se realizan las pruebas de integración, donde se evalúa el comportamiento del sistema completo, verificando la correcta interacción entre los diferentes módulos y la transmisión adecuada de la información hacia la plataforma de monitoreo.

En las pruebas del sistema se analiza el funcionamiento global del prototipo en condiciones controladas, evaluando la precisión de las mediciones y el cálculo del índice de calidad del agua. Finalmente, en la fase de validación, se comparan los resultados obtenidos, con el fin de determinar el nivel del sistema. Para esta etapa se realizan ajustes y optimizaciones que permiten mejorar el desempeño y la confiabilidad del prototipo.

La población está constituida por fuentes de agua susceptibles de ser monitoreadas mediante sistemas electrónicos, mientras que la muestra se limita a pruebas experimentales realizadas en entornos controlados con diferentes condiciones del agua. Para la recolección de datos se emplea la técnica de medición directa mediante sensores electrónicos, los cuales permiten obtener información en tiempo real. Los datos recolectados son procesados mediante algoritmos implementados en el microcontrolador, permitiendo calcular el índice NSF-WQI y realizar un análisis que evalúe la eficiencia y precisión del sistema desarrollado. De esta manera, la aplicación del modelo en V garantiza un proceso ordenado y validado en cada una de sus

etapas, contribuyendo al desarrollo de un sistema confiable para el monitoreo de la calidad del agua.

Cronograma

Tabla 2

Cronograma por semana

Actividad	S1-4	S5-8	S9-12	S13-16	S17-20	S21-24	S25-28	S29-32	S33-36
Revisión bibliográfica	X	X							
Planteamiento del problema	X								
Formulación de objetivos		X							
Justificación del proyecto		X							
Desarrollo del marco teórico y referencial			X	X					
Definición de parámetros NSF-WQI			X	X					
Diseño general del sistema				X	X				
Selección de sensores y componentes electrónicos				X	X				
Diseño del sistema electrónico					X	X			
Simulación de circuitos					X	X			
Programación del sistema					X	X			
Integración del sistema (hardware + software)						X	X		
Implementación del prototipo físico						X	X		
Pruebas experimentales (entorno simulado)						X	X		
Validación del sistema							X	X	
Análisis de resultados							X	X	
Ajustes y optimización del prototipo							X	X	
Implementación final del sistema								X	X
Redacción del documento de tesis	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Actividad	S1-4	S5-8	S9-12	S13-16	S17-20	S21-24	S25-28	S29-32	S33-36
Revisión con tutor y correcciones		X		X				X	X
Entrega final									X

Nota. Elaboración propia.

Presupuesto

Tabla 3

Costos fijos

Ítem	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Blackberry pi	1	$1.430.000	$1.430.000
Lilygo7070g	1	$300.000	$300.000
Ph4502c	1	$200.000	$200.000
Sen0189	1	$170.000	$170.000
Tds meter	1	$150.000	$150.000
Panel solar	1	$114.000	$114.000
Batería 3000ma	1	$250.000	$250.000
BMS 2s	1	$48.000	$48.000
Tp5100	1	$24.000	$24.000
Placa pcb	2	$85.000	$170.000
Ds18b20	1	$20.000	$20.000
Cxl4015	2	$22.000	$44.000
Caja eléctrica	1	$80.000	$80.000
Tubo pvc	1	$65.000	$65.000
		Subtotal	$3.065.000

Nota. Elaboración propia.

Tabla 4

Costos variables

Ítem	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Sen0189 genérico	1	$65.000	$65.000
Placa PCB Nacional	1	$85.000	$85.000
		Subtotal	$150.000

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5

Mano de obra

Recurso	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Cesar Calderon	1	$2.500.000	$2.500.000
Andres Guzman	1	$2.500.000	$2.500.000
		Subtotal	$5.000.000

Nota. Elaboración propia.

Tabla 6

Costos totales

Concepto	Valor
Costos fijos	$3.065.000
Costos variables	$150.000
Mano de Obra	$5.000.000
Total general	$8.215.000

Nota. Elaboración propia.

Desarrollo del proyecto

Objetivo 1

Selección de los parámetros fisicoquímicos del índice NSF-WQI.

Modelo NSF-WQI. En el campo de la gestión ambiental y los índices de calidad del agua se han consolidado como herramientas técnicas fundamentales para simplificar información elaborada que proviene de múltiples parámetros fisicoquímicos y biológicos en un valor único de fácil interpretación. Entre estos, el Índice de Calidad del Agua (Water Quality Index, WQI) ha sido adoptado en gran parte por entidades ambientales debido a su capacidad para evaluar el estado de los cuerpos hídricos en Colombia, para realizar comparaciones en un tiempo determinado con el fin de apoyar la toma de decisiones en la formulación de estrategias de control y recuperación ambiental. La aplicación de este tipo de indicadores permite establecer una relación directa entre los resultados del monitoreo y los objetivos de calidad definidos para cada cuerpo de agua, facilitando así el seguimiento sistemático de su evolución.

Para el cálculo del índice global de calidad del agua, se realiza una función de agregación basada en una suma ponderada de los subíndices correspondientes a cada parámetro evaluado. El valor resultante del índice NSF-WQI se expresa en una escala de 0 a 100, donde valores cercanos a cero indican una calidad del agua muy deficiente, mientras que valores próximos a 100 representan una calidad excelente. Este sistema de valoración se ajusta al esquema de interpretación utilizado comúnmente en evaluaciones ambientales, expresado mediante la **Fórmula 1**.

Fórmula 1

Cálculo del Índice de Calidad del Agua por el método de suma ponderada

$$WQI = \sum_{i=1}^{n} SI_i \cdot W_i$$

Donde (WQI) corresponde al índice de calidad del agua, (SI_i) representa el subíndice del parámetro (i) y (W_i) es el factor de ponderación asociado a dicho subíndice.

El uso de una agregación lineal ponderada ha demostrado ser ampliamente aplicable, ya que evita que el índice se vea anulado en caso de que alguno de los subíndices presente un valor igual a cero, situación que sí ocurre cuando se emplea una agregación mediante producto ponderado.

Los índices de calidad del agua constituyen herramientas que permiten integrar múltiples datos obtenidos a partir de la medición de diversos parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua en una única expresión matemática. El resultado de esta integración se representa mediante un valor numérico en una escala de 0 a 100, el cual se asocia a una escala cualitativa que clasifica la calidad del agua desde condiciones deficientes hasta excelentes. Este tipo de índices facilita la interpretación del estado general de un cuerpo hídrico y permite evaluar su comportamiento frente a criterios y objetivos de calidad previamente establecidos.

En este contexto, la administración distrital de Bogotá adoptó el Índice de Calidad del Agua, conocido como WQI (Water Quality Index), herramienta que es oficial para la evaluación del estado de los cuerpos hídricos urbanos. Este índice se fundamenta en rangos numéricos y categorías de clasificación definidos en función del valor obtenido, y su cálculo se realiza a partir de la información generada por los monitoreos de calidad del agua ejecutados durante cada periodo de evaluación.

De esta manera, el WQI permite estimar de forma aproximada el estado de la calidad del recurso hídrico, así como identificar variaciones clave en la planificación y ejecución de acciones

orientadas a la gestión ambiental, ya que facilita la toma de medidas destinadas a mitigar los factores que afectan negativamente la calidad del recurso hídrico. En este sentido, los resultados del WQI se agrupan en categorías de calidad (ver Tabla 7).

Tabla 7

Índice de medición WQI

Categoría	Valor WQI	Descripción
Excelente	95 <WQI<100	La calidad del agua cumple los objetivos de calidad, la calidad está protegida sin que las condiciones deseables estén amenazadas.
Buena	80 <WQI< 94	Calidad del agua cumple los objetivos, la calidad está protegida en un menor nivel, sin embargo, las condiciones deseables pueden estar amenazadas
Aceptable	65<WQI<79	La calidad del agua no cumple los objetivos y ocasionalmente las condiciones deseables están amenazadas
Marginal	45 <WQI <64	Calidad del agua no cumple los objetivos y frecuentemente las condiciones deseables están amenazadas
Pobre	0 <WQI <44	Calidad del agua no cumple los objetivos, la mayoría de las veces la calidad está amenazada o afectada; por lo general apartada de las condiciones deseables

Nota. Elaboración propia con base en *Indicador WQI*, Secretaría Distrital de Ambiente (s. f.); *Capítulo 3: Calidad del agua*, Universidad de Pamplona (2010); e *Informe WQI 2022–2023*, Observatorio Ambiental de Bogotá (2023).

Con base en la información presentada en la Tabla 7, se establece el marco de referencia para el desarrollo del dashboard de medición del sistema de telemetría a implementar. La métrica aquí definida se mantendrá como criterio de evaluación, en concordancia con el indicador de calidad del agua oficialmente adoptado y aplicado en Colombia, garantizando así la consistencia de los resultados obtenidos y su comparabilidad con los reportes institucionales existentes.

A partir de este referente metodológico, se procede con el diseño de la arquitectura general y del componente electrónico del prototipo, orientado a la adquisición, procesamiento y visualización de los parámetros necesarios para el cálculo del índice de calidad del agua, de acuerdo con los lineamientos establecidos.

Modelo NSF-WQI con parámetros de medición

La evaluación de la calidad del agua mediante índices compuestos se fundamenta en la integración de múltiples parámetros fisicoquímicos dentro de un modelo matemático ponderado. El modelo NSF-WQI, desarrollado originalmente por la National Sanitation Foundation, constituye una de las metodologías más reconocidas para sintetizar información ambiental en un valor único de interpretación sencilla.

Objetivo 2

Integración del sistema electrónico de monitoreo.

Potencial de Hidrógeno (pH). El pH es un indicador logarítmico de la concentración de iones hidrógeno en el agua, determinando su carácter ácido o alcalino. Según la United States Environmental Protection Agency (EPA), valores fuera del rango 6.5–8.5 pueden afectar la

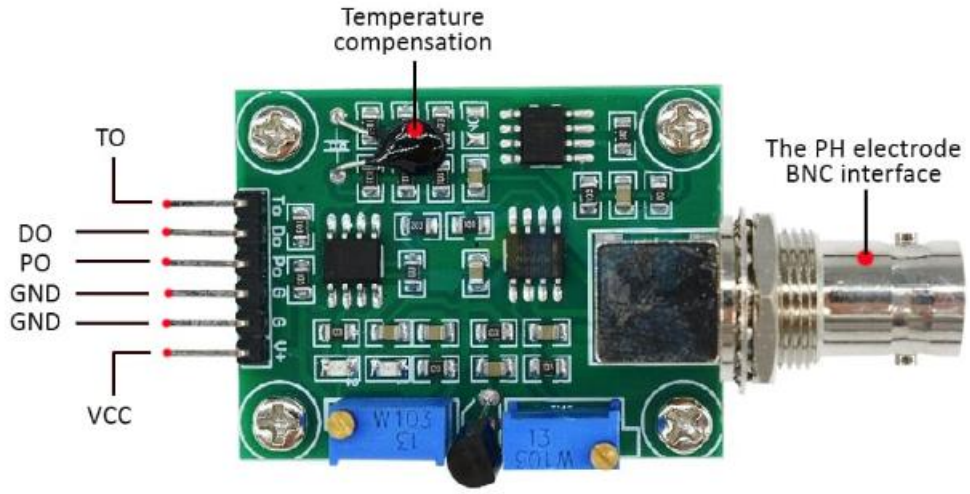
solubilidad de metales, la toxicidad de contaminantes y la estabilidad biológica de los ecosistemas acuáticos.

Adicionalmente, la Organización Mundial de la Salud establece que variaciones extremas de pH pueden generar efectos adversos tanto en ecosistemas acuáticos como en agua destinada a consumo humano, para el prototipo se optó por el sensor de pH – pH4502C.

El sensor pH 4502C es un transductor electroquímico diseñado para medir el nivel de pH en soluciones acuosas. El pH es una medida logarítmica que indica la acidez o alcalinidad de un medio, siendo un parámetro clave en estudios de calidad de agua, procesos industriales y aplicaciones ambientales, ese sensor se representa en la Figura 1.

Figura 1

Sensor pH 4502C



Nota. Tomado de Módulo PH-4502C, Sawers SRL (2022).

Este sensor es ampliamente utilizado en proyectos de monitoreo con microcontroladores como la ESP32, debido a su compatibilidad con circuitos de monitoreo y su salida proporcional a

variaciones de voltaje generado por la celda electroquímica al interactuar con iones de hidrógeno en el agua, sus rangos se pueden visualizar en la Tabla 8.

Tabla 8

Rango de sensor pH

Rango de pH	Clasificación	Justificación técnica
6.5 – 8.5	Óptimo	Rango recomendado
6.0 – 6.4 / 8.6 – 9.0	Aceptable	Ligera alteración sin impacto drástico
5.0 – 5.9 / 9.1 – 10	Deficiente	Posible afectación sobre uso del recurso
< (5.0) o > (10)	Crítico	Condiciones potencialmente dañinas

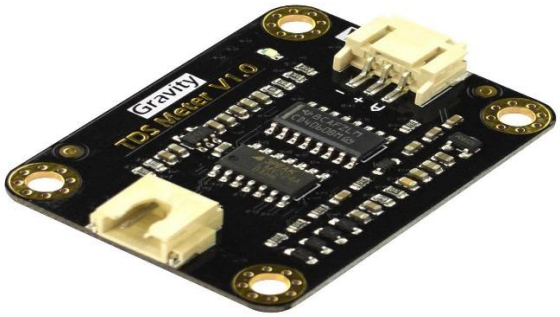
Nota. Elaboración propia.

Conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica evalúa la capacidad que tiene el agua para transportar corriente eléctrica, directamente correlacionada con la concentración de iones disueltos (sales, minerales). Aunque las directrices de la OMS se concentran principalmente en potabilidad, esta variable es reconocida técnicamente como un parámetro físico de calidad del agua que refleja mineralización y posible impacto antrópico (por ejemplo, escorrentía agrícola o vertimientos industriales).

La medición de conductividad en campo mediante sensores compatibles con microcontroladores permite inferir cambios en la composición iónica del medio, como en el sensor de la Figura 2.

Figura 2

Sensor Gravity, modelo SEN0244 - conductividad del agua



Nota. Tomado de Gravity Analog TDS Sensor / Meter for Arduino (SEN0244), Amazon (s. f.).

El Gravity Meter es un módulo sensorial diseñado para la medición del parámetro Total Dissolved Solids (TDS) o sólidos totales disueltos en muestras de agua. Aunque el valor de TDS se expresa en concentración (ppm), este se obtiene a partir de la medición de la conductividad eléctrica del agua, ya que esta representa la presencia de iones disueltos en solución. Este tipo de sensor es ampliamente usado en sistemas de monitoreo ambiental y plataformas como Arduino por su facilidad de integración y señal de salida analógica proporcional al valor medido, en el diseño se conectará mediante una ESP32 para el análisis de datos, se puede visualizar los rangos en la Tabla 9.

Tabla 9

Rango de sensor de conductividad eléctrica

TDS (ppm)	Clasificación	Justificación técnica
0 – 150	Excelente	Agua con baja mineralización
151 – 300	Buena	Condición natural moderada
301 – 600	Aceptable	Influencia salina leve
601 – 1000	Deficiente	Alta mineralización
> 1000	Crítico	Riesgo de afectación ecológica

Nota. Elaboración propia.

Turbidez. La turbidez representa la presencia de sólidos suspendidos que dispersan la luz en el agua. La presencia de altos niveles de partículas puede disminuir la penetración lumínica, afectar la fotosíntesis y ser indicativa de procesos erosivos o descargas contaminantes. En las directrices de la OMS se establece que la turbidez puede afectar la eficiencia del tratamiento y la percepción sensorial del agua, siendo un parámetro físico clave en la evaluación de calidad del recurso. El sensor vinculado al prototipo mide turbidez y permite detectar variaciones dinámicas en el medio, como el de la Figura 3.

Figura 3

Sensor de Turbidez SEN0189



Nota. Tomado de Imagen de producto electrónico, Mercado Libre (s. f.).

El módulo SEN0189, también conocido como Gravity Analog Turbidity Sensor, es un dispositivo electrónico diseñado para medir la turbidez del agua en sistemas de monitoreo ambiental y electrónicos, la turbidez del agua se define como la opacidad o turbiedad causada por partículas suspendidas en el líquido, las cuales alteran la transmisión de luz a través de la muestra. El sensor SEN0189 mide esta turbidez analizando cómo la luz se transmite y se propaga cuando pasa por el agua: a mayor cantidad de partículas suspendidas (SST), mayor es la turbidez del agua y mayor es la señal eléctrica dada por el sensor, sus rangos son definidos en la Tabla 10.

Tabla 10

Rango de sensor de turbidez

Turbidez (NTU)	Clasificación	Justificación técnica
0 – 5	Óptimo	Agua relativamente clara
6 – 25	Bueno	Ligera presencia de sólidos
26 – 100	Aceptable	Presencia de sólidos en partículas sin saturación
>100	Deficiente	Alta presencia de partículas

Nota. Elaboración propia.

***Temperatura*.** La temperatura regula la cinética física y biológica del sistema acuático, afectando la solubilidad de gases (como el oxígeno disuelto) y la tasa metabólica de organismos. Aunque no siempre se refleja con un valor de límite estricto en cada normativa, su monitoreo es requerido en estudios ambientales y en evaluaciones de estrés ambiental debido a su impacto en variables como oxígeno disuelto. El prototipo incorpora sensores digitales para medición continua, garantizando valores estables para integración en el índice adaptado. Como el sensor de la Figura 4.

Figura 4

Sensor de temperatura DS18B20



Nota. Tomado de Sensor de temperatura DS18B20, VVA Industrial (s. f.).

El DS18B20 es un sensor de temperatura digital ampliamente utilizado en aplicaciones de monitoreo ambiental y automatización, debido a su precisión, estabilidad y facilidad de integración con microcontroladores. Este dispositivo opera mediante un circuito interno que realiza la medición térmica y convierte directamente el valor obtenido en una señal digital proporcional a la temperatura del medio en el que se encuentra, una de sus principales ventajas es la disponibilidad en presentaciones encapsuladas e impermeables, lo que permite su uso en la

medición de temperatura en cuerpos de agua sin afectar su funcionamiento ni comprometer la integridad del sensor, sus rangos se evidencian en la Tabla 11.

Tabla 11

Rango de sensor de temperatura

Temperatura (°C)	Clasificación	Justificación técnica
18 – 28 °C	Óptimo	Rango típico ecosistemas tropicales
15 – 17 °C / 29 – 32 °C	Aceptable	Variación leve
10 – 14 °C / 33 – 36 °C	Deficiente	Posible estrés térmico
< 10 °C o > 36 °C	Crítico	Riesgo ecológico significativo

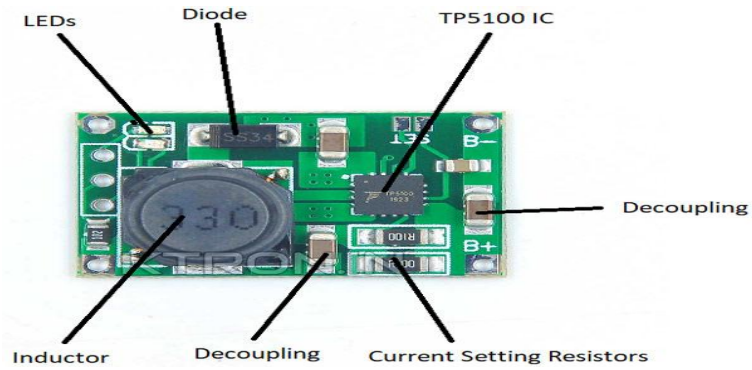
Nota. Elaboración propia.

Componentes electrónicos de telemetría.

Los componentes electrónicos de telemetría constituyen la base para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos en tiempo real dentro del sistema. Estos elementos permiten garantizar la eficiencia en el monitoreo de variables, optimizando la recolección de información y su envío hacia plataformas de análisis. En este contexto, la Figura 5 presenta el módulo TP5100, empleado para la gestión y regulación de la carga en el sistema electrónico.

Figura 5

Modulo TP5100



Nota. Tomado de Evolución de las tecnologías inalámbricas 1G a 5G, Easybom (s. f.).

El TP5100 es un circuito integrado diseñado para la gestión eficiente y segura de carga de baterías recargables de ión-litio (Li-ion). Este dispositivo permite la carga de configuraciones de una celda o dos celdas en serie, proporcionando una solución compacta con múltiples mecanismos de protección integrados. Complementariamente, la Figura 6 presenta el módulo de gestión de batería Li-ion 2S de 20 A, el cual permite la protección y control del sistema durante los procesos de carga y descarga.

Figura 6

Módulo de Gestión de Batería Li-ion 2S 20 A



Nota: Tomado de *Cargador 2S 20A BMS 18650 placa de protección* [Recurso web], por PicClick (s.f.).

El sistema de gestión de baterías (BMS) para una configuración de dos celdas de litio en serie en nuestro caso 2, es un elemento esencial en sistemas que utilizan baterías recargables de ión-litio. Su función principal es proteger las celdas contra condiciones operativas adversas y garantizar su integridad funcional durante los procesos de carga y descarga.

Asimismo, muchos módulos BMS incorporan balanceo automático de celdas, lo que favorece un nivel uniforme de carga entre las celdas del paquete y prolonga su vida útil con el paso del tiempo. Para el sistema de monitoreo se optó por un módulo con balanceo, con el fin de mantener las celdas en condiciones óptimas. Adicionalmente, la Figura 7 presenta el módulo XL4015, un regulador DC-DC Step-Down de 5 A empleado para la adecuación del voltaje dentro del sistema.

Figura 7

XL4015 – Regulador DC-DC Step-Down de 5 A



Nota. Tomado de DC-DC XL4015 Adjustable Step-down Module, Robodo (s. f.).

El XL4015 es un convertidor DC-DC reductor (step-down) de alto rendimiento, diseñado para transformar un voltaje de entrada mayor en uno menor con alta eficiencia energética. Está optimizado para aplicaciones que requieren corrientes de salida de hasta 5 A de forma estable y confiable. Este tipo de componente es ampliamente utilizado en sistemas de alimentación de

dispositivos electrónicos, fuentes de energía reguladas y módulos integrados donde se requiere eficiencia, baja disipación térmica y tamaño compacto. En el sistema de monitoreo resulta adecuado, ya que se manejan dos niveles de tensión: 3.3 V y 5 V. Adicionalmente, la Figura 8 presenta el módulo de comunicación ESP32 con SIM7070G (T-SIM7070G), empleado para la transmisión de datos en el sistema.

Figura 8

Módulo de Comunicación ESP32 con SIM7070G – T-SIM7070G



Nota. Tomado de LILYGO TTGO T-SIM7000G ESP32-WROVER-B Wireless Module, JF-Elektronik (2023).

El ESP32 es un microcontrolador de alto rendimiento desarrollado para aplicaciones de sistemas embebidos e Internet de las Cosas (IoT). Integra en un solo chip capacidades de procesamiento, conectividad inalámbrica y múltiples interfaces de comunicación, lo que lo convierte en una plataforma versátil para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos en tiempo real.

Desde el punto de vista arquitectónico, el ESP32 incorpora un procesador de doble núcleo basado en arquitectura Xtensa de 32 bits, capaz de ejecutar tareas simultáneas bajo un sistema operativo en tiempo real; esto permite gestionar de manera eficiente múltiples sensores,

realizar procesamiento local de datos y manejar protocolos de comunicación sin afectar la estabilidad del sistema.

Basándose en el estándar técnico previamente establecido para el diseño del sistema, se optó por la selección de un conjunto específico de componentes electrónicos, cada uno con una función claramente definida y relevante dentro de la arquitectura general del proyecto.

La elección de estos elementos responde a criterios de compatibilidad eléctrica, eficiencia energética, estabilidad operativa, precisión en la adquisición de datos y facilidad de mantenimiento con bajo costo. Esta etapa constituye un punto crítico dentro del desarrollo del sistema, ya que la adecuada selección de componentes garantiza el correcto funcionamiento, la confiabilidad y la sostenibilidad del sistema de monitoreo.

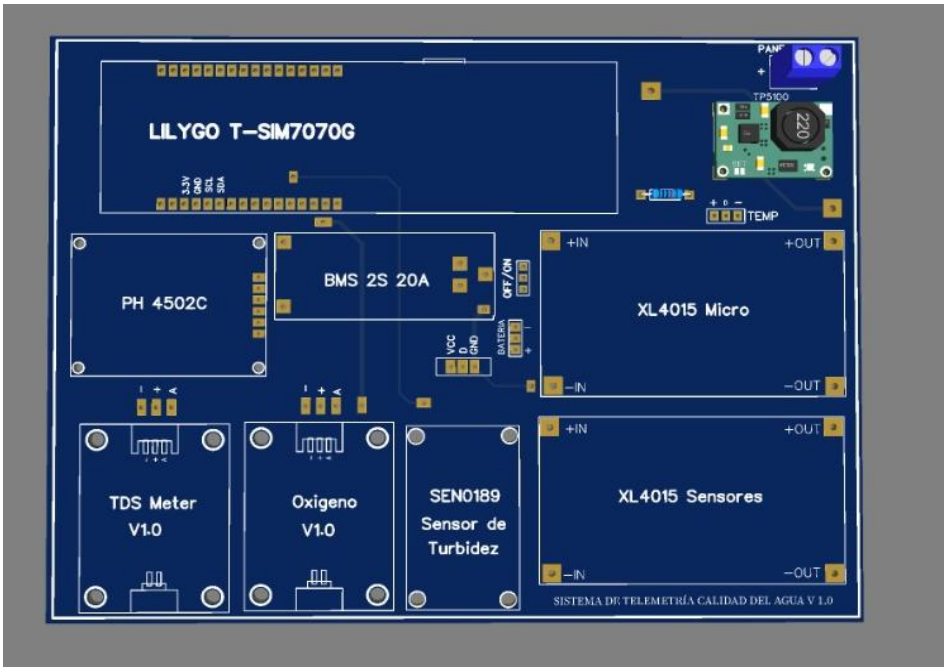
La integración de dichos componentes permitió estructurar la infraestructura electrónica necesaria para el sistema de monitoreo de la calidad de cuerpos acuáticos, asegurando tanto la correcta alimentación energética como la adquisición, procesamiento y transmisión de los parámetros evaluados.

Las tablas de clasificación presentadas en este estudio fueron estructuradas considerando, en primer lugar, las escalas y rangos de medición propios de los sensores seleccionados para el prototipo (pH4502C para pH, SEN0244 para conductividad/TDS, SEN0189 para turbidez y DS18B20 para temperatura). Esto implica que los intervalos definidos no solo responden a criterios normativos internacionales (WHO, FAO y EPA), sino también a las limitaciones técnicas de cada sensor, como su precisión y rango operativo. En consecuencia, los valores umbral podrían variar si se emplearan sensores con diferente sensibilidad, rango de medición o principio de funcionamiento, por lo que la clasificación propuesta se encuentra directamente asociada a la arquitectura instrumental implementada en el prototipo. En este contexto, la Figura

9 presenta la placa diseñada en EasyEDA en formato 3D, correspondiente a la integración física del sistema.

Figura 9

Placa 3D Easy EDA



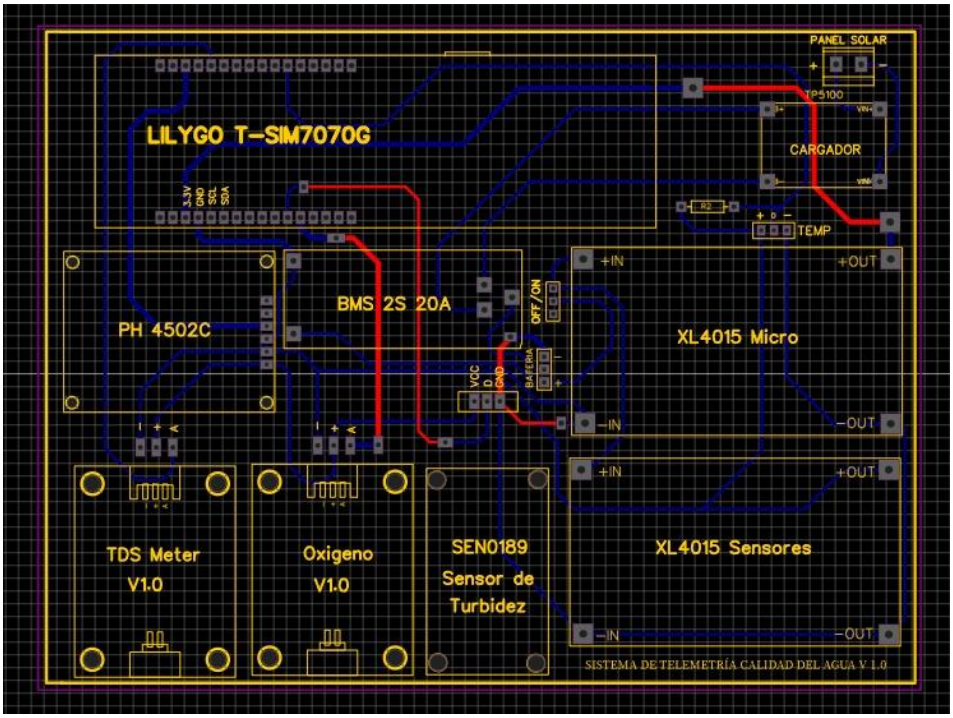
Nota. Elaboración propia.

El diseño electrónico y de infraestructura del prototipo se refleja en las siguientes figuras. En esta etapa se definieron los sensores a utilizar y la forma en que se realizarían las conexiones físicas. Asimismo, se llevó a cabo la interpretación de las entradas y salidas de voltaje, considerando que los sensores operan con una alimentación de 5 V, mientras que la ESP32 trabaja con 3.3 V. Posteriormente, los sensores se clasificaron según su tipo de señal, ya sea analógica o digital, con el fin de facilitar la simulación en el programa EasyEDA para el diseño de la PCB, reduciendo posibles inconvenientes asociados a conexiones compartidas de VCC y GND. Además, se planteó un sistema de alimentación con enfoque sostenible, con miras a una

futura instalación fija del prototipo en un cuerpo de agua. En este contexto, la Figura 10 presenta el diseño de pistas de la placa.

Figura 10

Diseño de pistas



Nota. Elaboración propia.

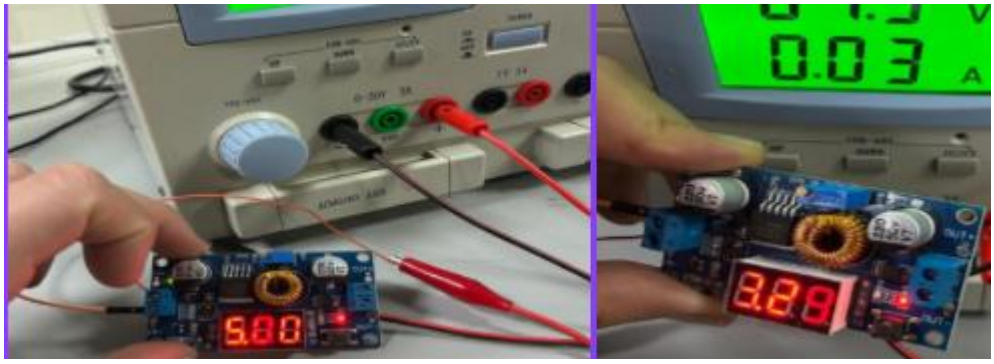
En estas imágenes se evidencian las conexiones en las dos caras de la placa PCB, con el fin de evitar cruces entre las líneas de VCC y GND. Los sensores fueron organizados según la distancia más cercana al microcontrolador ESP32, con el propósito de reducir la longitud de las pistas de cobre y evitar redundancias eléctricas. Asimismo, se dejó un espacio disponible en la placa para la posible incorporación de un sensor de oxígeno disuelto, en caso de que un programa especializado en monitoreo de cuerpos de agua requiera medir este parámetro en los sistemas acuáticos a intervenir. Se aplico el diseño mediante EASYEDA para visualizar las

conexiones en 3D e identificar posibles interferencias físicas, verificando si la infraestructura de algún sensor ocupaba un volumen adicional que pudiera afectar la ubicación de los demás componentes dentro de la placa.

Después de validar las conexiones mediante EasyEDA, se procedió a solicitar la fabricación física de la placa PCB. En las imágenes se evidencia la cara superior, donde se encuentran las conexiones para los sensores, la distribución eléctrica y el microcontrolador ESP32. En la cara inferior se observa el plano de GND y las pistas que proporcionan conexión a los puertos de datos de cada sensor, así como a las entradas y salidas de VCC. También se integra la conexión de la batería alimentada por el panel solar, mientras que el microcontrolador ESP32 se ubica en esta cara para mitigar posibles afectaciones por fricción en las pistas de cobre. En este sentido, la Figura 11 muestra el ajuste de voltaje del módulo XL4015 a 5 V y 3.3 V.

Figura 11

Ajuste de voltaje XL4015 a 5V y 3.3V



Nota. Elaboración propia.

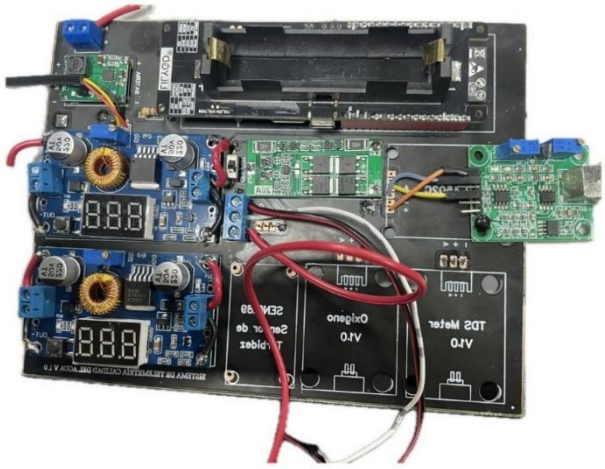
Con ayuda de un multímetro se midió la continuidad desde las entradas de VCC hacia las salidas de VCC del componente XL4015. Asimismo, se verificó la continuidad desde el módulo TP5100 hasta el pin de la batería, con el fin de garantizar la correcta comunicación entre la

entrada de energía adquirida del panel solar y la salida encargada de almacenar y distribuir la energía del prototipo. Posteriormente, se comprobó la continuidad desde el XL4015 ubicado en la parte inferior de la placa hacia el VCC de cada sensor, ya que estos son alimentados con 5 V. Asimismo, se realizó la verificación desde el pin de 3.3 V de la ESP32 hacia el XL4015 superior, con el propósito de identificar posibles cortocircuitos y evitar daños en el microcontrolador.

En los módulos XL4015 se reguló el voltaje de entrada a 7.4 V mediante una fuente DC, conectando los terminales positivo y negativo a los puertos de entrada identificados como (+IN y −IN). Con el módulo energizado, se realizó la regulación del voltaje de salida ajustando el potenciómetro integrado con un destornillador. El primer módulo se configuró a 3.3 V para la alimentación de la ESP32, mientras que el segundo se ajustó a 5 V para los sensores. Posteriormente, se verificaron los valores de salida con un multímetro en los pines (+OUT y −OUT). Una vez confirmado el voltaje, se apagó la fuente de alimentación y los módulos quedaron listos para su ensamblaje en la placa PCB. En este punto, la Figura 12 muestra el proceso de ensamble del sistema.

Figura 12

Ensamble



Nota. Elaboración propia.

Se procedió con el ensamblaje utilizando pines macho para la ESP32, con el fin de permitir su desmontaje en caso de ser necesario, ya sea para la programación de los sensores o para el reemplazo del microcontrolador sin requerir desoldado. Para las conexiones, se emplearon jumpers hembra soldados directamente a la placa PCB mediante cable pelado, facilitando la conexión a los pines de cada sensor. El sensor de temperatura se soldó de forma directa, debido a que cuenta con cableado integrado. Asimismo, se soldaron las terminales de entrada y salida de los módulos step-down XL4015, con el propósito de reducir el riesgo de cortocircuitos. Las salidas de los sensores se dispusieron hacia el exterior de la placa, permitiendo la conexión de las sondas de medición. Finalmente, el panel solar se conectó al módulo TP5100 mediante una bornera, asegurando una adecuada distribución de la polaridad hacia las pistas de VCC y GND. En este contexto, la Figura 13 muestra el sistema de agarre del flotador.

Figura 13

Agarre de flotador



Nota. Elaboración propia.

Tras finalizar el ensamblaje electrónico del sistema, se procedió al diseño e implementación de la infraestructura externa encargada de garantizar la flotabilidad y estabilidad del prototipo sobre cuerpos de agua. Esta etapa fue fundamental para asegurar un desempeño adecuado en condiciones reales de operación. Para ello, se elaboró un diseño esquemático tomando como referencia un tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro (11 cm), asegurando un ajuste preciso para evitar posibles desplazamientos de estructura. Las piezas de soporte fueron modeladas digitalmente considerando tolerancias mecánicas y distribución de cargas con un 20% de relleno por pieza, posteriormente, los componentes fueron fabricados mediante impresión 3D, lo que permitió obtener estructuras personalizadas y adaptadas a las dimensiones específicas del sistema.

En total, se desarrollaron cuatro soportes estructurales, diseñados para ubicarse estratégicamente en ambos extremos del prototipo, con dos piezas por cada tubo. El sistema de flotación está conformado por dos tubos de PVC de 45 cm de longitud cada uno, sellados mediante tapas en ambos extremos para evitar filtraciones de agua. Estas unidades funcionan como flotadores principales y proporcionan el empuje necesario para sostener el peso total del sistema, permitiendo una distribución uniforme sobre la superficie del agua. En este contexto, la Figura 14 presenta el prototipo final.

Figura 14

Prototipo final



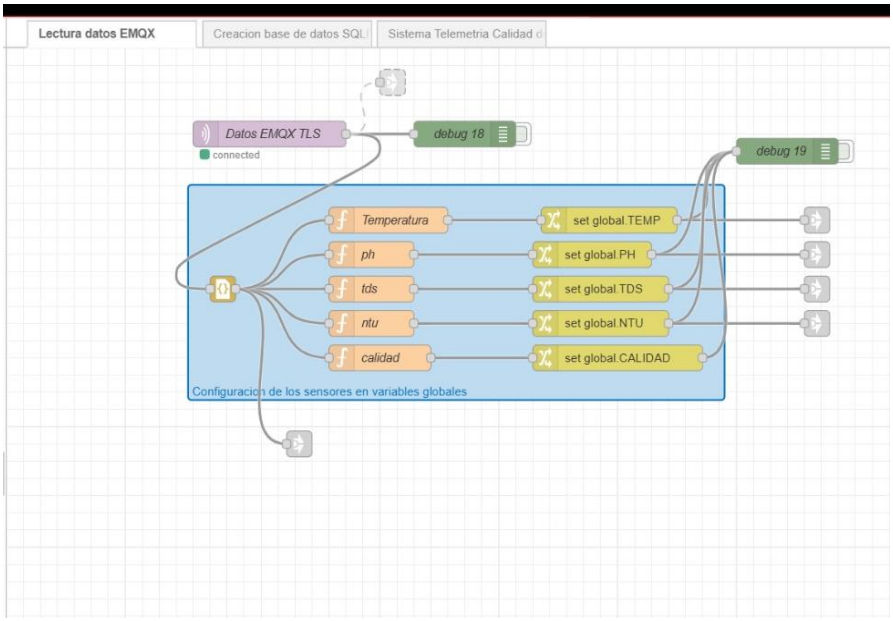
Nota. Elaboración propia.

En esta etapa del proyecto se consolidó la integración física y funcional del prototipo, garantizando una estructura adecuada para su operación. La incorporación del panel solar junto con la caja eléctrica permitió centralizar los componentes energéticos en un solo módulo,

optimizando su protección. Por otra parte, el ajuste de los flotadores a la base del panel aseguró la flotabilidad y el equilibrio del sistema durante su despliegue en superficies acuáticas, facilitando la ejecución de pruebas controladas. Además, se realizaron dos cavidades estratégicas: una destinada a los sensores y otra para el ingreso del cableado del sistema fotovoltaico, lo que permitió organizar de manera eficiente los elementos internos. Esto constituye un paso clave para la siguiente fase, enfocada en el procesamiento, análisis y visualización de la información recolectada. En este contexto, la Figura 15 muestra la integración del sistema en Node-RED.

Figura 15

Integración en NODE-RED



Nota. Elaboración propia.

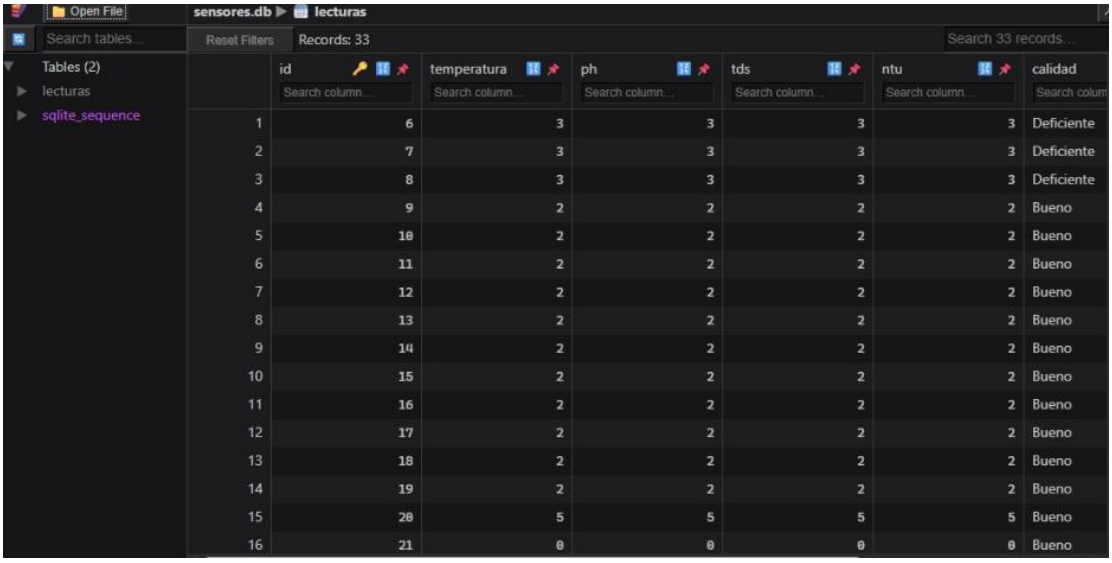
Para la integración de la recolección y almacenamiento de datos, se implementó la herramienta Node-RED, la cual permitió diseñar un esquema basado en la recepción y procesamiento de información del sistema de medición, la arquitectura desarrollada contempló el

envío de datos desde un nodo remoto compuesto por un microcontrolador ESP32 integrado en la tarjeta LilyGO T-SIM 7070G, el cual transmite la información en formato JSON mediante conectividad GSM hacia un broker MQTT en la nube (EMQX Cloud). Este enfoque permitió centralizar los datos generados en campo y garantizar su disponibilidad en tiempo real. Además, el uso de flujos visuales facilitó la configuración de procesos sin requerir programación compleja, esto optimizó el tiempo de desarrollo e implementación del sistema.

En el nodo maestro se realizó la instalación y configuración de Node-RED como plataforma principal para el procesamiento, almacenamiento y visualización de la información. A diferencia de otros enfoques, en esta arquitectura Node-RED se suscribe directamente al broker MQTT EMQX Cloud, lo que permite la recepción de datos en tiempo real sin intermediación de servicios adicionales. Una vez recibidos los mensajes en formato JSON, estos son procesados mediante nodos específicos que separan cada variable de medición de forma individual. Este tratamiento facilita la manipulación de los datos y mejora su organización, permitiendo su reutilización en distintos flujos sin redundancia de procesamiento. En este contexto, la Figura 16 muestra la comunicación de EMQX con la base de datos.

Figura 16

EMQX en comunicación con base de datos



	id	temperatura	ph	tds	ntu	calidad
1	6	3	3	3	3	Deficiente
2	7	3	3	3	3	Deficiente
3	8	3	3	3	3	Deficiente
4	9	2	2	2	2	Bueno
5	10	2	2	2	2	Bueno
6	11	2	2	2	2	Bueno
7	12	2	2	2	2	Bueno
8	13	2	2	2	2	Bueno
9	14	2	2	2	2	Bueno
10	15	2	2	2	2	Bueno
11	16	2	2	2	2	Bueno
12	17	2	2	2	2	Bueno
13	18	2	2	2	2	Bueno
14	19	2	2	2	2	Bueno
15	20	5	5	5	5	Bueno
16	21	0	0	0	0	Bueno

Nota. Elaboración propia.

Posteriormente, los datos procesados son almacenados en una base de datos local SQLite, la cual fue seleccionada por su bajo costo y fácil adaptación a nivel local con el sistema de Node-RED, este almacenamiento permite mantener un historial estructurado de las mediciones, garantizando la persistencia de la información incluso ante posibles fallos de conectividad con la nube, como también facilita el acceso a los datos para su análisis posterior sin depender de servicios externos, brindando la disponibilidad del sistema y reduciendo la latencia en las consultas, esto resulto fundamental en sistemas de monitoreo continuo, permitiendo la construcción de un dashboard interactivo dentro del mismo entorno, orientado a la visualización de los datos en tiempo real y de forma histórica. A partir de las variables previamente procesadas y almacenadas, se diseñaron componentes gráficos que facilitan la interpretación del

comportamiento de cada parámetro medido, siendo visualizada de forma individual cada variable, lo que mejoró la comprensión de los datos.

Objetivo 3

Pruebas de prototipo en entorno controlado.

Para dar cumplimiento al tercer objetivo específico, se realizó la validación del funcionamiento del prototipo en un entorno simulado, utilizando el cuerpo de agua artificial de la Universitaria Agustiniana. Durante esta fase de despliegue, el sistema, equipado con su módulo de comunicación, intentó establecer conexión mediante una tarjeta SIM del operador Movistar; sin embargo, se presentaron limitaciones de infraestructura en el lugar. Se evidenció que la ubicación geográfica y estructural de la fuente impidió que el dispositivo captara la señal necesaria para la transmisión de datos, incluso tras un periodo de espera de 40 minutos. Esta fase permitió documentar cómo factores externos, como muros o interferencias del entorno, pueden afectar la disponibilidad de la información en un sistema de monitoreo remoto. En este contexto, la Figura 17 muestra el prototipo sumergido en el cuerpo de agua artificial durante las pruebas de campo.

Figura 17

Prototipo sumergido en el cuerpo de agua artificial durante las pruebas de campo



Nota. Elaboración propia.

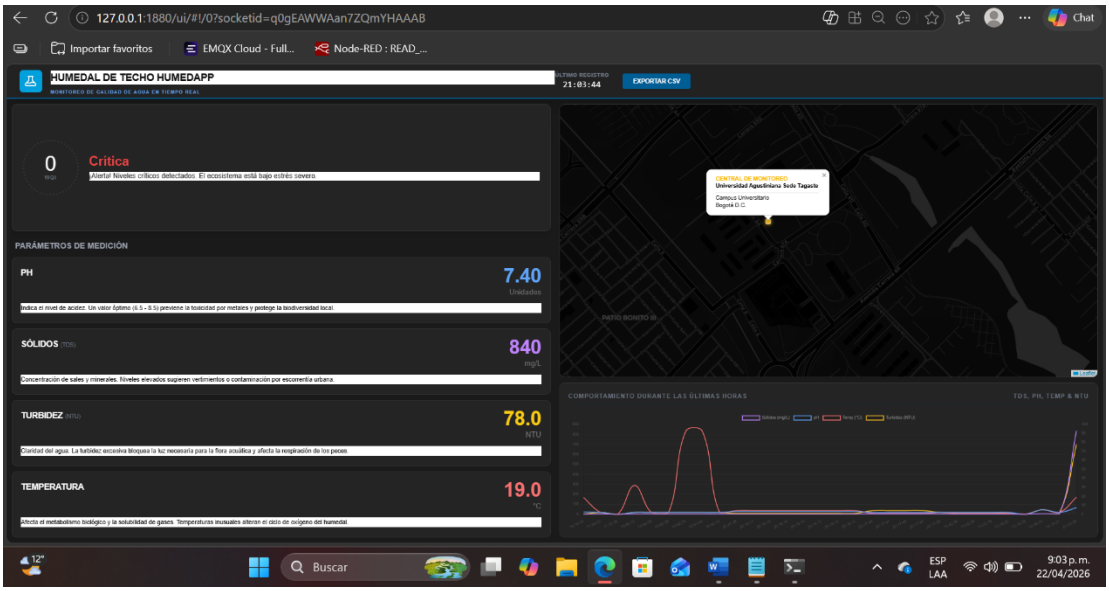
Ante la ausencia de conectividad en el punto inicial, se procedió a trasladar el equipo a una zona de la institución con mejores condiciones de cobertura para verificar el flujo de información hacia el panel de control. En este segundo escenario, se ejecutaron pruebas controladas utilizando muestras de agua dispuestas en recipientes independientes, donde se evaluó el comportamiento de cada sensor frente a distintas condiciones. Los resultados demostraron que el prototipo funcionó de manera satisfactoria bajo estas condiciones, validando que los sensores de pH, temperatura y turbidez estaban correctamente calibrados. Este procedimiento aseguró que los datos recolectados fueran exactos y reflejaran la realidad del estado del agua, cumpliendo con los estándares de calidad esperados para el proyecto.

En la etapa de análisis de la red móvil, se determinó que el sistema presentaba un tiempo de respuesta de entre 15 y 17 minutos para lograr una conexión estable con la red celular en la zona de pruebas. A pesar de este retraso inicial, una vez establecido el enlace, la arquitectura diseñada garantizó que la información llegara de forma organizada al centro de control en la

nube. La recepción de estos datos se visualizó de manera efectiva a través de un panel digital o dashboard, lo cual confirmó que el sistema es capaz de procesar la información y presentarla de forma clara para el usuario final. Este hallazgo permitió evidenciar que, aunque la conexión inicial puede tardar, la transmisión de los datos se realiza de manera íntegra y confiable. En este sentido, las Figuras 18 y 19 muestran la visualización de los datos fisicoquímicos en tiempo real a través del dashboard.

Figura 18

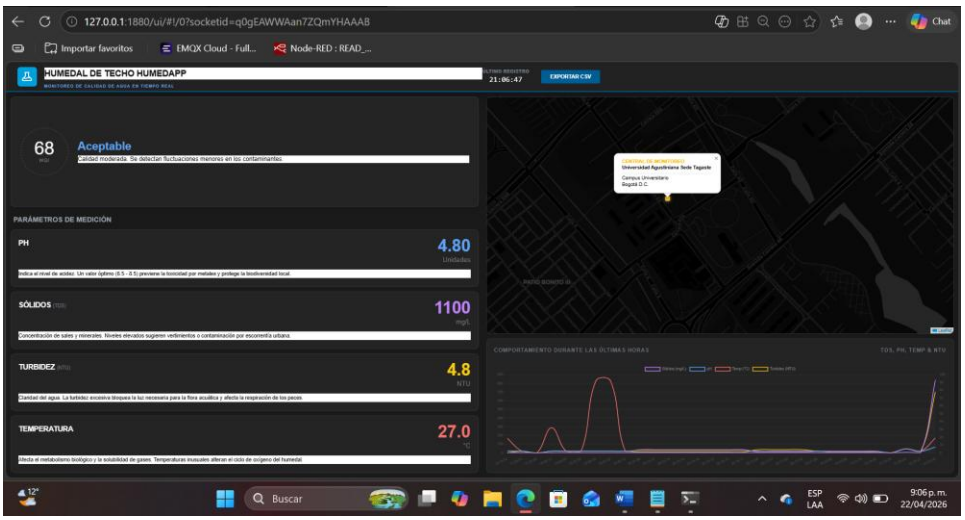
Visualización de datos fisicoquímicos en tiempo real a través del dashboard (parte 1)



Nota. Elaboración propia.

Figura 19

Visualización de datos fisicoquímicos en tiempo real a través del dashboard (parte 2)



Nota. Elaboración propia.

Posterior a la verificación de la conexión, se realizó un análisis sobre cómo se enviaban y recibían los paquetes de datos para asegurar que no hubiera errores en el trayecto. Se constató que el formato utilizado para organizar la información permitió que los valores de cada sensor llegaran de forma clara, facilitando su lectura en el panel de control. Durante las pruebas, se observó que la inestabilidad de la red móvil no alteró los valores medidos, lo que garantizó que los cálculos finales sobre la calidad del agua fueran coherentes. Este análisis técnico validó que el software del prototipo es lo suficientemente robusto para manejar interrupciones en la señal sin que esto afecte la veracidad de los resultados mostrados al usuario.

La gestión de la información durante los momentos en que no había señal fue un punto clave para el éxito de la prueba, donde el uso de una memoria interna en el dispositivo demostró su utilidad. Ante la demora detectada para conectar a la red en el campus, el sistema activó automáticamente un protocolo de seguridad para guardar los datos dentro del mismo prototipo y evitar que se perdieran. Una vez que se restableció la conexión con el servidor, el dispositivo

envió automáticamente toda la información guardada cronológicamente para actualizar el panel de control. Este comportamiento confirmó que el equipo es un sistema inteligente capaz de mantener la continuidad del monitoreo, incluso cuando se enfrenta a una infraestructura de comunicaciones deficiente.

El análisis de la precisión de los sensores también fue una prioridad, confirmando que la tecnología de bajo costo utilizada es capaz de ofrecer resultados profesionales. Se evidenció que, tras varias jornadas de prueba, las mediciones se mantuvieron estables y no presentaron variaciones extrañas que indicaran descalibración por el uso. Los datos obtenidos en el entorno de la fuente universitaria proporcionaron una base sólida para afirmar que el sistema puede adaptarse a otros cuerpos de agua más grandes y complejos, como ríos o lagunas. Esta estabilidad asegura que el prototipo sea una herramienta duradera que no requiere mantenimiento constante, facilitando su implementación en proyectos de largo plazo.

Finalmente, la evaluación integral del prototipo permitió concluir que la combinación entre sensores eficientes y un sistema de comunicación inteligente cumple con las metas de protección ambiental planteadas. Se demostró que el dispositivo no solo mide variables del agua, sino que las transforma en información útil que cualquier persona puede interpretar a través de las gráficas del panel digital. Los resultados obtenidos en estas pruebas simuladas validaron la utilidad de la tecnología para prevenir la contaminación en sistemas acuáticos

Conclusiones

En el desarrollo del proyecto se logró diseñar un prototipo electrónico orientado al monitoreo de parámetros asociados a la calidad del agua, dando cumplimiento al objetivo general planteado. La propuesta se centró en la integración de un sistema de adquisición, transmisión y procesamiento de datos, permitiendo estructurar una solución funcional para el monitoreo remoto en tiempo real, el sistema diseñado contempla la captura de información mediante sensores, su transmisión a través de redes móviles (LTE) y su posterior procesamiento en una plataforma central Node-RED. Este enfoque permitió demostrar la viabilidad de aplicar tecnologías de telecomunicaciones en escenarios de monitoreo ambiental. De esta manera, se consolidó un diseño que permite gestionar información de forma continua, confiable y estructurada, facilitando su análisis y visualización.

En relación con el primer objetivo específico, se realizó la selección de los parámetros requeridos por el modelo de evaluación propuesto, tomando como referencia el índice NSF-WQI. Este proceso se abordó desde una perspectiva funcional, considerando principalmente la disponibilidad de sensores, la capacidad de integración con sistemas electrónicos y la viabilidad de transmisión de los datos asociados. Así priorizando la selección de variables que pudieran ser medidas y gestionadas de forma eficiente dentro del sistema diseñado, esta etapa permitió definir los requerimientos técnicos del sistema de adquisición de datos, estableciendo las condiciones necesarias para garantizar la correcta captura y procesamiento de la información.

Respecto al segundo objetivo específico, se planteó la integración de un sistema electrónico compuesto por dispositivos de adquisición de datos y un módulo de comunicación móvil, permitiendo la transmisión de información desde ubicaciones remotas hacia una plataforma centralizada. Esta integración permitió definir un flujo de datos estructurado, en el

cual la información es generada en campo, encapsulada en un formato estándar y transmitida mediante protocolos de mensajería. El uso de conectividad GSM facilitó la operación del sistema en entornos sin infraestructura de red fija, ampliando su aplicabilidad. Asimismo, la incorporación de un broker MQTT en la nube permitió gestionar la comunicación de manera eficiente, asegurando la entrega de los datos hacia el sistema de procesamiento, por otra parte, el uso de herramientas como Node-RED permitió estructurar los flujos de datos, facilitando su almacenamiento en bases de datos locales y su posterior visualización, de esta manera, se definió una arquitectura de comunicaciones adaptable y orientada a sistemas IoT.

En cuanto al tercer objetivo específico, se validó el funcionamiento del prototipo mediante pruebas en un entorno controlado, lo que permitió evaluar el comportamiento del sistema desde la perspectiva de adquisición, transmisión y procesamiento de datos. Durante estas pruebas, se evidenció que la arquitectura diseñada permite mantener un flujo de información continuo, con tiempos de respuesta adecuados para aplicaciones de monitoreo. Asimismo, se verificó la correcta integración entre los diferentes componentes del sistema, desde el nodo remoto hasta la plataforma de visualización. Sin embargo, se identificaron algunas limitaciones asociadas principalmente a la variabilidad de la conectividad móvil, lo cual puede afectar la disponibilidad de los datos en determinados escenarios. Esta situación resalta la importancia de considerar mecanismos de redundancia o almacenamiento local en el nodo remoto. En consecuencia, la validación permitió confirmar la funcionalidad del sistema, así como identificar aspectos clave para su optimización.

Adicionalmente, el desarrollo del proyecto permitió evidenciar la importancia de definir una arquitectura modular en sistemas de monitoreo remoto, donde cada componente cumple una función específica dentro del flujo de datos. La separación entre el nodo de adquisición, el

sistema de comunicación y la plataforma de procesamiento facilita la escalabilidad y el mantenimiento del sistema. Asimismo, se destacó el uso de protocolos ligeros como MQTT, los cuales permiten optimizar el uso del ancho de banda y reducir la carga sobre la red. Este aspecto resulta fundamental en escenarios donde la conectividad es limitada o inestable. De igual manera, la implementación de herramientas de integración como Node-RED permitió simplificar la gestión de los datos, reduciendo la complejidad del desarrollo. En este sentido, el proyecto aporta una referencia clara para el diseño de soluciones IoT orientadas a la recolección y gestión de información en entornos distribuidos.

Recomendaciones

Como proyección futura del sistema desarrollado, se propone la incorporación de mecanismos de seguridad en la comunicación de datos, tales como autenticación y cifrado en los protocolos utilizados, con el fin de garantizar la integridad y confidencialidad de la información transmitida. Este aspecto es especialmente relevante en sistemas que operan sobre redes móviles o infraestructuras públicas, donde los datos pueden estar expuestos a diferentes riesgos. Asimismo, se sugiere la implementación de niveles de calidad de servicio en la mensajería, con el propósito de asegurar la entrega de los datos en condiciones de conectividad variable, resultando conveniente incorporar controles de acceso en la plataforma de visualización para restringir el uso no autorizado, estas acciones permiten fortalecer la arquitectura y seguridad del sistema, contribuyendo a mejorar la confiabilidad en la transmisión de la información.

En cuanto a la disponibilidad del sistema, se recomienda la implementación de un esquema de redundancia en el nodo remoto mediante el uso de dos dispositivos ESP32 o módulos equivalentes, cada uno operando con una tarjeta SIM independiente. Esta configuración permitiría establecer un mecanismo de conmutación automática entre enlaces de comunicación, similar a un esquema básico de respaldo de red. En caso de falla de uno de los enlaces, el sistema podría continuar operando a través del segundo canal disponible sin interrupciones significativas. Este enfoque resulta especialmente útil en entornos donde la cobertura de red móvil es inestable o presenta variaciones. Además, contribuye a reducir la pérdida de información durante la transmisión de datos, mejorando la disponibilidad del sistema en escenarios críticos.

Durante la fase de pruebas y validación, se sugiere el uso inicial de sensores genéricos o de bajo costo para evaluar el comportamiento del sistema en entornos controlados. Esta estrategia permite identificar posibles fallas en la integración entre hardware y software sin

comprometer recursos elevados. Además, facilita la realización de ajustes antes de la implementación definitiva del sistema. Posteriormente, se propone la utilización de sensores especializados para su operación en entornos reales, donde se requiere mayor precisión y confiabilidad en las mediciones, este enfoque progresivo contribuye a optimizar los costos del proyecto.

Por otra parte, se recomienda el uso de una arquitectura híbrida que contemple tanto el almacenamiento y procesamiento de datos a nivel local como en la nube. Las soluciones locales permiten mantener la disponibilidad de la información ante posibles fallos en la conectividad. Al mismo tiempo, las plataformas en la nube facilitan el acceso remoto, la escalabilidad y la integración con otros servicios. Esta combinación de enfoques proporciona mayor flexibilidad en la gestión de los datos, permitiendo que la información esté disponible desde diferentes ubicaciones de manera simultánea.

Desde el punto de vista físico, se recomienda el uso de una caja eléctrica a la medida para la protección de los componentes electrónicos, preferiblemente con apertura lateral que facilite el acceso para mantenimiento y configuración del sistema. Este tipo de diseño permite realizar intervenciones técnicas de forma más eficiente y segura. En caso de no contar con una solución comercial que cumpla con los requerimientos, se plantea el diseño y fabricación de una carcasa personalizada. Además, es importante considerar factores como la protección contra humedad, polvo y variaciones de temperatura. Estos elementos pueden afectar directamente el funcionamiento de los dispositivos electrónicos, por lo tanto, la adecuada protección física contribuye a prolongar la vida útil del sistema

Finalmente, se propone la implementación de un sistema de alertas que permita notificar a los usuarios o entidades responsables ante la detección de eventos o valores fuera de los rangos

establecidos. Estas alertas pueden configurarse para enviarse mediante diferentes medios, como plataformas de monitoreo, correos electrónicos o dispositivos móviles, este mecanismo permite generar respuestas oportunas ante situaciones que requieran atención inmediata

Delimitación del proyecto

Alcances

El presente proyecto tiene como alcance el diseño de un prototipo orientado al monitoreo de parámetros de la calidad del agua. La investigación abarcará el análisis de las tecnologías de comunicación más adecuadas para la transmisión de datos ambientales en tiempo real, considerando aspectos de consumo energético y la fiabilidad de la información.

Asimismo, se desarrolla una propuesta de arquitectura basada en sensores de monitoreo, microcontroladores y módulos de comunicación inalámbrica que permite la recolección y envió de información a un punto de gestión. Con esto se busca plantear de forma tangible un prototipo capaz de usarse en cualquier recurso hídrico y poder medir a pequeña escala la calidad del agua.

Limitaciones

El proyecto no completa una implementación fija, ni despliegue operativo de un sistema de campo, debido a restricciones por parte de permisos dentro de los cuerpos de agua, presupuestos económicos y procesos ambientales establecidos a nivel gubernamental. Por tal motivo tampoco se realizará una medición prolongada de los parámetros establecidos en la calidad del agua, ya que el alcance se centra en la etapa de diseño, y validación técnica del prototipo a generar.

Además, la investigación se enfoca exclusivamente en los aspectos técnicos de comunicación y trasmisión de datos por medios de telemetría, sin profundizar ni abarcar la calibración química o biológica de los sensores y datos recolectados. Las pruebas se limitarán al funcionamiento del sistema a nivel de laboratorio o entorno controlado.

Referencias

Amazon. (s. f.). *Imagen de producto*. https://m.media-amazon.com/images/I/61k4mOmFheL.jpg

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (s. f.). *Permiso marco de recolección de especímenes de investigación científica*. https://www.anla.gov.co/01_anla/permiso-marco-de-recoleccion-especimenes-investigacion-cientifica

Ariza Restrepo, J. L., Rodríguez, Y. J., & Oñate Barraza, H. C. (2024). *Tecnura*. https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/20052

Departamento Administrativo de la Función Pública. (2007). *Norma 30007*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007

DFRobot. (s. f.). *Sensor (datasheet)*. https://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/dfrobot%20pdfs/sen0189_web.pdf

Díaz Embus, Y. F., & Medina Valencia, D. C. (2025). *Documento académico*. https://publicaciones.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/8689/7870

Easybom. (s. f.). *Imagen de tecnologías inalámbricas*. https://files.easybom.com/blogimg/20220915/1663222161316.png

Farnell. (s. f.). *Datasheet de sensor*. https://www.farnell.com/datasheets/3161977.pdf

Fuentes Amín, O. C., & Romero Torres, M. E. (2024). *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. https://revistas.umng.edu.co/index.php/rfcb/article/view/7395

Gharaibeh, N. (2018). *DSS development and agile methods: Towards a new framework for software development methodology*. https://www.researchgate.net/publication/237196697

IDEAM. (2018). *Guía metodológica de variables meteorológicas*. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/mapa-de-procesos/m-gci-m-g002_guia_metodologica_de_la_operacion_estadistica_variables_meteorologicas.pdf

IDEAM. (2021). *Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua*. https://ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/publicaciones/protocolo_de_monitoreo_y_seguimiento_del_agua.pdf

IDEAM. (2023). *Boletín nacional de calidad del agua 2022*. https://ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/boletin_nacional_de_la_calidad_del_agua_2023.pdf

IDEAM. (2024). *Informe de gestión 2023*. https://www.car.gov.co/uploads/files/68654b98cef92.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *Informe calidad del aire 2021*. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/Informe%20Calidad%20del%20Aire%202021.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *Decreto 1376 de 2013*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Decreto-1376-de-2013.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Resolución 1207 de 2014*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/7.-Anexo-7-Resolucion-1207-de-2014.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Política de gestión sostenible del suelo*. https://www.andi.com.co/Uploads/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social. (2007). *Resolución 2115 de 2007*. https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resoluci%C3%B3n_2115_de_2007.pdf

Mouthon Bello, A., Blanco, B., Acevedo, M., & Miller, M. (2002). *Manual de seguimiento ambiental de proyectos*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Manual-de-seguimiento-ambiental-de-proyectos-2002.pdf

Naciones Unidas. (2015). *Agua y saneamiento*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/

Palco Electrónica. (s. f.). *Módulo de carga Li-ion*. https://www.palcoelectronica.es/energia/cargadores%20y%20convertidores/MODULOS%20DE%20CARAGA%20LI-ION.pdf

Sawers SRL. (2022). *Módulo PH-4502C*. https://s3.amazonaws.com/cdn.freshdesk.com/data/helpdesk/attachments/production/31038435366/original/ooqJDNizpfeYH_3UUP__vp80uhXF8mZEDw.png

Secretaría Distrital de Ambiente. (s. f.). *Indicador WQI*. https://ambientebogota.gov.co/indicador-wqi

TinyTronics BV. (s. f.). *Datasheet XL4015*. https://www.tinytronics.nl/product_files/003615_xl4015-datasheet.pdf

UNESCO. (2022). *Informe sobre el agua*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.pdf

Universidad de Pamplona. (s. f.). *Capítulo 3: Calidad del agua* [Documento académico].

U.S. Environmental Protection Agency. (s. f.). *Water quality standards handbook*. https://www.epa.gov/wqs-tech/water-quality-standards-handbook

Vásquez, J. (2024). *Pasarela IoT – LoRa para la medición remota de consumo de agua potable*.

World Health Organization. (2017). *Guía de calidad del agua*. https://iris.who.int/

Anexos

Como soporte técnico del prototipo diseñado, se ha dispuesto un repositorio en la plataforma GitHub que contiene el ecosistema digital del proyecto. En este espacio se alojan de manera organizada los componentes de software esenciales para la operación del sistema: la carpeta ARDUINOFILE contiene el firmware desarrollado para el microcontrolador LilyGO T-SIM7070G (ESP32), encargado de la captura y transmisión de datos vía LTE; el archivo flows.json integra la lógica de procesamiento en Node-RED, incluyendo el algoritmo del índice NSF-WQI y la interfaz del Dashboard; y finalmente, el archivo sensores.db representa la estructura de la base de datos SQLite para el almacenamiento de registros históricos. Este repositorio garantiza la trazabilidad, replicabilidad y consulta de los desarrollos realizados durante la investigación.

Enlace de acceso: https://github.com/humeapp/Tesis-Monitoreo-Calidad-Agua