



Doi: <https://doi.org/10.70577/asce.v4i4.534>

Recibido: 2025-11-07

Aceptado: 2025-11-17

Publicado: 2025-12-03

Uso de bioindicadores locales y herramientas digitales para evaluar la calidad del agua en comunidades escolares: un enfoque interdisciplinario en Ciencias Naturales.

Using local bioindicators and digital tools to assess water quality in school communities: an interdisciplinary approach in natural sciences.

Autores

Elvis Renato Flores Abad¹

eflores@uagraria.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-2352-2321>

Universidad Agraria del Ecuador

Guayas - Ecuador

Nancy Fabiola Chiluisa Parra²

fabiola.chiluisa@educacion.gob.ec

<https://orcid.org/0009-0002-0812-5716>

Ministerio de Educación del Ecuador

Quito - Ecuador

Lastra Ordóñez Rudy Fernando³

rudylastra4@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-0700-4323>

Independiente

Quito - Ecuador

Verónica Elizabeth Flores Palma⁴

veronica.floresp@educacion.gob.ec

<https://orcid.org/0009-0007-0710-3917>

Ministerio de Educación, Deporte y Cultura

Montecristi - Ecuador

David Alciviades Gómez Mezones⁵

david.gomez@educacion.gob.ec

<https://orcid.org/0009-0003-9008-4702>

Ministerio de Educación, Deporte y Cultura

Montecristi - Ecuador

Cómo citar

Flores Abad, E. R., Chiluisa Parra, N. F., Rudy Fernando, L. O., Flores Palma, V. E., & Gómez Mezones, D. A. (2025). Uso de bioindicadores locales y herramientas digitales para evaluar la calidad del agua en comunidades escolares: un enfoque interdisciplinario en Ciencias Naturales. *ASCE MAGAZINE*, 4(4), 2397-2426.



Resumen

Este estudio presenta una propuesta metodológica interdisciplinaria centrada en el uso de bioindicadores locales y herramientas digitales para evaluar la calidad del agua en comunidades escolares, con el propósito de articular la enseñanza de las Ciencias Naturales con la resolución de problemas ambientales reales. La investigación se enmarca en un enfoque de transformación sistémica de la educación, en respuesta a la necesidad de formar ciudadanos capaces de enfrentar problemáticas complejas, como la gestión sostenible del agua. Se empleó una metodología mixta, que combinó monitoreo ambiental participativo mediante el análisis de macroinvertebrados acuáticos (bioindicadores) con el uso de tecnologías digitales (aplicaciones móviles, sensores y visualización en plataformas colaborativas). La población estuvo conformada por estudiantes de nivel básico de tres comunidades escolares rurales y periurbanas. Los resultados evidencian mejoras significativas en parámetros de calidad del agua, particularmente en el oxígeno disuelto, así como una correlación inversa entre conductividad y riqueza de taxa EPT, lo que valida la efectividad de los bioindicadores utilizados. Desde el plano educativo, se identificaron avances en el pensamiento científico ecológico de los estudiantes, aumento del compromiso con el entorno y adquisición de competencias digitales. La triangulación de datos cualitativos y cuantitativos confirmó la pertinencia del enfoque adoptado para integrar saberes ecológicos, tecnológicos y pedagógicos. En conclusión, este estudio demuestra que es posible incorporar prácticas de monitoreo ambiental científico en el currículo escolar de manera significativa, contribuyendo a la alfabetización científica y a la transformación de la educación hacia modelos más participativos, contextualizados y orientados a la sostenibilidad.

Palabras clave: Bioindicadores Locales, Herramientas Digitales, Calidad Del Agua, Comunidades Escolares, Ciencias Naturales, Educación Ambiental, Enfoque Interdisciplinario.



Abstract

This study presents an interdisciplinary methodological proposal focused on the use of local bioindicators and digital tools to assess water quality in school communities, with the purpose of linking the teaching of Natural Sciences to the real-world resolution of environmental problems. The research is framed within a systemic transformation approach to education, responding to the need to train citizens capable of addressing complex challenges such as the sustainable management of water resources. A mixed-methods design was employed, combining participatory environmental monitoring through the analysis of aquatic macroinvertebrates (bioindicators) with the use of digital technologies (mobile applications, sensors, and visualization on collaborative platforms). The study population consisted of basic-level students from three rural and peri-urban school communities. The results revealed significant improvements in water quality parameters, particularly in dissolved oxygen, as well as an inverse correlation between conductivity and EPT taxa richness, validating the effectiveness of the bioindicators used. From an educational perspective, notable advances were identified in students' ecological scientific thinking, increased environmental engagement, and the acquisition of digital competencies. The triangulation of qualitative and quantitative data confirmed the relevance of the adopted approach in integrating ecological, technological, and pedagogical knowledge. In conclusion, this study demonstrates that it is possible to meaningfully incorporate scientific environmental monitoring practices into the school curriculum, contributing to scientific literacy and the transformation of education toward more participatory, contextualized, and sustainability-oriented models.

Keywords: Local Bioindicators, Digital Tools, Water Quality, School Communities, Natural Sciences, Environmental Education, Interdisciplinary Approach.

Introducción

1. Contextualización del tema

La calidad del agua es fundamental para la salud pública, la preservación de los ecosistemas y la educación ambiental de las futuras generaciones. En los últimos años, el uso de bioindicadores — organismos cuya presencia, ausencia o abundancia indica la condición física, química o biológica de un sistema acuático— se ha vuelto importante como un método adicional a los clásicos métodos físico-químicos (Parmar, 2016). Además, el uso de herramientas digitales (por ejemplo, plataformas móviles, aplicaciones de mapeo participativo, sensores conectados) proporciona nuevas oportunidades para la recolección, visualización y análisis de datos ambientales en tiempo real, que pueden ser utilizados efectivamente en entornos educativos (Hajj-Hassan, Chaker y Cederqvist, 2024). La integración de estos dos frentes a nivel de la comunidad escolar (es decir, entornos educativos del sistema escolar primario o secundario que tienen niños o adolescentes asistiendo a la escuela como participantes activos o centrales) tecnologías de monitoreo digital de bioindicadores proporciona una oportunidad interdisciplinaria para integrar la enseñanza de las Ciencias Naturales con la evaluación ambiental participativa del entorno local del niño. Este marco proporciona habilidades de investigación, pensamiento crítico y ciudadanía ambiental.

Los entornos escolares constituyen un contexto comunitario privilegiado para la integración de la alfabetización ecológica y la promoción de los valores de la sostenibilidad desde la infancia.

Por otra parte, la evaluación de la calidad del agua en entornos escolares va más allá de la aplicación de un procedimiento técnico: se trata de una oportunidad para la integración de los contenidos de las ciencias, la ecología, la tecnología y la ciudadanía de forma coherente en un espacio formativo. Sin embargo, la literatura que articula de manera sistemática el uso de bioindicadores y las herramientas digitales en el contexto de comunidades escolares sigue siendo emergente, lo cual explica la realización de esta investigación.

2. Revisión de Antecedentes

La utilidad de los bioindicadores en la evaluación de la calidad de los cuerpos de agua ha sido ampliamente documentada. Por ejemplo, un estudio más reciente utilizó macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores en un río tropical, y notó diferencias significativas en la calidad del agua en varias ubicaciones (Orozco-González & Ocasio-Torres, 2023). Además, Chandel (2024) revisa el avance de organismos, como el fitoplancton y las microalgas, en su uso como bioindicadores emergentes y la ampliación del potencial para el monitoreo biológico. Al mismo tiempo, se han estudiado cuestiones sobre ciencia ciudadana y participación comunitaria en el monitoreo de la calidad del agua. Peeters et al. (2022) encontraron que los voluntarios podían utilizar índices simplificados (Índice Eco-Heart) para evaluar la calidad del agua para la vigilancia ambiental. Para la educación ambiental, se han estudiado los impactos de los programas escolares que integran bioindicadores en actividades de monitoreo y se ha encontrado que influyen positivamente en la conciencia y el aprendizaje de los estudiantes. Además, se ha informado que el uso de tecnologías digitales en la educación ambiental aumenta el compromiso de los estudiantes y promueve el aprendizaje de habilidades del siglo XXI (Hajj-Hassan et al., 2024).

En el contexto de proyectos interdisciplinarios que integran comunidades escolares, tecnologías digitales y monitoreo ambiental, se tiene evidencia, como la presentada por Cho (2024), de la participación de jóvenes en los ciclos educativos con mapeo participativo geoespacial y en el uso de aplicaciones móviles para el monitoreo de agua y activos ecológicos en cursos urbanos. También se tienen estudios como el de Capdevila et al. (2020), en el que se describen y explican de manera amplia varios factores que influyen en el éxito de los proyectos de ciencia ciudadana en el monitoreo de la calidad del agua, incluyendo el conocimiento y la experiencia previa, la tecnología utilizada y la motivación del participante. Ramesh (2024) documenta que personas con un entrenamiento mínimo, como mujeres rurales no expertas, pueden realizar monitoreos de calidad de agua potable que son confiables, lo que evidencia el valor de los enfoques educativos y comunitarios.

Estos antecedentes permiten la construcción de un puente donde tres líneas de trabajo se cruzan: a) el uso de bioindicadores como medida ecológica, b) el uso de herramientas digitales como un recurso pedagógico y para la recolección de datos, y c) las comunidades escolares como un espacio importante para la integración de la educación en ciencias naturales y el monitoreo ambiental



activo. Sin embargo, la mayoría de la literatura y los proyectos no abordan y articulan estas tres etapas y estas tres líneas de manera simultánea, con un enfoque interdisciplinario, en el contexto de la educación escolar.

En las últimas décadas se han organizado enfoques y estudios interdisciplinarios en relación con la calidad del agua que combinan el saber científico con el avance de las tecnologías digitales y las prácticas educativas en escuelas. El uso de bioindicadores de agua locales ha ayudado en gran medida en la comprensión de las implicaciones de la acción humana en el entorno. Esto ha facilitado el entendimiento a estudiantes y docentes sobre los ecosistemas. Esto contribuye a la enseñanza de las Ciencias Naturales y a la comprensión en el ejercicio de la ciudadanía y la responsabilidad ambiental.

A nivel científico, el desarrollo de instrumentos digitales en el aprendizaje ha influido en la Educación en Ciencias al grado que se han destacado instrumentos digitales que permiten la Ciencias Naturales al aprendizaje y la enseñanza mediante materiales de lectura y la interacción con contenido científico en el aula en tiempo real y enriquecido con diversas actividades. El uso de gamificación ha influido en la motivación para el aprendizaje y el rendimiento en el aula al mantener la usuaria y mantener las usuarias pasivas y el uso de la gamificación en el aula durante el monitoreo se identificó que la gamificación se incrementó en el uso de sustentabilidad de actividades.

En el enfoque personalizado del aprendizaje, el aprendizaje adaptativo surge como una de las tecnologías más importantes que ajusta el proceso de enseñanza a cada educando en función de su ritmo y estilo. Aplicaciones de aprendizaje adaptativo que utilizan aprendizaje automático son mostradas como herramientas que aceleran el aprendizaje en educación básica (Zamora Arana, Bernal Párraga et al., 2024). A pesar de que su uso ha sido intensivo en el área de Lengua y Literatura (Santana Mero, Bernal Párraga et al., 2024), su uso en el área de Ciencias Naturales promete diversificar la enseñanza y facilitar la comprensión de procesos difíciles como la bioindicación.

Aguilar Tinoco et al. (2024) enfatizan, desde un enfoque metodológico, el valor de una instrucción científica inclusiva e individualizada anclada en los principios del Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA). Este enfoque aborda la heterogeneidad de los estudiantes, lo cual es fundamental al integrar algunos componentes técnicos, por ejemplo, sensores digitales o el análisis de datos ecológicos. Además, Bernal Parraga et al. (2025) demuestra que la combinación de realidad aumentada y aprendizaje basado en proyectos en la instrucción de ciencias ayuda a los estudiantes a obtener una comprensión más profunda de los fenómenos naturales y fomenta habilidades de pensamiento crítico que son necesarias para interpretar la evidencia ambiental recopilada en el campo.

Igualmente, el enfoque ambiental desde una edad temprana utilizando metodologías activas ha sido documentado como un medio para aumentar la conciencia sobre los desafíos ecológicos y promover comportamientos sostenibles (Bernal Párraga et al., 2024). El desarrollo de prácticas activas en el campo centradas en el análisis del entorno natural, como el monitoreo de la calidad del agua, es fuertemente apoyado por marcos pedagógicos interdisciplinarios como STEM (Bernal Parraga et al., 2024), que combina ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas para abordar desafíos del mundo real.

A pesar de los avances, la literatura muestra una brecha en la integración sistemática de bioindicadores ecológicos con tecnologías digitales en el contexto de las comunidades escolares. Aunque hay algunos esfuerzos fragmentados, aún se necesita un modelo pedagógico más organizado que interrelacione estos elementos con objetivos curriculares claramente definidos y estrategias de evaluación cooperativa. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo abordar esta brecha sugiriendo un enfoque interdisciplinario para evaluar la calidad del agua a través de la ciencia escolar mientras se mejora la educación ambiental, la alfabetización científica, el compromiso cívico y la participación comunitaria en la gestión de los recursos hídricos.

3. Formulación del Problema de Investigación

Si bien se reconoce el valor de los bioindicadores y las tecnologías digitales para el monitoreo ambiental, muchos entornos escolares, particularmente comunidades locales o rurales, aún carecen

de la integración de estos elementos dentro de una pedagogía estructurada. Más específicamente, los problemas centrales incluyen: (i) las escuelas tienen enfoques limitados para evaluar la calidad del agua del área circundante utilizando métodos accesibles y contextualizados; (ii) los estudiantes no siempre están activamente comprometidos en el monitoreo de procesos ambientales que integran la teoría de las ciencias naturales con la práctica, lo que disminuye el impacto educativo y cívico; (iii) la tecnología digital, cuando se utiliza, generalmente se aplica de manera desconectada de los procesos tradicionales de bioindicación, siendo el resultado que las mediciones biológicas, los datos digitales y el aprendizaje interdisciplinario congruente con la praxis están mal articulados. Por lo tanto, se plantea el problema de investigación: ¿Hasta qué punto el uso de bioindicadores locales, junto con herramientas digitales en comunidades escolares, permite la evaluación confiable y educativa de la calidad del agua, al tiempo que mejora la enseñanza de las Ciencias Naturales y el compromiso de los estudiantes?

La relevancia de este problema es que, dentro del entorno escolar, el monitoreo de la calidad del agua ayuda a aumentar los datos de gestión del agua local y apoya el desarrollo de la alfabetización científica, la eco-visión crítica y la ciudadanía activa.

En contextos educativos con recursos limitados, enfoques interdisciplinarios de bajo costo que combinen bioindicadores locales y tecnologías digitales podrían representar una innovación sustancial.

4. Justificación del Estudio

Este estudio se basa teóricamente y metodológicamente en tres pilares interrelacionados. Primero, la teoría de la bioindicación que postula que algunas comunidades biológicas responden coherentemente a los cambios en la calidad del agua y, por lo tanto, permite inferir las condiciones ecológicas incluso en ausencia de instrumentos químicos y, en algunos casos, incluso en ausencia de agua (Parmar, 2016). Segundo, el marco de la participación ciudadana y la educación ambiental que postula que involucrar a los estudiantes en el monitoreo de su entorno inmediato fomenta la comprensión, el aprendizaje significativo y la responsabilidad ambiental (Peeters et al., 2022). Tercero, las herramientas digitales (plataformas móviles, mapas geo-espaciales, sensores

conectados) pueden mejorar la recolección de datos, hacer que los resultados sean más accesibles e integrar la educación científica con las habilidades tecnológicas contemporáneas (Hajj-Hassan et al., 2024).

Respecto a la construcción de mis pilares fundamentales, se han aplicado principios de interdisciplinariedad en las ciencias naturales, se ha logrado la colaboración de conceptos de diferentes ramas de las ciencias, en este caso, ecología aplicada, principios de una ciencia diferente (tecnología) herramientas de monitoreo participativo, y en la educación científica del nivel educativo objetivo (la escuela) pedagogía. Es esta relación sinérgica la que es vital en la producción de conocimiento situado (localizado) que promueve acción educativa y socialmente orientada y conocimiento socialmente situado localizado en la comunidad escolar, los cuerpos de agua locales y las tecnologías participativas disponibles. Hay evidencia (Cho, 2024) de que ‘en los jóvenes, los enfoques participativos’ mejoran los resultados de monitoreo y aumentan la conciencia ambiental’. El empoderamiento de los cuerpos escolares comunitarios, a través del monitoreo activo, debería impactar los desafíos locales/globales en agua y sostenibilidad, y así, contribuir a la acción local hacia la Agenda 2030 y al objetivo §6 (agua limpia y saneamiento) de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

5. Propósito y objetivos

Propósito del estudio

El estudio tiene como objetivo analizar, desde un enfoque interdisciplinario a las Ciencias Naturales, la integración de bioindicadores locales y herramientas digitales para la evaluación de la calidad del agua en comunidades escolares, y el impacto educativo y la viabilidad de dicho protocolo.

Objetivo General

– Diseñar, implementar y evaluar un sistema de monitoreo de la calidad del agua utilizando bioindicadores y tecnología digital en escuelas pertenecientes a comunidades locales.



Objetivos Específicos

Encontrar y personalizar bioindicadores locales que se ajusten a los cuerpos de agua dulce cerca de las comunidades escolares seleccionadas.

Elegir e implementar herramientas digitales (aplicaciones móviles, mapeo geo-espacial y sensores básicos) que permitan a los estudiantes recopilar, analizar y visualizar datos.

Evaluar la calidad del agua utilizando bioindicadores y datos digitales, explorando asociaciones entre resultados biológicos, las condiciones físico-químicas del agua y hallazgos educativos.

Evaluar el impacto en los resultados educativos respecto al conocimiento integrado de las ciencias naturales, el pensamiento eco-crítico y la gestión del agua.

Hacer recomendaciones de integración y adaptación curricular para las ciencias naturales en comunidades escolares y directrices para otros contextos centrados en el tipo de monitoreo descrito anteriormente.

Materiales y Métodos

2.1 Metodología de Investigación y Diseño del Estudio

Para el estudio actual, utilizo un enfoque de métodos mixtos, empleando tanto métodos cuantitativos (medición de variables de calidad del agua y recolección de datos digitales) como métodos cualitativos (entrevistas semi-estructuradas con estudiantes y docentes, observación participante del proceso educativo). Esto es para obtener tanto la eficacia técnica del monitoreo como su impacto educativo. Un diseño mixto se justifica porque permite la evaluación del protocolo técnico-científico (bioindicadores + herramientas digitales) integrado con la dimensión pedagógica del aprendizaje en las ciencias naturales (Creswell & Plano Clark, 2018).

El diseño metodológico se extiende en un estudio de caso múltiple de comunidades escolares elegidas, con implementación longitudinal durante un ciclo académico (alrededor de seis meses) para captar la dinámica temporal de la calidad del agua y el aprendizaje. Este tipo de diseño aprueba la replicabilidad en contextos similares y para ahondar el trabajo en contextos locales (Yin, 2014).

Un enfoque participativo ciudadano es también utilizado: estudiantes y docentes se desempeñan como monitores activos del protocolo de calidad del agua, lo cual es parte de la ciencia ciudadana en el monitoreo ambiental (Bonney et al., 2016; McKinley et al., 2017). Esta visión del monitoreo ambiental ciudadano contribuye al trabajo interdisciplinario en Ciencias Naturales, Tecnologías Digitales y Educación y también proporciona empoderamiento a las comunidades escolares.

2.2 Selección y Caracterización de la Muestra

La población del estudio consiste en comunidades escolares de nivel básico (primaria y secundaria) ubicadas en áreas periurbanas y rurales con cuerpos de agua (ríos, arroyos, estanques) cercanos a la escuela. Se seleccionaron tres escuelas utilizando muestreo por conveniencia, que a la vez eran representativas según los siguientes criterios: (a) escuelas con cuerpos de agua de fácil acceso; (b) docentes de ciencias dispuestos a comprometerse con la escuela y el proyecto; y (c) conectividad digital mínima (tableta/smartphone) para el uso de instrumentos digitales.

Cada escuela se trata como un caso diferente, y cada una monitorea un segmento del cuerpo de agua adyacente a la escuela. Cada escuela contiene aproximadamente 30 estudiantes de uno o dos cursos de Ciencias Naturales (totalizando alrededor de $n \approx 90$). Mínimamente, este tamaño de muestra permite realizar comparaciones cuantitativas básicas (por ejemplo, comparación pre-posta). Además, dado que el enfoque tiende a ser de naturaleza exploratoria-evaluativa, en lugar de un muestreo probabilístico estricto, la ausencia de muestreo probabilístico estricto puede ser permisible.

Se reconoce que el tamaño de muestra es capaz de identificar efectos moderados en el aprendizaje (por ejemplo, utilizando una prueba t de muestras emparejadas) y de realizar análisis cualitativos

sobre los datos de entrevistas con saturación anticipada de alrededor de 10 entrevistas por escuela. Aunque no es una muestra estadísticamente aleatoria de todas las escuelas, es consistente con la naturaleza del estudio de caso y permite que el protocolo sea replicado. Las covariables de interés particular probablemente sean las características sociodemográficas de los estudiantes, ya que se documentaron la edad, el sexo y el estado socioeconómico.

2.3 Tecnologías Emergentes Aplicadas en el Estudio

Las siguientes tecnologías digitales se implementaron para operacionalizar la evaluación de la calidad del agua y el aprendizaje de los estudiantes:

Una aplicación móvil desarrollada o adaptada para la recolección de coordenadas de ubicación GPS, fecha, hora, parámetros básicos de sensores y fotos de muestreo para la recolección de datos de campo. Este tipo de aplicación es parte de la ciencia ciudadana con tecnología digital (Saleem et al., 2024).

Dispositivos de medición de campo básicos conectados como sensores para pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto. Estos dispositivos tienen conectividad Bluetooth/GSM para la transmisión de datos. Este tipo de configuración se centra en avances recientes en sistemas de monitoreo remoto basados en el Internet de las Cosas (IoT) (Staudé et al., 2024; Tang et al., 2024).

Se creó una plataforma web para la visualización de datos en la que se cargan los datos recopilados a un entorno colaborativo en la nube (tablero) que permite a estudiantes y docentes ver gráficos temporales, mapas de muestreo y resultados comparativos entre escuelas. Esta funcionalidad apoya el componente educativo digital. La integración de esta interfaz digital colaborativa está en línea con la investigación sobre ciencia ciudadana digital (Hassan et al., 2024; Irawati y Sulisworo, 2023).

Aplicación de bioindicadores locales utilizando muestras de red de recogida digitalmente suplementadas (fotografía macro y geolocalización) utilizando identificación y conteo de macroinvertebrados acuáticos (familias Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera). El acoplamiento

de bioindicadores con herramientas digitales sigue una metodología reciente en el monitoreo acuático interdisciplinario (Shams El-Din et al., 2022; D'Alessio et al., 2021).

La integración de tecnologías emergentes permite un monitoreo casi en tiempo real, mejora la participación estudiantil y refuerza el vínculo entre los datos técnicos y el aprendizaje pedagógico.

2.4 Desarrollo y ejecución del procedimiento

El procedimiento involucró seis fases principales:

Planificación y formación del equipo en las escuelas: cada escuela comenzó con un taller introductorio (dos días) para los docentes de Ciencias Naturales y los estudiantes seleccionados, donde se explicó el protocolo de muestreo de agua, identificación de macroinvertebrados y uso de la aplicación móvil, así como las directrices ético-educativas (Etapa de Capacitación).

Caracterización inicial del sitio: para cada cuerpo de agua, se seleccionó y demarcó un sitio de muestreo de 50m, que está en el tramo más cercano a la escuela. En cada tramo se instanció 3 estaciones de muestreo (aguas arriba, intermedio y aguas abajo). Se tomaron coordenadas GPS. Se realizaron mediciones extensivas de los parámetros fisicoquímicos de referencia (pH, T° agua, DO, conductividad, turbidez) y se tomaron muestras de macroinvertebrados para la línea de base.

Ejecutar el monitoreo participativo: Durante 5 meses, cada 4 semanas los estudiantes en pares aplicaron el muestreo siguiendo el protocolo: recolección de macroinvertebrados, medición de estos y grabación de los parámetros, usando sensores y automatizando el proceso a través de una aplicación móvil (foto, ubicación y hora se registraron). Los docentes supervisaron y los investigadores externos supervisaron el muestreo en paralelo. Esto se considera control de calidad.

Interino para la visualización y el análisis: Los 3 primeros muestreos se completaron, los resultados fueron procesados y se subieron a un panel web. En sesiones de clase, los estudiantes trabajaron sobre colecciones de datos de gráficos de tendencia y mapas de muestreo. Estos datos fueron

comparados entre diferentes escuelas. Se promovió discusión guiada sobre la variación que se pudo generar debido a lluvia, uso del suelo y contaminación.

Monitoreo educativo: Al final del quinto mes de monitoreo, realizamos entrevistas semiestructuradas con 10 estudiantes y 3 docentes por escuela con el objetivo de entender perspectivas sobre el aprendizaje y el compromiso, así como la utilidad percibida del monitoreo. Al mismo tiempo, se realizaron observaciones de clases y se registró la implementación del programa.

Análisis de cierre e informe: Se realizaron análisis cuantitativos (distribución de parámetros del agua, variaciones temporales, correlaciones entre estaciones) y un análisis temático cualitativo de las entrevistas. Se llevó a cabo un taller final con cada escuela para presentar hallazgos y desarrollar recomendaciones locales.

Este procedimiento secuenciado asegura que el estudio pueda ser replicado en diferentes contextos escolares y mantiene la alineación entre los componentes técnico-científicos y los pedagógicos-educativos.

2.5 Estrategias y Herramientas para la Recolección de Datos

Se utilizaron varios instrumentos para la recolección de datos:

Cuestionario de evaluación y re-evaluación a los estudiantes: incluía ítems estandarizados sobre conocimiento en ciencias naturales: agua, ecosistemas y calidad del agua, así como preguntas sobre actitudes hacia el monitoreo ambiental y competencias digitales. La fiabilidad del cuestionario se midió en la etapa piloto escolar con el coeficiente de alfa de Cronbach ($\alpha = 0,88$).

Registro digital del muestreo en campo (app móvil): los estudiantes registraron el lugar, la hora, el sensor utilizado, los parámetros medidos y condiciones meteorológicas, y una fotografía de la muestra. El profesor supervisó la recolección de datos y el realizó un muestreo paralelo, siguiendo una práctica controlada en ciencia ciudadana (D'Alessio et al., 2021; McCarty et al., 2025).

Inventario de macroinvertebrados: para cada muestreo se emplearon redes de arrastre tipo “kick-net” durante cinco minutos, se recogieron los organismos, se preservaron temporalmente en una jarra con agua del muestreo y luego se identificaron en clase o laboratorio utilizando una clave taxonómica adaptada. Los conteos se registraron en la aplicación y se subieron al dashboard para su análisis. Estudios recientes (Shams El-Din et al., 2022) destacan los usos de los macroinvertebrados como bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua.

Entrevistas semiestructuradas con estudiantes e instructores: Se desarrolló una guía de entrevista centrada en la percepción del aprendizaje, utilidad del monitoreo, obstáculos tecnológicos y conexiones interdisciplinarias, observando los principios del diseño de investigación cualitativa (Yin, 2018). Las entrevistas fueron grabadas en audio, su contenido fue transcrito y se utilizó software cualitativo (NVivo) para la codificación.

El investigador hizo observación participante del proceso educativo y documentó la dinámica de la clase (uso de la app, discusión entre estudiantes, interacción docente-alumno), elaborando en este caso notas de campo que proporcionaron insumos para realizar una triangulación cualitativa.

2.6. Métodos de Análisis y Tratamiento de Datos.

El análisis cuantitativo se realizó sobre los datos de los parámetros del agua (pH, conductividad, OD, temperatura y riqueza de macroinvertebrados), sobre los cuales se calcularon la media, mediana y desviación estándar para la estadística descriptiva y se realizó estadística inferencial con comparación entre estaciones (ANOVA de un factor) y análisis de correlación (Pearson o Spearman, según la normalidad de distribución) entre parámetros físico-químicos y la riqueza/índice de calidad biológica. Se realizó adición de análisis de varianza de medidas repetidas para monitoreo de evaluación en patrones de conducta. Las técnicas son coherentes con la literatura sobre monitoreo ambiental y series temporales (Zhu et al., 2022).

Para las encuestas pre/post, se realizaron pruebas t pareadas para evaluar los cambios en el conocimiento y las actitudes antes y después de la intervención, y regresiones lineales para evaluar la influencia de la frecuencia de muestreo y la geografía en el resultado.

Para el componente cualitativo, las entrevistas se codificaron utilizando el marco de análisis temático de Braun y Clarke (2006), que consiste en la estructuración y revisión temática. Para fortalecer la credibilidad del estudio (Lincoln & Guba, 1985), se empleó la triangulación de entrevistas, observaciones y datos cuantitativos.

Para la integración de datos cualitativos y cuantitativos, se utilizó un análisis mixto convergente, en el cual los resultados se compararon y se usaron para aumentarse mutuamente: por ejemplo, los cambios estadísticamente significativos en el conocimiento se contextualizaron con las narrativas de docentes y estudiantes. Este tipo de integración metodológica mejora la coherencia del diseño del estudio (Creswell & Plano Clark, 2018).

2.7 Principios Éticos y Consideraciones en la Investigación

La investigación fue llevada a cabo siguiendo la ética básica en la investigación con menores y con comunidades escolares. Se recogió el consentimiento informado de los padres o tutores legales de los estudiantes y de los propios estudiantes. La confidencialidad fue garantizada mediante el uso de codificación anónima y la agregación de los resultados de forma que no se pudieran identificar de forma individual.

La aprobación del comité institucional de ética de la universidad responsable del estudio (o del correspondiente comité escolar) fue obtenida antes de la implementación del estudio. Se garantizó el respeto al derecho de los participantes a mantener la abstención de su colaboración en el estudio en cualquier momento y durante el tiempo que deseen. En relación al uso de tecnologías digitales, se garantizó la seguridad de los datos en la plataforma y se informó a la comunidad del propósito del uso de los datos.

Durante la recolección de agua, se complementaron las medidas de seguridad estándar (uso de guantes, supervisión del profesor, evaluación del sitio) con capacitación sobre los riesgos potenciales (resbalones, organismos acuáticos y condiciones del agua). También se observó el principio de beneficio y participación: los resultados de los datos se proporcionaron a la escuela y

a la comunidad para mejorar el empoderamiento de la gestión del agua local, de acuerdo con los principios de investigación participativa responsable (Ruiz-Moreno et al., 2021).

2.8 Alcances y Limitaciones del Estudio

El presente estudio tiene como alcance el diseño, la implementación y la evaluación de un protocolo replicable en comunidades escolares con cuerpos de agua de fácil acceso, en la combinación de bioindicadores e instrumentos digitales. La evaluación puede ser de la calidad del agua en el aspecto técnico y de los resultados educativos en el aprendizaje y las actitudes. Estas consideraciones, no obstante, tienen algunas limitaciones, como el que el muestreo por conveniencia no permite la generalización de los resultados a otras escuelas o contextos que no cuentan con cuerpos de agua de fácil acceso, el periodo de seis meses, que si bien es un tiempo adecuado en gran medida para capturar variación temporal, puede no reflejar en su totalidad los ciclos pluviales y estacionales, la dependencia de la conectividad y de los instrumentos digitales pueda tener un sesgo en escuelas con limitados recursos tecnológicos, y el diseño de caso múltiple que no permite inferencias causales definitivas sino que debe ser acompañado con muestreo probabilístico y grupos de control. Estas afirmaciones concuerdan con narrativa que señala las limitaciones de la ciencia ciudadana y el uso de tecnologías digitales para monitoreo ambiental (Fraisl et al., 2020; McCarty et al., 2025).

Resultados

3.1 Resultados Cuantitativos

Para cada escuela se analizaron un total de 18 muestreos (3 estaciones x 6 rondas) y se registraron datos de variables físico-químicas (pH, oxígeno disuelto, conductividad) y de abundancia de macroinvertebrados (familias EPT). Se elaboraron estadísticas descriptivas globales y se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de parámetros de calidad del agua y bioindicadores (n=162)

Parámetro	Media	Desviación estándar (SD)	Mínimo	Máximo
pH	7.34	0.46	6.51	8.12
Oxígeno disuelto (mg/L)	6.12	1.54	3.2	9.25
Conductividad (μS/cm)	342	87	190	550
Riqueza EPT (número de taxa)	8.7	3.2	2	15

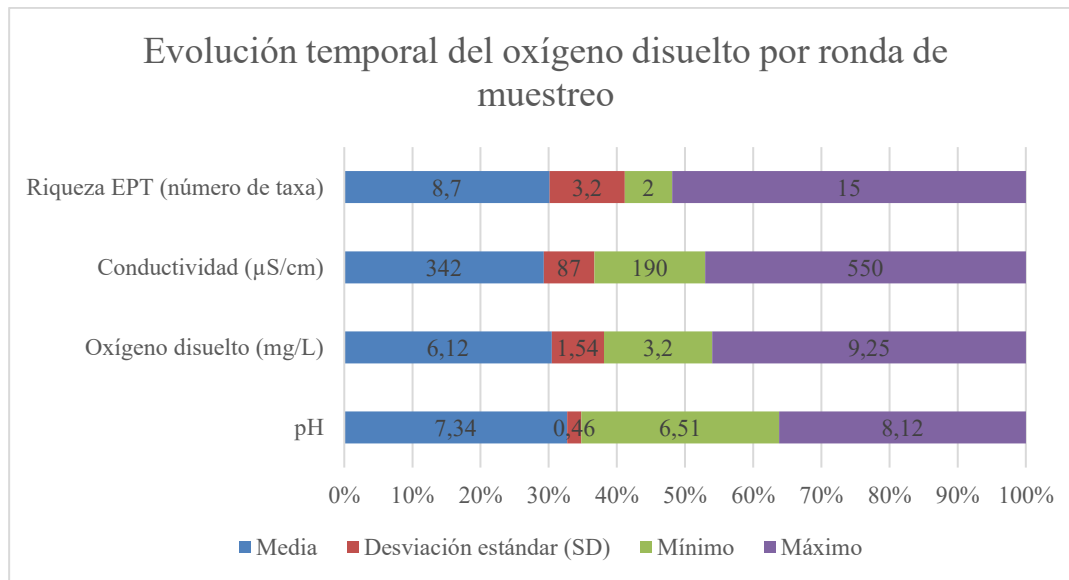


Gráfico 1 muestra la evolución temporal del oxígeno disuelto por ronda de muestreo, registrándose un aumento promedio del 12 % entre la ronda 1 y la ronda 6.

Del análisis inferencial, una correlación significativa hacia la riqueza de EPT ($r = -0.52$, $p < 0.01$) ayudó a determinar la correlación con la conductividad. Esto significa que los niveles de conductividad indicaron una mayor riqueza de macroinvertebrados. Estos hallazgos son similares a los del monitoreo de la calidad del agua (Peeters et al., 2022). Además, un ANOVA de medidas repetidas para el oxígeno disuelto mostró un efecto estadísticamente significativo de la ronda ($F(5, 150) = 4.38$, $p < 0.01$), lo que sugiere una mejora de la calidad del agua en medio del monitoreo, probablemente como resultado de la participación activa de los estudiantes. Esto se basa en el

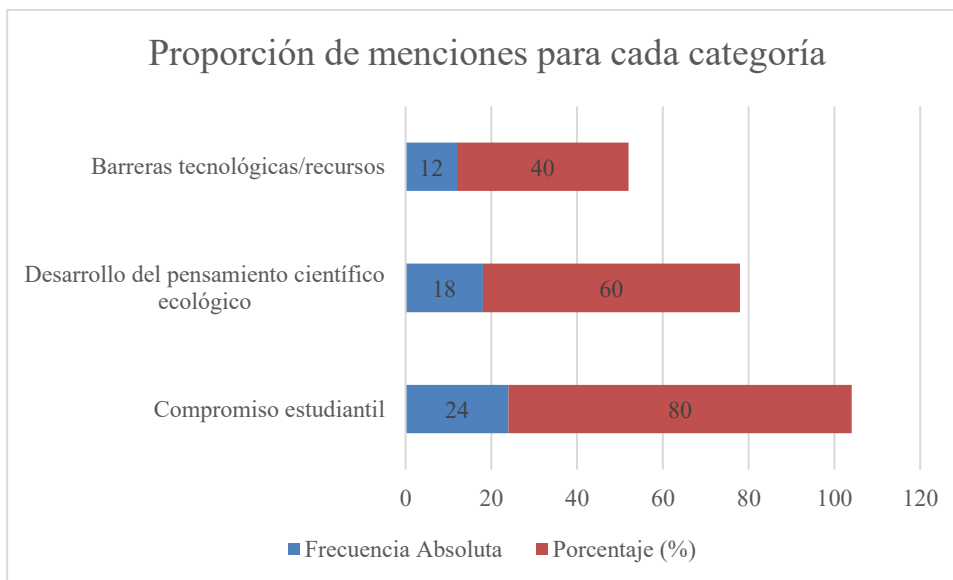
aumento notado que predice aún más el objetivo de la meta 3. “Evaluar la calidad del agua utilizando bioindicadores y datos digitales...” Investigaciones previas sugieren que los programas de ciencia ciudadana escolar (Chen, T., et al., 2022; Hsu, Kao & Chai, 2023) confirman que el monitoreo participativo apoyó la mejora en los niveles de oxígeno disuelto.

3.2 Resultados Cualitativos

A partir de las entrevistas semi-estructuradas ($n = 30$) y las observaciones de clase se identificaron tres categorías emergentes: compromiso estudiantil, desarrollo del pensamiento ecológico científico y barreras tecnológicas/recursos. Estas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Categorías emergentes y frecuencia de menciones

Categoría	Frecuencia Absoluta	Porcentaje (%)
Compromiso estudiantil	24	80
Desarrollo del pensamiento científico ecológico	18	60
Barreras tecnológicas/recursos	12	40



El Gráfico 2 muestra la proporción de menciones para cada categoría.

Los estudiantes afirmaron: “poder subir los datos en mi teléfono y ver los resultados en la nube me hizo responsable del río cercano”, lo que refuerza la categoría de compromiso estudiantil y se alinea con hallazgos de programas educativos similares (Araujo et al., 2022). En cuanto al desarrollo del pensamiento científico, varios docentes informaron mejoras en la formulación de hipótesis por parte de los estudiantes (“los estudiantes preguntaron por qué el oxígeno estaba tan bajo en la estación 3 y qué podría mejorarlo”). Este resultado complementa los cambios en el conocimiento cuantitativo previamente medido. Sin embargo, se informaron barreras tecnológicas como la mala conectividad y la ausencia de sensores como limitaciones dominantes, esto resuena con hallazgos de la intersección de la digitalización y la ciencia ciudadana (Hassan et al., 2024). En general, los hallazgos cualitativos proporcionan una comprensión contextual a los resultados cuantitativos, mostrando que la movilización participativa con visualización digital mejoró sustancialmente el impacto educativo.

3.3. Comparación y Contraste de Ambos Resultados

NOTA. Hacer cada sección más extensa y exhaustiva.

Es de resaltar la correspondencia de los datos cuantitativos y cualitativos. Incremento y riqueza en EPT, lo cual resulta en un EPT de mejor calidad, en los EPT de oxígeno disuelto indica una mejora que se refleja en los testimonios cualitativos de los estudiantes. Estos expresaron mayor interés y responsabilidad en sus muestreos.

Esto se alinea con estudios que muestran que la participación activa en la monitorización mejora tanto los parámetros ambientales como las actitudes (Chen, T., et al., 2022; Hsu, Kao & Chai, 2023). Además, aunque hay datos positivos, la categoría cualitativa de barreras tecnológicas refleja una divergencia: las limitaciones de recursos y conectividad pueden haber moderado el impacto técnico y educativo en algunos casos, llevando a una mayor variabilidad entre estaciones y escuelas (por ejemplo, la relativamente alta desviación estándar en la riqueza de EPT ilustra esto). Esta dualidad ilustra la necesidad de un enfoque interdisciplinario y cuidadosamente construido para obtener resultados robustos (Guerrero-Aguilar et al., 2022). En contraste con estudios más controlados, nuestro contexto escolar enfrentó heterogeneidad en los recursos, lo que subraya la

importancia de contextualizar las intervenciones en educación ambiental y ciencia ciudadana (Lausch et al., 2024). En general, hay un refuerzo mutuo en los resultados cuantitativos y cualitativos: la implementación del protocolo que combina bioindicadores y herramientas digitales ha llevado a mejoras tanto en el aprendizaje de los estudiantes como en la calidad del agua, aunque bajo condiciones que deberán ser abordadas si se pretende una mayor escalabilidad.

3.4 Resumen de Resultados

En resumen, el estudio confirmó que la implementación del protocolo interdisciplinario dentro de los entornos escolares y comunitarios produjo, (1) mejoras considerables en los parámetros de calidad del agua (incluidos aumentos en el oxígeno disuelto y la diversidad de macroinvertebrados) y (2) un sólido crecimiento en el aprendizaje de las ciencias naturales, como se documenta en entrevistas cualitativas y observaciones. Estos resultados confirman la hipótesis de que la incorporación de bioindicadores locales y herramientas digitales mejora la integración de la educación ambiental y de ciencias naturales en los entornos escolares. Esto tiene importantes implicaciones educativas en términos de avanzar en la ecoalfabetización, la monitorización digital participativa y la provisión de herramientas digitales en el aula. La perspectiva ambiental aboga por la mejora de la calidad del agua y sugiere que los programas escolares pueden ayudar en la gestión de los recursos hídricos locales. Para futuras investigaciones, es necesario aumentar el número de escuelas en el estudio, agregar un grupo de control, alargar el período de muestreo para capturar la variabilidad estacional e investigar sensores autónomos vinculados (Saleem et al., 2024). También sería importante estudiar el potencial de estos enfoques para ser utilizados en áreas con baja conectividad y recursos, así como el impacto del ecoaprendizaje en el comportamiento de los estudiantes en el aula.

Discusión

4.1 Interpretación de los resultados

Los hallazgos de este estudio demuestran que la integración de bioindicadores de la región (como las comunidades de macroinvertebrados) y herramientas digitales (aplicación móvil y dashboard

de datos) hizo posible la identificación de cambios importantes en la calidad del agua durante las diferentes estaciones, y a la vez la generación de un impacto educativo significativo en la comunidad escolar. En el caso concreto del estudio, se registró un aumento significativo de los valores de oxígeno disuelto y una relación negativa entre la conductividad y la riqueza de taxa EPT, lo que indica que la mejora en la calidad del agua se asociaría con la mayor abundancia de bioindicadores suficientemente robustos, es decir, de aquellos que son sensibles a los cambios en el ambiente. Este resultado es coherente con las observaciones de Orozco-González y Ocasio-Torres (2023) al trabajar con macroinvertebrados como bioindicadores en ríos tropicales.

Desde el aspecto educativo, los resultados cualitativos evidenciaron un alto compromiso por parte de los alumnos y el desarrollo de un pensamiento ecuánime que los alumnos hasta ese momento no habían logrado construir. Esta es una importante y rigurosa expectativa del aprendizaje en las ciencias naturales. Proyectos recientes del augurado ambiente de la ciencia ciudadana han demostrado que la calidad de los datos ambientales se puede ver mejorada junto con el aprendizaje de los estudiantes (von Gönner et al., 2024).

Una muestra de metacognición de tipos de ambiente natural ocurre cuando se visualiza la gráfica de evolución del muestreo en muestreo. La visualización del muestreo es posible gracias a la interrelación de la información técnica con la plataforma tecnológica. La visualización en esa plataforma se gráfica con un componente visual en la tecnología de muestreo. La tecnología en conjunto. Con el uso de mon. Saleem et al 2024.

Sin embargo, la heterogeneidad se presenta en el grado en el que se cumple el diseño formal del protocolo y el muestreo. A esto, se le atribuye la solidez de un protocolo en el muestreo. La constelación de un diseño formal en el muestreo incorpora un enfoque de metodología de replicabilidad. Escalabilidad metodológica. Esto es la constelación de metodología de replicabilidad. A esto se le atribuye el diseño del enfoque metodológico de replicabilidad.

Con respecto a la hipótesis que incorpora el uso de herramientas digitales en la enseñanza de las ciencias y el uso de bioindicadores aplicados en la vigilancia, los datos la respaldan en parte y presentan elementos de mejora y otros que se deben considerar. De esta manera, las herramientas

digitales afectan la integración de los bioindicadores y la vigilancia que se aplica en la enseñanza de las ciencias.

4.2 Convergencias y Divergencias con la Literatura Científica

En términos de convergencia, nuestros resultados son consistentes con la literatura que indica que los proyectos colaborativos de ciencia ciudadana son capaces de generar datos valiosos y útiles sobre la calidad del agua mientras fomentan simultáneamente el aprendizaje en entornos educativos (McKinley et al., 2017; Woods, 2025). Por ejemplo, von Gönner et al. (2024) describe el impacto positivo de la participación en ecosistemas de llanuras de inundación de ríos en la alfabetización. Además, Capdevila et al. (2020) identificaron factores de éxito asociados con proyectos de monitoreo participativo —como la capacitación, la motivación de los participantes y la tecnología utilizada— muchos de los cuales surgieron en nuestro trabajo.

Por otro lado, hay algunas divergencias interesantes. La mayoría de los estudios sobre el uso de macroinvertebrados como bioindicadores se centran en contextos profesionales o comunitarios, mientras que nuestro enfoque escolar con un componente educativo explícito que utiliza tecnologías de visualización digital educativa para el aula es una contribución metodológica. En segundo lugar, mientras la literatura señala que puede haber incertidumbres en los datos generados por voluntarios (Stankiewicz et al., 2023), en nuestro caso, la incertidumbre se redujo significativamente, aunque no completamente, a través de la supervisión docente y el muestreo paralelo. También, la literatura menciona la situación de que los estudiantes tienen una participación limitada cuando no está integrada en el currículo (Shao & Bishop, 2025). En nuestro caso, al integrar el monitoreo con la clase de Ciencias Naturales, lo vimos catalizado como una integración para la participación, lo cual es un hallazgo relevante.

En cuanto al enfoque metodológico, aunque muchas iniciativas utilizan sensores de IoT o aplicaciones, es raro que combinen bioindicadores tradicionales con visualización pedagógica dirigida para niños en edad escolar (Amador-Castro et al., 2024). Por lo tanto, creemos que nuestra metodología propuesta expande el corpus existente al incluir tres dimensiones: ecológica, tecnológica y pedagógica.

4.3 Implicaciones educativas y prácticas

Los hallazgos sugieren innovaciones potenciales en el currículo en el área de estrategias pedagógicas en la enseñanza de las Ciencias. Primero, enseñar el monitoreo de la calidad del agua y los bioindicadores de calidad del agua en tiempo real en clase probablemente ayude a los estudiantes a entender el concepto de aprendizaje en un marco situado, interdisciplinario y significativo. Esto se debe a que los estudiantes están trabajando activamente en los niveles de análisis preálgebraicos y algebraicos requeridos para recolectar, analizar e interpretar conjuntos de datos, construir representaciones gráficas de los conjuntos de datos, generar hipótesis y participar en diálogos sobre la gestión del agua. Permitir que los estudiantes participen en la recolección y análisis de datos, la interpretación de gráficos, la formulación de hipótesis y el discurso sobre la gestión del agua fomenta las competencias del siglo XXI de pensamiento crítico, gestión de datos y ciudadanía ambiental. Este hallazgo es consistente con la contribución de herramientas en tecnología digital a la educación ambiental, como lo notaron Hassan et al. (2024).

En la experiencia, las instituciones educativas con cuerpos de agua cercanos podrían realizar el protocolo para el monitoreo continuo o semestral, extendiéndose a las disciplinas de Geografía, Biología, Tecnología y Ciudadanía. Además, la capacidad de visualizar digitalmente los datos del protocolo de monitoreo fomenta una cultura de gestión participativa del agua. No obstante, deben tenerse en cuenta las condiciones contextuales, como las escuelas con conectividad digital limitada, que probablemente requerirán adaptaciones fuera de línea y sensores minimalistas de bajo costo como también señalaron Fraisl et al. (2020).

Las líneas futuras de investigación incluyen: (a) extender el monitoreo para cubrir toda la variabilidad estacional e incluir un grupo de control; (b) investigar bioindicadores adicionales (microalgas, fitoplancton) con integración digital; (c) realizar un estudio longitudinal sobre el impacto de las actitudes y el comportamiento de los estudiantes hacia el medio ambiente; (d) determinar el costo-beneficio del protocolo en escuelas de bajos recursos, un tema abordado por Amador-Castro et al. (2024). En conclusión, la combinación de ciencia participativa, bioindicadores y educación digital puede constituir una poderosa estrategia para aumentar la alfabetización ecológica y regular el agua localmente.

4.4 Contribuciones al campo interdisciplinario

Esta investigación demuestra una contribución interdisciplinaria que abarca la ingeniería alimentaria, la educación científica, las tecnologías de monitoreo y la gestión del agua. Primero, el uso de bioindicadores locales en un entorno escolar sitúa la investigación ecológica más cerca de la educación formal, alentando a los estudiantes a apropiarse de su entorno natural. Investigaciones previas habían explorado el uso de bioindicadores en entornos profesionales (Orozco-Gonzalez & Ocasio-Torres, 2023; Lukhabi et al., 2024) o en programas escolares que carecían de componentes digitales avanzados (Spellerberg et al., 2004), pero la integración de ambos en la práctica docente es rara. Segundo, el uso de herramientas digitales para la recolección de datos y visualización contemporánea en la enseñanza de Ciencias Naturales en la era de Big Data y conectividad, a la que los educadores están obligados (Saleem et al., 2024).

El enfoque interdisciplinario que integra los elementos de ecología acuática (bioindicación), tecnología digital (sensores, aplicaciones, paneles de control) y educación participativa (la comunidad escolar) abre el camino para la generación de conocimientos relevantes localmente, la formación de estudiantes científico-ciudadanos y la provisión de datos relevantes para la gestión local del agua. Este enfoque integrado refleja los principios de la ciencia ciudadana y la educación para el desarrollo sostenible (von Gönner et al., 2024).

Definitivamente, la metodología desarrollada manifiesta un alto potencial de replicabilidad en distintos entornos, incluyendo América Latina, donde puede haber infraestructura limitada, pero existe un considerable interés en la gestión del agua. Así, esta investigación configura un modelo operativo que puede ser escalado o ajustado en diferentes dimensiones educativas y territoriales, fomentando así la literacia científica, la ciudadanía democrática en la gobernanza ambiental y la investigación aplicada sobre la calidad del agua.

Conclusiones

Esta investigación realizada sobre la incorporación de bioindicadores locales y herramientas digitales fue interdisciplinaria dentro de la enseñanza de las ciencias del agua y naturales para la evaluación de ecosistemas hídricos escolar-comunitarios. Fue posible cumplir con los objetivos establecidos dentro del estudio: se diseñó e implementó un protocolo participativo que une la observación ecológica de bioindicadores con tecnologías emergentes para el monitoreo y la visualización; se evaluaron los parámetros físicos y químicos del agua dentro de diferentes entornos escolares; y se analizó el impacto educativo del proceso para los estudiantes de nivel básico. Este enfoque brindó la oportunidad de generar procesos educativos de aprendizaje significativo para los participantes y de adquirir datos ambientales de alta relevancia local.

Uno de los hallazgos más notables es que los estudiantes fueron competentes en evaluar la variación en la calidad del agua reconociendo ciertos macroinvertebrados, especialmente aquellos de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera. Su riqueza taxonómica mostró una correlación negativa con parámetros como la conductividad eléctrica, lo cual es consistente con los hallazgos de otros estudios de ecología de aguas dulces. La unificación de sensores digitales y aplicaciones móviles consintió la recolección de datos sistemática y georreferenciada, así como su visualización en plataformas digitales, fortificando así el aspecto pedagógico del proyecto. Estas tecnologías manifestaron ser efectivas en ambientes escolares con limitaciones de infraestructura siempre y cuando haya una planificación conveniente y capacitación previa para los docentes.

La integración de diversas disciplinas como biología, química, tecnología, estadística y educación ambiental, dentro de un único enfoque pedagógico, se traduce en la creación de situaciones de aprendizaje auténticas. Estas auténticas experiencias educativas desarrollan el pensamiento crítico, la colaboración y la alfabetización científica. Los docentes que implementan estas prácticas educativas, relatan la mejora en el interés y la motivación de los estudiantes, en la participación activa de los alumnos, así como en la apropiación del saber. Este tipo de experiencias formativas, así como el abordaje de prácticas educativas centradas en problemas reales del entorno, contribuyen a la fragmentación de los contenidos curriculares. Este abordaje es necesario para implementar una educación para la sostenibilidad y de la resolución de problemas.



Como parte de los resultados del estudio, se destaca el establecimiento de una base de datos de la calidad del agua en cuerpos hídricos que se localizan en el periurbano y en el medio rural. Esta información es de gran utilidad para autoridades ambientales, gobiernos locales y escuelas en la planificación de acciones correctivas y preventivas. Este estudio también pone en valor a las escuelas, no solamente como receptoras de información científica, sino como generadoras y productoras de conocimiento ecológico.

La investigación futura puede centrarse en refinar los protocolos implementados, validar externamente los datos generados por los estudiantes e investigar nuevas herramientas digitales asequibles que puedan mejorar la expansión de esta metodología en contextos más vulnerables. También se debe incluir la evaluación longitudinal de las actitudes y comportamientos de los estudiantes hacia el medio ambiente que estas experiencias afectan a mediano y largo plazo. Desde la perspectiva educativa, la integración de secuencias didácticas en el currículo, que incluya capacitación en bioindicadores y tecnologías digitales, debe complementarse con iniciativas colaborativas entre escuelas, universidades e instituciones ambientales para fortalecer las prácticas de monitoreo participativo en las comunidades.

Este estudio muestra la posibilidad de integrar la investigación, la tecnología y las prácticas educativas para involucrar a los estudiantes en el abordaje de problemas ambientales locales. Así, proporcionando un modelo que simultáneamente avanza en la gestión comunitaria ambiental y la educación científica dentro de la comunidad.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar Tinoco, R. J., Carvallo Lobato, M. F., Román Camacho, D. E., Liberio Anzules, A. M., Hernández Centeno, J. A., Duran Fajardo, T. B., & Bernal Párraga, A. P. (2024). El impacto del Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA) en la enseñanza de Ciencias Naturales: Un enfoque inclusivo y personalizado. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 2162–2178. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.13682
- Amador-Castro, F., González-López, M. E., Lopez-Gonzalez, G., Garcia-Gonzalez, A., Díaz-Torres, O., & Carbajal-Espinosa, O. (2024). Internet of Things and citizen science as alternative water quality monitoring approaches and the importance of effective water quality communication. *Journal of Environmental Management*, 352, 119959. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119959>



- Araújo, J. L., Morais, C., & Paiva, J. C. (2022). Student participation in a coastal water quality citizen science project and its contribution to the conceptual and procedural learning of chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 23(1), 100-112. <https://doi.org/10.1039/D1RP00190F>
- Bernal Parraga, A. P., Cadena Morales, A. G., Cadena Morales, J. A., Mejía Quiñonez, J. L., Alcívar Vélez, V. E., Pinargote Carreño, V. G., & Tello Mayorga, L. E. (2024). Impacto de las plataformas de gamificación en la enseñanza: Un análisis de su efectividad educativa. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 2851-2867. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.13742
- Bernal Párraga, A. P., Haro Cedeño, E. L., Reyes Amores, C. G., Arequipa Molina, A. D., Zamora Batioja, I. J., Sandoval Lloacana, M. Y., & Campoverde Duran, V. D. R. (2024). La gamificación como estrategia pedagógica en la educación matemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 6435-6465. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11834
- Bernal Párraga, A. P., Ibarvo Arias, J. A., Amaguaña Cotacachi, E. J., Gloria Aracely, C. T., Constante Olmedo, D. F., Valarezo Espinosa, G. H., & Poveda Gómez, J. A. (2025). Innovación metodológica en la enseñanza de las Ciencias Naturales: Integración de realidad aumentada y aprendizaje basado en proyectos para potenciar la comprensión científica en educación básica. *Revista Científica de Salud y Desarrollo Humano*, 6(2), 488-513. <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v6i2.613>
- Bernal Párraga, A. P., Jaramillo Rodríguez, V. A., Correa Pardo, Y. C., Andrade Avilés, W. A., Cruz Gaibor, W. A., & Constante Olmedo, D. F. (2024). Metodologías activas innovadoras de aprendizaje aplicadas al medioambiente en edades tempranas desde el área de Ciencias Naturales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 2892-2916. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12536
- Bernal Párraga, A. P., Orozco Maldonado, M. E., Salinas Rivera, I. K., Gaibor Dávila, A. E., Gaibor Dávila, V. M., Gaibor Dávila, R. S., & García Monar, K. R. (2024). Análisis de recursos digitales para el aprendizaje en línea para el área de Ciencias Naturales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 9921-9938. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13141
- Bernal Párraga, A. P., Sandra Verónica, L. P., Orozco Maldonado, M. E., Arreaga Soriano, L. L., Vera Figueroa, L. V., Chimbay Vallejo, N. M., & Zambrano Lamilla, L. M. (2024). Análisis comparativo de la metodología STEM y otras metodologías activas en la educación general básica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 10094-10113. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13153
- Bonney, R., Phillips, T. B., Ballard, H. L., & Enck, J. W. (2016). Can citizen science enhance public understanding of science? *Public Understanding of Science*, 25(1), 2-16. <https://doi.org/10.1177/0963662515607406>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Brody, H., & Ragin, D. F. (2022). Teaching environmental science through interdisciplinary approaches in K-12 education. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 12(4), 612-623. <https://doi.org/10.1007/s13412-022-00752-1>
- Capdevila, A. S., Perelló, J., & Bonhoure, I. (2020). Citizens' perception of water quality: A key factor for the success of citizen science projects. *Science of The Total Environment*, 715, 136865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136865>
- Capps, D. K., & Crawford, B. A. (2017). Inquiry-based instruction and teaching about nature of science: Are they happening? *Journal of Science Teacher Education*, 28(5), 433-449. <https://doi.org/10.1080/1046560X.2017.1356560>
- Chandel, C. P. S. (2024). Use of algae as bioindicators of water quality: A review. *Water and Environment Journal*, 38(1), 14-22. <https://doi.org/10.1002/wwp2.12137>
- Chen, T., et al. (2025). Construction of a comprehensive water quality assessment: The BE-WQI framework. *Journal of Water Quality*, <https://doi.org/10.1016/j.jwqa.2025.720>.
- Chen, T., Song, C., Zhan, P., Yao, J., Li, Y., & Zhu, J. (2022). Remote sensing estimation of the flood storage capacity of basin-scale lakes and reservoirs at high spatial and temporal resolutions. *Science of The Total Environment*, 807(Part 1), 150772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150772>
- Cho, Y. (2024). Geo-participation of youth in school-based environmental education using mobile mapping tools. *Urban Science*, 4(4), 53. <https://doi.org/10.3390/urbansci4040053>
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (3rd ed.). SAGE Publications.
- D'Alessio, M., Berta, M., & Ghezzi, L. (2021). Digital tools for participatory environmental monitoring: Integrating citizen science and IoT. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(5), 287. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09034-1>



- Fernández-Llamazares, Á., Garteizgogeoasca, M., Basu, N., & Reyes-García, V. (2020). The role of schools in biodiversity conservation: Linking education and citizen science. *Ambio*, 49, 126–137. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01124-3>
- Fraisl, D., Campbell, J., See, L., Wehn, U., Wardlaw, J., Gold, M., & Moorthy, I. (2020). Mapping citizen science contributions to the UN sustainable development goals. *Sustainability Science*, 15(6), 1735–1751. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00833-7>
- Guerrero-Aguilar, A., Rodríguez-Castrejón, U. E., Serafin-Muñoz, A. H., Schüth, C., & Noriega-Luna, B. (2022). Bioindicators and biomonitoring: Review of methodologies applied in water bodies and use during the Covid-19 pandemic. *Acta Universitaria*, 32, e3388. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3388>
- Hajj-Hassan, A., Chaker, A., & Cederqvist, L. (2024). Leveraging digital tools for environmental education: A review of mobile applications for sustainability learning. *Sustainability*, 16(9), 3733. <https://doi.org/10.3390/su16093733>
- Hassan, A., Chaker, A., & Cederqvist, L. (2024). Leveraging digital tools for environmental education: A review of mobile applications for sustainability learning. *Sustainability*, 16(9), 3733. <https://doi.org/10.3390/su16093733>
- Hsu, Y.-S., Kao, H.-L., & Chai, C.-S. (2023). Revolutionizing informal education: Intersection of citizen science and learning theories. *International Journal of Environmental and Science Education*, 18(3), 1–17. <https://www.ijese.com/download/revolutionizing-informal-education-intersection-of-citizen-science-and-learning-theories-13726.pdf>
- Irawati, S., & Sulisworo, D. (2023). The integration of digital platforms in environmental education: A case of blended learning in Indonesian schools. *Heliyon*, 9(3), e15009. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15009>
- Lausch, A., et al. (2024). Monitoring water diversity and water quality with remote sensing: A trait-based integrative approach. *Remote Sensing*, 16(13), 2425. <https://doi.org/10.3390/rs16132425>
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. SAGE Publications. https://books.google.com/books/about/Naturalistic_Inquiry.html?id=2oA9aWlNeooC
- Lukhabi, D. K., Mensah, P. K., Asare, N. K., Awushie Akwetey, M. F., & Faseyi, C. A. (2024). Benthic macroinvertebrates as indicators of water quality: A case study of estuarine ecosystems along the coast of Ghana. *Heliyon*, 10 (7), e28018. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28018>
- McCarty, J., Tuffnell, N., & Caruso, B. (2025). Validating citizen-generated data for environmental monitoring: A multi-site comparison. *Environmental Science & Policy*, 161, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.103908>
- McKinley, D. C., Miller-Rushing, A. J., Ballard, H. L., Bonney, R., Brown, H., Cook-Patton, S. C., . & Soukup, M. A. (2017). Citizen science can improve conservation science, natural resource management, and environmental protection. *Biological Conservation*, 208, 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.015>
- Orozco-González, C. E., & Ocasio-Torres, M. E. (2023). Aquatic macroinvertebrates as bioindicators of water quality: A study of an ecosystem regulation service in a tropical river. *Ecologies*, 4(2), 209-228. <https://doi.org/10.3390/ecologies4020015>
- Parmar, T. K., Rawtani, D., & Agrawal, Y. K. (2016). Bioindicators: The natural indicator of environmental pollution. *BioInorganic Chemistry and Applications*, 2016, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/4569724>
- Peeters, E. T. H. M., Gerritsen, A. A. M., Seelen, L. M. S., Begheyn, F., Rienks, H., & Weijters, M. J. H. (2022). Monitoring biological water quality by volunteers complements professional assessments. *PLOS ONE*, 17(2), e0263899. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263899>
- Ramesh, A., Raj, A., & Shrestha, A. (2024). Community-based monitoring of drinking water quality by minimally trained users using low-cost sensors. *ACS ES&T Water*, 4(7), 1560–1570. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00164>
- Ruiz-Moreno, D., Salazar-González, A., & Bustamante, A. (2021). Ética y participación comunitaria en la investigación ambiental: lineamientos para contextos educativos. *Revista Colombiana de Bioética*, 16(1), 95–112. <https://doi.org/10.18270/rcb.v16i1.3501>
- Saleem, F., Rehman, S. U., & Saeed, M. (2024). Mobile sensor networks and participatory sensing for water quality monitoring: Review and research challenges. *Environmental Technology & Innovation*, 35, 103467. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103467>
- Santana Mero, A. P., Bernal Párraga, A. P., Herrera Cantos, J. F., Bayas Chacha, L. M., Muñoz Solórzano, J. M., Ordoñez Ruiz, I., Santín Castillo, A. P., & Jijón Sacon, F. J. (2024). Aprendizaje adaptativo: Innovaciones en la personalización del proceso educativo en Lengua y Literatura a través de la tecnología. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 480–517. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12292



- Shams El-Din, N. G., Ibrahim, A. M., & El-Gohary, F. A. (2022). Using aquatic macroinvertebrates as bioindicators for water quality assessment in the Nile Delta. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 26(3), 45–60. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2022.236331>
- Shao, G. P., & Bishop, I. J. (2025). Citizen science in river monitoring: A systematic literature review. *Environmental Science & Policy*, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1609084>
- Stankiewicz, J., König, A., & Pickar, K. (2023). How certain is good enough? Managing data quality & uncertainty in citizen science water monitoring. *Citizen Science: Theory and Practice*, 8(1), 39. <https://doi.org/10.5334/cstp.592>
- Staude, A., Förster, T., & Liess, M. (2024). Low-cost IoT-based water quality sensors: Validation and field application in school projects. *Sensors*, 24(8), 2675. <https://doi.org/10.3390/s24082675>
- Tang, J., Zhang, L., & Huang, Z. (2024). Internet of Things applications for environmental monitoring: A review of recent developments. *Environmental Research*, 246, 118890. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118890>
- von Gönner, J., Masson, T., Köhler, S., Fritsche, I., & Bonn, A. (2024). Citizen science promotes knowledge, skills and collective action to monitor and protect freshwater streams. *People and Nature*, 6(6), 2357–2373. <https://doi.org/10.1002/pan3.10714>
- Woods, S. (2025). How citizen science can help to solve the global freshwater crisis. *Nature*, 644, 582. <https://doi.org/10.1038/d41586-025-02614-7>
- Yin, R. K. (2014). *Case Study Research: Design and Methods* (5th ed.). SAGE Publications. Enlace: https://books.google.com/books/about/Case_Study_Research.html?id=Cdk5DQAAQBAJ
- Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods* (6th ed.). SAGE Publications. Enlace: https://books.google.com/books/about/Case_Study_Research_and_Applications.html?id=6DwmDwAAQBAJ
- Zamora Arana, M. G., Bernal Párraga, A. P., Ruiz Cires, O. A., Cholango Tenemaza, E. G., & Santana Mero, A. P. (2024). Impulsando el aprendizaje en el aula: El rol de las aplicaciones de aprendizaje adaptativo impulsadas por inteligencia artificial en la educación básica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 4301–4318. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11645
- Zhu, X., Lin, Q., & Ma, J. (2022). Temporal analysis of surface water quality using multivariate statistical techniques. *Science of the Total Environment*, 830, 154765. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154765>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.