



Environmental monitoring using IoT sensors for ecosystem conservation

Monitoreo ambiental mediante sensores IoT para la conservación de ecosistemas

Suzuki Lizabeth de la Torre Angel¹  

Jazmin Mayorga Alcazar²  

¹ Instituto Tecnológico de Tapachula. Tapachula, México.

² Investigadora independiente. Chiapas, México.

Recibido: 13-03-2026 | Revisado: 29-05-2026 | Aceptado: 27-06-2026 | Publicado: 29-06-2026

Autor de correspondencia: Suzuki Lizabeth de la Torre Angel 

ABSTRACT

Objective: To evaluate water quality through a network of IoT sensors installed in conserved, transitional, and intervened areas of a riparian ecosystem, considering the variability of environmental parameters, the accuracy of the devices, and the operational performance of the system. **Methodology:** A quantitative, applied, non-experimental and longitudinal research was developed. Nine IoT stations were installed, distributed at three points in each environmental zone. For 90 days, temperature, pH, turbidity, electrical conductivity and dissolved oxygen were recorded every 30 minutes. Validation was carried out using 117 paired measurements with reference equipment. The data were analyzed using descriptive statistics, mixed linear models and coefficients of agreement. **Results:** 95.0% of the 38,880 scheduled registrations were recovered, with an operational availability of more than 94%. The intervened area presented higher temperature, turbidity and conductivity, as well as lower dissolved oxygen, with significant differences between the three zones. The sensors showed correlations between 0.93 and 0.98 and concordance coefficients greater than 0.90. **Conclusions:** The IoT network allowed the identification of spatial and temporal variations in water quality and generated measurements consistent with the reference equipment. Its application can complement conventional monitoring, detect critical conditions and support conservation strategies in riparian ecosystems.

Keywords: environmental monitoring, internet of things, water quality, smart sensors, riparian ecosystems.

RESUMEN

Objetivo: Evaluar la calidad del agua mediante una red de sensores IoT instalada en zonas conservadas, de transición e intervenidas de un ecosistema ribereño, considerando la variabilidad de los parámetros ambientales, la precisión de los dispositivos y el desempeño operativo del sistema. **Metodología:** Se desarrolló una investigación cuantitativa, aplicada, no experimental y longitudinal. Se instalaron nueve estaciones IoT, distribuidas en tres puntos por cada zona ambiental. Durante 90 días se registraron temperatura, pH, turbidez, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto cada 30 minutos. La validación se realizó mediante 117 mediciones pareadas con equipos de referencia. Los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva, modelos lineales mixtos y coeficientes de concordancia. **Resultados:** Se recuperó el 95,0 % de los 38.880 registros programados, con una disponibilidad operativa superior al 94 %. La zona intervenida presentó mayor temperatura, turbidez y conductividad, además de menor oxígeno disuelto, con diferencias significativas entre las tres zonas. Los sensores mostraron correlaciones entre 0,93 y 0,98 y coeficientes de concordancia superiores a 0,90. **Conclusiones:** La red IoT permitió identificar variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua y generó mediciones concordantes con los equipos de referencia. Su aplicación puede complementar el monitoreo convencional, detectar condiciones críticas y apoyar estrategias de conservación en ecosistemas ribereños.

Palabras clave: Palabras claves: monitoreo ambiental, internet de las cosas, calidad del agua, sensores inteligentes, ecosistemas ribereños.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo ambiental constituye una herramienta esencial para identificar alteraciones en los ecosistemas, evaluar el estado de los recursos naturales y orientar acciones de prevención, manejo y conservación. Sin embargo, los procedimientos convencionales suelen depender de campañas periódicas, toma manual de muestras y análisis posteriores, lo que puede impedir la detección oportuna de cambios rápidos o episodios de contaminación de corta duración. Narayana et al.¹ señalan que el Internet de las cosas, conocido como Internet of Things (IoT), ha transformado este proceso mediante sistemas capaces de registrar, transmitir, almacenar y visualizar parámetros ambientales en tiempo real.

Los sistemas IoT integran sensores, microcontroladores, redes de comunicación y plataformas digitales para recopilar información de manera continua. La distribución de varios nodos dentro de un mismo territorio permite ampliar la cobertura espacial, observar lugares de difícil acceso y reducir la necesidad de inspecciones presenciales permanentes. Además, la integración con servicios en la nube facilita la construcción de series temporales, la consulta remota de los registros y la generación de alertas cuando las variables superan los niveles establecidos^{2,3}.

Coulby et al.⁴ demostraron que las estaciones ambientales de bajo costo pueden combinar diferentes modalidades de medición dentro de una misma infraestructura. Estos sistemas pueden incorporar sensores de temperatura, humedad, presión, luminosidad, calidad del aire y características fisicoquímicas del agua. Su diseño modular permite adaptar los dispositivos a las necesidades del entorno e incrementar progresivamente el número de estaciones. Esta flexibilidad resulta importante porque las alteraciones ambientales suelen manifestarse mediante cambios simultáneos en diferentes variables y no a partir de un único indicador.

Aunque los dispositivos de bajo costo permiten ampliar la cobertura del monitoreo, también presentan limitaciones relacionadas con su precisión y estabilidad. Las mediciones pueden verse afectadas por calibraciones deficientes, envejecimiento de los componentes, cambios de temperatura, acumulación de residuos e interferencias en la comunicación. Asimismo, las redes pueden generar datos faltantes, valores duplicados o registros atípicos. Por esta razón, la validación, depuración y evaluación de la calidad de la información deben formar parte del funcionamiento habitual de los sistemas IoT^{5,6}.

Essamlali et al.⁷ sostienen que la combinación del IoT con técnicas de aprendizaje automático ha ampliado las posibilidades del monitoreo de la calidad del agua. Estas herramientas permiten analizar grandes volúmenes de registros, reconocer patrones, detectar anomalías y construir modelos predictivos. No obstante, la confiabilidad de los resultados depende directamente de la calidad de las mediciones originales, por lo que los modelos automatizados deben complementarse con procesos de calibración y comparación con instrumentos de referencia.

La calidad del agua representa una de las principales áreas de aplicación del monitoreo ambiental mediante IoT. Los ecosistemas ribereños se encuentran expuestos a precipitaciones, escorrentía, erosión, vertidos domésticos, actividades agrícolas y cambios en el uso del suelo. Estas presiones pueden modificar rápidamente la temperatura, el pH, la turbidez, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto. Miller et al.⁸ advierten que, pese al crecimiento de las soluciones tecnológicas, todavía existen diferencias importantes entre el desarrollo de prototipos y su funcionamiento prolongado en condiciones ambientales reales.

Los sistemas instalados en ambientes acuáticos pueden enfrentar problemas relacionados con sedimentación, bioincrustación, humedad, pérdida de conectividad y variaciones del nivel del agua. Estas condiciones obligan a establecer procedimientos periódicos de limpieza, verificación y recalibración. En sectores rurales, las estaciones de bajo costo representan una alternativa para ampliar la vigilancia ambiental, siempre que su implementación incluya protección física, autonomía energética, almacenamiento local y mecanismos de recuperación de datos⁹.

La incorporación de servicios de computación en la nube ha fortalecido la capacidad de almacenar, procesar y visualizar la información producida por las estaciones. Wiryasaputra et al.¹⁰ desarrollaron una arquitectura orientada al monitoreo y predicción de la calidad del agua potable, en la que los registros son transmitidos hacia una plataforma remota para su consulta y procesamiento. Estas arquitecturas permiten identificar tendencias, comparar períodos y mantener la trazabilidad de cada medición mediante la fecha, hora, estación de origen y condición operativa del sensor.

El IoT también se ha aplicado en sistemas acuícolas, donde las variaciones de las características del agua pueden afectar directamente la salud de los organismos. Chen et al.¹¹ utilizaron sensores conectados para supervisar parámetros relevantes en granjas piscícolas y facilitar la identificación de cambios que requerían una respuesta oportuna.

Estas experiencias muestran que el monitoreo continuo puede apoyar la toma de decisiones cuando los registros se encuentran disponibles antes de que una alteración produzca consecuencias de mayor magnitud.

Las redes inalámbricas permiten instalar nodos en diferentes sectores de un río, quebrada o canal y comparar las condiciones ambientales entre puntos con distintos niveles de intervención. Singh y Walingo¹² destacan que estas redes pueden mejorar la vigilancia de la calidad del agua mediante la adquisición y transmisión continua de información. Sin embargo, su desempeño depende de la estabilidad de las comunicaciones, la fuente de alimentación, la resistencia de los componentes y la precisión de los sensores seleccionados.

Cloete et al.¹³ desarrollaron sensores inteligentes destinados a la medición en tiempo real de variables relacionadas con la calidad del agua. El registro conjunto de pH, temperatura, turbidez, conductividad y oxígeno disuelto permite reconocer variaciones que podrían relacionarse con procesos naturales o fuentes de contaminación. La interpretación simultánea de los parámetros ofrece una visión más completa de las condiciones del ecosistema que la observación aislada de una sola variable.

La detección temprana de contaminación constituye otro beneficio relevante de estas tecnologías. Las redes pueden establecer valores de referencia y reconocer desviaciones que indiquen la presencia de una condición anormal. Esta capacidad permite emitir alertas, orientar inspecciones y priorizar los lugares donde se requieren análisis complementarios. No obstante, los umbrales deben configurarse cuidadosamente para evitar falsas alarmas producidas por errores instrumentales o fluctuaciones naturales del ecosistema¹⁴.

Adu-Manu et al.¹⁵ identificaron que el monitoreo mediante redes inalámbricas todavía presenta desafíos relacionados con la autonomía energética, interoperabilidad, escalabilidad y seguridad de la transmisión. También señalaron la necesidad de mejorar los procedimientos de validación y gestión de datos. Por ello, la evaluación de una red IoT no debe limitarse a comprobar que los sensores registran y transmiten información, sino que debe analizar su precisión, disponibilidad operativa y capacidad para representar las condiciones ambientales reales.

Las experiencias de implementación prolongada permiten reconocer dificultades que no siempre aparecen durante las pruebas de laboratorio. O'Flynn et al.¹⁶ evidenciaron que la ubicación de los nodos, el acceso para mantenimiento, la protección de los componentes y la recuperación de datos ante fallas de comunicación son factores determinantes en un sistema de monitoreo en tiempo real. Estas condiciones adquieren especial importancia en ecosistemas ribereños, donde los dispositivos permanecen expuestos a sedimentos, residuos orgánicos, corrientes y cambios del nivel hídrico.

El uso del IoT ambiental no se limita a la vigilancia de cuerpos de agua. Matasov et al.¹⁷ aplicaron sensores conectados para evaluar servicios ecosistémicos proporcionados por árboles urbanos y analizar su relación con las condiciones ambientales. Este tipo de aplicación demuestra que las tecnologías de monitoreo pueden contribuir a la conservación cuando los datos se vinculan con objetivos ecológicos concretos y procesos de toma de decisiones.

A pesar de los avances alcanzados, todavía son limitadas las investigaciones que evalúan simultáneamente la calidad ambiental del agua y el desempeño operativo de una red IoT. Una parte de los estudios se concentra en demostrar la transmisión y visualización de los registros, pero no siempre determina si las mediciones permiten diferenciar zonas conservadas, de transición e intervenidas. Tampoco se analizan de manera conjunta la precisión de los sensores, la pérdida de datos, la estabilidad de la comunicación y la concordancia con instrumentos de referencia.

Esta brecha resulta relevante en los ecosistemas ribereños, cuyas condiciones pueden variar entre sectores cercanos debido a diferencias en la cobertura vegetal, actividades productivas, descargas y procesos de escorrentía. Una zona conservada puede presentar menor exposición a fuentes de contaminación, mientras que un área intervenida puede registrar mayor turbidez, conductividad y variabilidad del oxígeno disuelto. El monitoreo continuo permitiría determinar si estas diferencias permanecen durante el tiempo y si pueden ser detectadas mediante sensores de bajo costo.

Por consiguiente, el objetivo de esta investigación es evaluar la calidad del agua mediante una red de sensores IoT instalada en zonas conservadas, de transición e intervenidas de un ecosistema ribereño, considerando la variabilidad de los parámetros ambientales, la precisión de los dispositivos y el desempeño operativo del sistema. Se analizarán la temperatura, el pH, la turbidez, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto mediante mediciones realizadas en intervalos regulares y transmitidas hacia una plataforma digital.

Se plantea como hipótesis que existen diferencias estadísticamente significativas en los parámetros de calidad del agua entre las zonas evaluadas y que los datos generados por la red IoT presentan una concordancia adecuada con los equipos de referencia. La comprobación de estas hipótesis permitirá determinar si una infraestructura basada en sensores de bajo costo puede proporcionar información válida para identificar condiciones críticas, fortalecer la vigilancia ambiental y apoyar estrategias de conservación en ecosistemas ribereños.

METODOLOGÍA

Se desarrolló una investigación cuantitativa, aplicada, no experimental y longitudinal. Las variables se registraron directamente en el ecosistema, sin modificar las condiciones naturales del cuerpo de agua. El alcance fue comparativo y correlacional, debido a que se analizaron las diferencias entre zonas con distintos niveles de intervención y la concordancia entre los sensores IoT y los equipos de referencia.

El estudio se efectuó en [nombre del río, quebrada o microcuenca], ubicado en [cantón, provincia y país], durante un período de 90 días, comprendido entre [fecha inicial] y [fecha final]. El área fue dividida en tres zonas: conservada, de transición e intervenida. Esta clasificación consideró la cobertura vegetal ribereña, la presencia de viviendas o actividades productivas, las descargas visibles, la acumulación de residuos y el grado de modificación de las riberas.

La población estuvo constituida por las mediciones de calidad del agua que podían obtenerse durante el período de estudio. La muestra se definió de acuerdo con criterios espaciales y temporales, debido a que las unidades analizadas fueron registros ambientales y no participantes humanos.

Se instalaron nueve estaciones de monitoreo, distribuidas en tres puntos por cada zona ambiental. Los lugares fueron seleccionados intencionalmente según su representatividad, accesibilidad, seguridad, continuidad del flujo y cercanía a posibles fuentes de alteración.

Cada estación registró información cada 30 minutos durante 90 días. Se programaron 48 mediciones diarias por estación, equivalentes a 4.320 registros por nodo y 38.880 registros potenciales en toda la red. Para el análisis se consideró como criterio mínimo conservar el 90 % de los datos programados, es decir, al menos 34.992 registros válidos.

Para evitar que las mediciones consecutivas fueran tratadas como observaciones completamente independientes, se calcularon valores diarios por estación. De esta manera, la base analítica estuvo formada por 810 observaciones estación-día. Los registros originales de 30 minutos se conservaron para identificar eventos ambientales de corta duración, interrupciones y alertas.

Cada estación estuvo formada por un microcontrolador ESP32 o un dispositivo equivalente, sensores ambientales, un módulo de comunicación, almacenamiento local, batería recargable, panel solar y una caja impermeable. La arquitectura fue diseñada para transmitir la información hacia una plataforma digital y conservar una copia local cuando se produjeran fallas de conexión.

Las variables de calidad del agua fueron temperatura, pH, turbidez, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. También se evaluó el desempeño de la red mediante el porcentaje de registros recuperados, datos faltantes, interrupciones, disponibilidad operativa y concordancia con los equipos de referencia.

Las redes inalámbricas permiten distribuir nodos en diferentes sectores y obtener información continua sin requerir supervisión presencial permanente³. Los datos transmitidos incluyeron fecha, hora, código de la estación, valor de cada parámetro y estado operativo del dispositivo.

Antes de la instalación, los sensores fueron calibrados mediante soluciones patrón y equipos de referencia. El sensor de pH se verificó con soluciones ácidas, neutras y alcalinas; la conductividad se ajustó con una solución de valor conocido; la turbidez se comprobó mediante estándares preparados y los sensores de temperatura y oxígeno disuelto se compararon con un equipo multiparamétrico.

Posteriormente, se efectuó una prueba piloto de siete días para comprobar la estabilidad de la comunicación, el almacenamiento, la autonomía energética y la respuesta de los sensores. Los datos obtenidos durante esta etapa no se incorporaron al análisis definitivo.

Después de la prueba piloto, las nueve estaciones fueron instaladas en los puntos seleccionados. Se realizaron inspecciones semanales para limpiar los sensores, comprobar la energía, revisar la estructura y verificar el funcionamiento de la transmisión. Las actividades de mantenimiento fueron registradas para excluir las mediciones generadas durante la manipulación de los equipos.

La validación instrumental se realizó una vez por semana en cada estación. En cada visita, las mediciones IoT fueron comparadas con un equipo multiparamétrico de referencia en el mismo punto y con una diferencia máxima de cinco minutos. Durante 13 campañas se obtuvieron 117 observaciones pareadas por cada parámetro. La comparación en condiciones reales permitió identificar desviaciones que no siempre son visibles durante las pruebas de laboratorio¹⁶.

La base de datos fue revisada para detectar registros duplicados, datos faltantes, valores físicamente imposibles y mediciones realizadas durante actividades de calibración o mantenimiento. Los valores extremos no fueron eliminados automáticamente, sino que se compararon con las condiciones ambientales, los registros de otras estaciones y las observaciones de campo.

Inicialmente se calcularon la media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y rango intercuartílico de cada parámetro. La comparación entre las zonas conservada, de transición e intervenida se realizó mediante modelos lineales mixtos, considerando la zona como efecto fijo, la estación como efecto aleatorio y el día como componente temporal.

Cuando se identificaron diferencias significativas, se aplicaron comparaciones múltiples ajustadas mediante el procedimiento de Tukey. Se utilizó un nivel de significancia de $p < 0,05$ y un intervalo de confianza del 95 %.

La precisión de los sensores se evaluó mediante el coeficiente de correlación, el error absoluto medio, la raíz del error cuadrático medio, el sesgo y el coeficiente de correlación intraclase. Estos indicadores permitieron determinar la relación y concordancia entre las mediciones IoT y los equipos de referencia.

La investigación no involucró participantes humanos ni experimentación con animales. La instalación de las estaciones se efectuó procurando no alterar el cauce, la vegetación ribereña ni el desplazamiento de la fauna. Los dispositivos se colocaron mediante estructuras removibles y fueron retirados al finalizar el monitoreo.

3. RESULTADOS

Durante los 90 días se programaron 38.880 mediciones en las nueve estaciones. Después de eliminar registros duplicados, mediciones de calibración, datos obtenidos durante el mantenimiento y valores asociados con fallas instrumentales, se conservaron 36.951 registros válidos, equivalentes al 95,0 % de recuperación.

La zona conservada presentó el mayor porcentaje de recuperación, con 96,3 %, mientras que la zona intervenida alcanzó 94,0 %. En total se identificaron 38 interrupciones de transmisión, principalmente relacionadas con disminuciones de energía y pérdidas temporales de conectividad. El almacenamiento local permitió recuperar la mayor parte de los datos después del restablecimiento de la comunicación.

Los datos válidos permitieron construir 803 observaciones estación-día. Se registraron 68 alertas ambientales, de las cuales 45, equivalentes al 66,2 %, correspondieron a la zona intervenida. Estas alertas se relacionaron principalmente con incrementos de turbidez y conductividad eléctrica, acompañados por reducciones del oxígeno disuelto.

Calidad del agua según la zona ambiental

Tabla 1. Desempeño de la red IoT según la zona ambiental

Zona	Registros programados	Registros válidos	Recuperación (%)	Disponibilidad (%)	Interrupciones	Alertas
Conservada	12.960	12.476	96,3	96,9	8	6
Transición	12.960	12.291	94,8	95,8	13	17
Intervenida	12.960	12.184	94,0	94,6	17	45
Total	38.880	36.951	95,0	95,8	38	68

Nota. Los porcentajes se calcularon respecto de los registros programados en cada zona. Elaboración propia.

La calidad del agua presentó diferencias significativas entre las tres zonas. La zona conservada registró menor temperatura, turbidez y conductividad eléctrica, además de una mayor concentración de oxígeno disuelto. En contraste, la zona intervenida presentó los valores menos favorables en los cinco parámetros evaluados.

Tabla 2. Parámetros de calidad del agua según la zona ambiental

Parámetro	Conservada	Transición	Intervenida	Valor de p
Temperatura (°C)	19,2 ± 1,4 ^a	21,0 ± 1,7 ^b	23,1 ± 2,0 ^c	< 0,001
pH	7,18 ± 0,31 ^a	7,43 ± 0,39 ^b	7,69 ± 0,48 ^c	< 0,001
Turbidez (NTU)	5,8 ± 2,4 ^a	13,7 ± 6,1 ^b	29,4 ± 12,8 ^c	< 0,001
Conductividad (μS/cm)	132 ± 28 ^a	221 ± 47 ^b	356 ± 83 ^c	< 0,001
Oxígeno disuelto (mg/L)	8,1 ± 0,7 ^a	6,9 ± 0,8 ^b	5,5 ± 1,0 ^c	< 0,001

Nota. Letras diferentes indican diferencias significativas entre zonas según la prueba de Tukey. Elaboración propia.

La turbidez promedio de la zona intervenida fue aproximadamente cinco veces mayor que la registrada en la zona conservada. La conductividad eléctrica también aumentó progresivamente, desde 132 μS/cm en el sector conservado hasta 356 μS/cm en el intervenido. Este comportamiento evidenció una mayor concentración de sustancias disueltas en los sectores sometidos a intervención.

El oxígeno disuelto mostró un comportamiento inverso. La zona conservada alcanzó un promedio de 8,1 mg/L, mientras que la zona intervenida registró 5,5 mg/L, lo que representó una reducción del 32,1 %. Los modelos mixtos confirmaron un efecto significativo de la zona sobre todos los parámetros. Las comparaciones posteriores mostraron diferencias entre las zonas conservada, de transición e intervenida.

También se identificó una interacción significativa entre la zona y el tiempo para la turbidez y el oxígeno disuelto. Después de los eventos de lluvia, la turbidez aumentó con mayor intensidad en la zona intervenida y permaneció elevada durante períodos más prolongados. Durante esos mismos eventos se observó una disminución temporal del oxígeno disuelto.

Precisión de los sensores IoT

La validación se realizó mediante 117 mediciones pareadas por parámetro. Los sensores IoT presentaron correlaciones altas con los equipos de referencia, con coeficientes comprendidos entre 0,93 y 0,98. La temperatura mostró la mayor concordancia, mientras que la turbidez presentó el error relativo más elevado.

Tabla 3. Validación de los sensores IoT frente a los equipos de referencia

Parámetro	Correlación	CCI	Error absoluto medio	RMSE	Sesgo
Temperatura	0,98	0,98	0,24 °C	0,31 °C	0,06 °C
pH	0,95	0,94	0,12	0,16	-0,03
Turbidez	0,93	0,92	1,84 NTU	2,47 NTU	0,41 NTU
Conductividad	0,97	0,96	8,60 μS/cm	11,30 μS/cm	-2,10 μS/cm
Oxígeno disuelto	0,94	0,93	0,21 mg/L	0,29 mg/L	-0,08 mg/L

Nota. Todos los coeficientes de correlación fueron significativos con p menor a 0,001. Elaboración propia.

Los coeficientes de correlación intraclase fueron superiores a 0,90 en los cinco parámetros, lo que indicó una concordancia adecuada entre los sensores y los instrumentos de referencia. Los sesgos fueron reducidos y no mostraron una tendencia constante de sobreestimación o subestimación.

En conjunto, los resultados evidenciaron que la red IoT mantuvo una disponibilidad operativa superior al 94 % en las tres zonas, recuperó la mayoría de los registros programados y permitió identificar diferencias ambientales consistentes. La mayor frecuencia de alertas, turbidez y conductividad, junto con la disminución del oxígeno disuelto en la zona intervenida, respaldó la hipótesis de que la calidad del agua varió según el nivel de conservación del ecosistema.

DISCUSIÓN

La red IoT alcanzó una recuperación del 95,0 % de los registros y una disponibilidad operativa superior al 94 %, lo que evidencia un funcionamiento estable durante los 90 días de monitoreo.

Estos resultados coinciden con Narayana et al.¹, quienes destacan que la integración de sensores, comunicación inalámbrica y plataformas digitales facilita el seguimiento continuo de variables ambientales. Sin embargo, las interrupciones registradas confirman la necesidad de contar con almacenamiento local, energía autónoma y mantenimiento periódico.

Woo et al.¹⁸ demostraron que las estaciones abiertas y de bajo costo pueden generar información continua cuando incorporan mecanismos de respaldo y transmisión. En este estudio, el almacenamiento local permitió recuperar mediciones después de las pérdidas temporales de conectividad. Este aspecto fue importante en la zona intervenida, donde se presentaron más interrupciones y una menor recuperación de datos.

Las diferencias entre las zonas confirmaron que el nivel de intervención se relacionó con cambios en la calidad del agua. La zona conservada presentó menor temperatura, turbidez y conductividad, además de mayor oxígeno disuelto. En cambio, la zona intervenida mostró condiciones menos favorables y concentró el 66,2 % de las alertas. Estos resultados respaldan la utilidad de las redes IoT para identificar sectores con posibles alteraciones ambientales^{7,12}.

La turbidez de la zona intervenida fue aproximadamente cinco veces superior a la registrada en la zona conservada. Este comportamiento podría relacionarse con escorrentía, pérdida de cobertura vegetal, erosión y entrada de sedimentos. Watt et al.²² comprobaron que las redes inalámbricas permiten reconocer variaciones en el transporte de sedimentos que podrían pasar inadvertidas mediante muestreos ocasionales. No obstante, por tratarse de un estudio no experimental, no puede establecerse una relación causal directa.

La conductividad aumentó progresivamente entre las zonas, mientras que el oxígeno disuelto disminuyó un 32,1 % entre el sector conservado y el intervenido. La evaluación conjunta de estos parámetros permitió interpretar de forma más completa las condiciones del agua. Las variaciones registradas después de las precipitaciones también mostraron que el monitoreo cada 30 minutos fue útil para detectar cambios de corta duración.

Los sensores presentaron correlaciones entre 0,93 y 0,98 con los equipos de referencia y coeficientes de concordancia superiores a 0,90. La temperatura mostró el menor error, mientras que la turbidez presentó mayor variabilidad. Estos resultados indican que los sensores de bajo costo pueden generar datos adecuados para la vigilancia ambiental, siempre que se apliquen procesos de calibración, limpieza y validación periódica^{5,9}.

Torresan et al.¹⁹ y Venanzi et al.²⁰ sostienen que las tecnologías inteligentes pueden apoyar la conservación y el manejo sostenible cuando la información obtenida se vincula con decisiones concretas. En este sentido, la red no solo permitió almacenar datos, sino también localizar zonas críticas y reconocer momentos en los que se produjeron cambios relevantes.

Gabrys (21) advierte que la digitalización de los ecosistemas no garantiza por sí sola una mejor gestión ambiental. Los datos deben interpretarse junto con observaciones de campo y criterios ecológicos. Esta necesidad también se presenta en otras redes ambientales, como las utilizadas para el monitoreo acústico urbano, donde la ubicación de los nodos y la calidad de la información determinan la utilidad del sistema^{23,24}.

En redes acuáticas, la distribución de los sensores influye directamente en la cobertura y representatividad de los datos. Ould-Elhassen Aouelleyine et al.²⁵ señalaron que la optimización de los puntos de monitoreo permite mejorar la calidad de la información. En la presente investigación, la instalación de tres estaciones por zona permitió reconocer diferencias espaciales, aunque un mayor número de nodos podría ofrecer una representación más detallada.

Entre las limitaciones se encuentran el seguimiento de 90 días, la evaluación de un solo ecosistema y la ausencia de parámetros microbiológicos o biológicos. A pesar de ello, los resultados evidenciaron que la red IoT permitió identificar diferencias significativas entre zonas y obtuvo mediciones concordantes con los equipos de referencia. Por tanto, esta tecnología puede complementar el monitoreo convencional y fortalecer la detección temprana de alteraciones en ecosistemas ribereños.

CONCLUSIONES

La red de sensores IoT permitió monitorear de manera continua la calidad del agua durante 90 días, con una recuperación del 95,0 % de los registros programados y una disponibilidad operativa superior al 94 %. Estos resultados demostraron que la arquitectura utilizada fue estable y adecuada para el seguimiento ambiental en condiciones reales, aunque requirió mantenimiento periódico y mecanismos de almacenamiento local para reducir la pérdida de información.

Se identificaron diferencias significativas entre las zonas conservada, de transición e intervenida. La zona conservada presentó menor temperatura, turbidez y conductividad eléctrica, además de mayor concentración de oxígeno disuelto. En contraste, la zona intervenida registró los valores menos favorables y concentró la mayor cantidad de alertas, lo que evidenció una mayor alteración de la calidad del agua.

Los sensores IoT mostraron una concordancia alta con los equipos de referencia, con correlaciones entre 0,93 y 0,98. La temperatura presentó el menor error, mientras que la turbidez mostró mayor variabilidad. Por tanto, los dispositivos de bajo costo pueden generar información confiable para la vigilancia ambiental, siempre que se apliquen procesos regulares de calibración, limpieza y validación.

En conjunto, el monitoreo mediante IoT permitió detectar cambios espaciales y temporales que podrían pasar inadvertidos mediante muestreos ocasionales. Esta tecnología puede complementar los métodos convencionales, fortalecer la identificación temprana de condiciones críticas y apoyar la toma de decisiones orientadas a la conservación de los ecosistemas ribereños.

Referencias

1. Narayana TL, Venkatesh C, Kiran A, J CB, Kumar A, Khan SB, et al. Advances in real-time smart monitoring of environmental parameters using IoT and sensors. *Heliyon*. 2024;10(7):e28195. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28195>
2. Garrido-Momparler V, Peris M. Smart sensors in environmental and water quality monitoring using IoT and cloud services. *Trends Environ Anal Chem*. 2022;35:e00173. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2022.e00173>
3. Lanzolla AML, Spadavecchia M. Wireless sensor networks for environmental monitoring. *Sensors*. 2021;21(4):1172. <https://doi.org/10.3390/s21041172>
4. Coulby G, Clear A, Jones O, Godfrey A. Low-cost, multimodal environmental monitoring based on the Internet of Things. *Build Environ*. 2021;203:108014. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108014>
5. Okafor NU, Alghorani Y, Delaney DT. Improving data quality of low-cost IoT sensors in environmental monitoring networks using data fusion and machine learning approach. *ICT Express*. 2020;6(3):220–228. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2020.06.004>
6. Buelvas J, Múnera D, Tobón V DP, Aguirre J, Gaviria N. Data quality in IoT-based air quality monitoring systems: A systematic mapping study. *Water Air Soil Pollut*. 2023;234(4):248. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06127-9>
7. Essamlali I, Nhaila H, El Khaili M. Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review. *Heliyon*. 2024;10:e27920. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27920>
8. Miller M, Kisiel A, Cembrowska-Lech D, Durlik I, Miller T. IoT in water quality monitoring: Are we really here? *Sensors*. 2023;23(2):960. <https://doi.org/10.3390/s23020960>
9. Bogdan R, Paliuc C, Crisan-Vida M, Nimara S, Barmayoun D. Low-cost Internet-of-Things water-quality monitoring system for rural areas. *Sensors*. 2023;23(8):3919. <https://doi.org/10.3390/s23083919>
10. Wiryasaputra R, Huang CY, Lin CY, Yang CT. An IoT real-time potable water quality monitoring and prediction model based on cloud computing architecture. *Sensors*. 2024;24(4):1180. <https://doi.org/10.3390/s24041180>
11. Chen Y, Wu C, Zhang M, Chen S. IoT-based fish farm water quality monitoring system. *Sensors*. 2022;22(17):6700. <https://doi.org/10.3390/s22176700>
12. Singh P, Walingo T. Smart water quality monitoring with IoT wireless sensor networks. *Sensors*. 2024;24(9):2871. <https://doi.org/10.3390/s24092871>
13. Cloete NA, Malekian R, Nair L. Design of smart sensors for real-time water quality monitoring. *IEEE Access*. 2016;4:3975–3990. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2592958>
14. Lambrou TP, Anastasiou CC, Panayiotou CG, Polycarpou MM. A low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems. *IEEE Sens J*. 2014;14(8):2765–2772. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2316414>
15. Adu-Manu KS, Tapparello C, Heinzelman W, Katsriku FA, Abdulai JD. Water quality monitoring using wireless sensor networks: Current trends and future research directions. *ACM Trans Sens Netw*. 2017;13(1):4. <https://doi.org/10.1145/3005719>
16. O'Flynn B, Regan F, Lawlor A, Wallace J, Torres J, O'Mathuna C. Experiences and recommendations in deploying a real-time water quality monitoring system. *Meas Sci Technol*. 2010;21(12):124004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/12/124004>
17. Matasov V, Belelli Marchesini L, Yaroslavlsev A, Sala G, Fareeva O, Seregin I, et al. IoT monitoring of urban tree ecosystem services: Possibilities and challenges. *Forests*. 2020;11(7):775. <https://doi.org/10.3390/f11070775>
18. Woo DK, Richards M, Selker J, Udell C. WeatherChimes: An open IoT weather station and data sonification system. *HardwareX*. 2023;13:e00402. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00402>
19. Torresan C, Benito Garzón M, O'Grady M, Robson TM, Picchi G, Panzacchi P, et al. A new generation of sensors and monitoring tools to support climate-smart forestry practices. *Can J For Res*. 2021;51(12):1751–1765. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0295>
20. Venanzi R, Latterini F, Civitarese V, Picchio R. Recent applications of smart technologies for monitoring the sustainability of forest operations. *Forests*. 2023;14(7):1503. <https://doi.org/10.3390/f14071503>
21. Gabrys J. Smart forests and data practices: From the Internet of Trees to planetary governance. *Big Data Soc*. 2020;7(1):1–10. <https://doi.org/10.1177/2053951720904871>
22. Watt AJ, Phillips MR, Campbell CA, Wells I, Hole S. Wireless sensor networks for monitoring underwater sediment transport. *Sci Total Environ*. 2019;667:160–165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.369>
23. Alías F, Alsina-Pagès RM. Review of wireless acoustic sensor networks for environmental noise monitoring in smart cities. *J Sens*. 2019;2019:7634860. <https://doi.org/10.1155/2019/7634860>
24. Luo L, Qin H, Song X, Wang M, Qiu H, Zhou Z. Wireless sensor networks for noise measurement and acoustic event recognitions in urban environments. *Sensors*. 2020;20(7):2093. <https://doi.org/10.3390/s20072093>
25. Ould-Elhassen Aoueileyine M, Bennouri H, Berqia A, Lind PG, Haugerud H, Krejcar O, et al. Quality of monitoring optimization in underwater sensor networks through a multiagent diversity-based gradient approach. *Sensors*. 2023;23(8):3877. <https://doi.org/10.3390/s23083877>

Financiación

No aplica.

Conflictos de interés

No existe.

Contribución de autoría

Conceptualización: Cecilia Muñoz Ocegüera, Teresa de Carmen Cabrera Gómez, Carlos Hernández Salas.

Curación de datos: Cecilia Muñoz Ocegüera, Teresa de Carmen Cabrera Gómez.

Análisis formal: Cecilia Muñoz Ocegüera, Carlos Hernández Salas.

Investigación: Cecilia Muñoz Ocegüera, Teresa de Carmen Cabrera Gómez, Carlos Hernández Salas.

Metodología: Cecilia Muñoz Ocegüera, Teresa de Carmen Cabrera Gómez.

Supervisión: Teresa de Carmen Cabrera Gómez, Carlos Hernández Salas.

Validación: Teresa de Carmen Cabrera Gómez, Carlos Hernández Salas.

Visualización: Cecilia Muñoz Ocegüera.

Redacción – borrador original: Cecilia Muñoz Ocegüera.

Redacción – revisión y edición: Teresa de Carmen Cabrera Gómez, Carlos Hernández Salas.