

SENSORES DE CALIDAD DE AGUA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN FISCOQUÍMICA EN LOS ACUÍFEROS DE LATINOAMÉRICA: UNA REVISIÓN

Water quality sensors for the control of physicochemical pollution in aquifers in Latin America: a review

EDIAN F. FRANCO^a, ROMMEL RAMOS^b, ARGENY OVANDO-JAVIER^c,
EMANUEL MONTERO-ESPAILLAT^d, SOLHANLLE BONILLA^e
Y ATHARVA VEDA^f

Recibido: 19/4/2023 • Aprobado: 10/6/2023

Cómo citar: Franco, E. F., Ramos, R., Ovando-Javier, A., Montero-Espailat, E., Bonilla, S., & Veda, A. (2023). Sensores de calidad de agua para el control de la contaminación fisicoquímica en los acuíferos de Latinoamérica: una revisión. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 6(1), 45–70. <https://doi.org/10.22206/cac.2023.v6i1.pp45-70>

Resumen

El monitoreo de la calidad del agua es un aspecto crítico para garantizar agua segura y limpia para el consumo humano, los procesos industriales y la vida acuática. El empleo de sensores automáticos basados en el internet de las cosas y algoritmos de aprendizaje de máquina utilizados para el monitoreo de la calidad del agua se ha vuelto cada vez más popular, debido a su facilidad de uso, precisión y rentabilidad. En esta revisión, discutiremos algunos de los

^a Universidad Tecnológica de Santiago (UTESA), Santiago. República Dominicana. ORCID: 0000-0001-9715-9437, Correo-e: efranco@utesa.edu

^b Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém Para, Brazil. ORCID: 0000-0002-8032-1474, Correo-e: rommelramos@ufpa.br

^c Universidad Tecnológica de Santiago (UTESA), Santiago. República Dominicana. ORCID: 0000-0002-9197-0533, Correo-e: o.argeny@gmail.com

^d Universidad Tecnológica de Santiago (UTESA), Santiago. República Dominicana. ORCID: 0000-0001-7581-3637, Correo-e: emanuel.montero.e@gmail.com

^e Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), Santo Domingo. República Dominicana. ORCID: 0000-0002-0458-1805, Correo-e: solhanlle.bonilla@intec.edu.do

^f Instituto de Innovación en Biotecnología e Industria (IIBI), Santo Domingo. República Dominicana. ORCID: 0000-0001-7368-3314, Correo-e: aveda@iibi.gob.do



sensores comúnmente utilizados para la vigilancia de la calidad del agua, así como sus posibles usos para la gestión y supervisión de acuíferos en América Latina. En la primera parte se discute sobre la contaminación de las fuentes de agua en Latinoamérica y, especialmente, en República Dominicana, donde se brinda una revisión de los diferentes trabajos que evalúan la contaminación en afluentes de agua. Además, se explora como el uso cotidiano de estas fuentes de agua puede afectar a los seres humanos. En la última parte del trabajo se presentan las tecnologías de los sensores y sus diferentes implementaciones, así como los principales retos para su integración al monitoreo de la calidad de agua de las fuentes de agua. Esta revisión demostró que el uso de sensores remotos de calidad de agua, basados en tecnologías de IoT y algoritmos de inteligencia artificial son de gran importancia para el control de la contaminación fisicoquímica en los acuíferos de los países latinoamericanos. Estos sensores constituyen una herramienta clave para el manejo sostenible de los recursos hídricos.

Palabras clave: sensores; calidad de agua; open-source; Latinoamérica; internet de las cosas.

Abstract

Monitoring water quality is critical to guaranteeing safe and clean water for human consumption, industrial processes, and aquatic life. The use of automatic sensors based on the Internet of Things and machine learning algorithms for monitoring water quality has become increasingly popular due to its ease of use, accuracy, and cost-effectiveness. In this review, we will discuss some of the sensors commonly used for monitoring water quality and their possible uses for aquifer monitoring and management in Latin America. The first part discusses the contamination of water sources in Latin America, especially in the Dominican Republic, where a review of the different works that evaluate contamination in water tributaries is provided. In addition, it is explored how the daily use of these water sources can affect human beings. In the last part of the work, the sensor technologies and their different implementations are presented, as well as the main challenges for their integration into the monitoring of water quality of water sources. This review demonstrated that remote water quality sensors based on IoT technologies and artificial intelligence algorithms are of great importance for controlling aquifer physicochemical contamination in Latin American countries. These sensors are a crucial tool for the sustainable management of water resources.

Keywords: Sensors; water quality; open-source; Latin America; internet of things.

Introducción

Contaminación fisicoquímica de los acuíferos

La contaminación fisicoquímica de fuentes de agua se refiere a la presencia de sustancias químicas, metales pesados y materiales físicos en el agua de los acuíferos en concentraciones que pueden afectar su calidad y, potencialmente, dañar la salud humana y la vida acuática (Ustaoglu et al., 2021). Esta contaminación puede provenir de diversas fuentes, como descargas industriales, aguas residuales domésticas y agrícolas, y vertidos ilegales de sustancias tóxicas; así como contaminación por descarga hospitalaria, la presión antrópica por parte de los poblados y ciudades situados en las márgenes de los ríos. Entre los principales contaminantes podemos mencionar los metales pesados, por ejemplo el plomo, el mercurio, el cadmio, el arsénico y el cromo, los cuales pueden acumularse en los cuerpos acuáticos y persistir por un largo tiempo (Acosta, 2015; Ayora Villalva, 2021; Kapoor & Singh, 2021; Sankhla et al., 2016).

Los contaminantes fisicoquímicos comunes en los ríos incluyen metales pesados, productos químicos orgánicos como pesticidas y herbicidas, materia orgánica, nutrientes, sedimentos y otros materiales que afectan la calidad del agua y su capacidad para sustentar la vida acuática y humana (Kapoor & Singh, 2021). La contaminación de los ríos con estas sustancias tiene graves consecuencias para la salud humana, ya que el agua contaminada contiene sustancias tóxicas que causan enfermedades si se consumen o se utilizan para la irrigación de cultivos (Tariq et al., 2020). También pueden dañar el medio ambiente y la vida acuática, afectando la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas acuáticos. Por lo tanto, es importante realizar esfuerzos para prevenir y controlar la contaminación fisicoquímica de los ríos y mantener la calidad del agua en niveles seguros y saludables (Kapoor & Singh, 2021; Malakootian et al., 2020; Tariq et al., 2020).

Los ríos afectados por la presencia de sustancias fisicoquímicas, por encima de los valores permisibles de calidad de las aguas superficiales, constituyen un problema que puede afectar tanto a la salud humana como al ecosistema acuático (Mokarram et al., 2020). Según el informe *Evaluación Mundial del Agua de las Naciones Unidas*, la contaminación del agua

es uno de los principales problemas ambientales que enfrenta la humanidad, y se estima que afecta a más de 1,200 millones de personas en el mundo (Uhlenbrook & Connor, 2019). En Latinoamérica se han desarrollado diferentes estudios sobre la contaminación fisicoquímica en los ríos y cómo esta puede impactar a los humanos y a la diversidad presente en estos cuerpos de agua.

En el informe de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), titulado *Agua, desarrollo y medio ambiente en América Latina* se aborda la problemática del acceso al agua en la región latinoamericana, así como las consecuencias de su uso en el desarrollo y el medio ambiente. Se destaca la importancia del agua como recurso estratégico para el progreso de las naciones, pero también como un bien común que debe ser gestionado de forma sostenible y justa. Se abordan temas como la falta de acceso al agua potable en zonas rurales y urbanas, la contaminación de ríos y acuíferos, la gestión de recursos hídricos y la necesidad de promover políticas públicas que garanticen el derecho al agua para todos (CEPAL, 1980; Martínez, 2020).

El artículo *Contaminación de aguas superficiales por residuos de plaguicidas en Venezuela y otros países de Latinoamérica* aborda la problemática de la contaminación de aguas superficiales por residuos de plaguicidas en Venezuela y otros países de Latinoamérica (Benitez-Díaz & Miranda-Contrera, 2013). Se destaca que el uso intensivo de estos productos químicos en la agricultura, la falta de control y supervisión de su aplicación y la ausencia de regulación adecuada de los niveles máximos permitidos de residuos en los alimentos son los principales factores que contribuyen a la contaminación de los cuerpos de agua. Se mencionan varios estudios y casos de contaminación en diferentes países de la región, y se enfatiza en la importancia de la implementación de medidas preventivas y de monitoreo continuo para proteger la calidad del agua y la salud pública. También se destaca la necesidad de una mayor conciencia y educación ambiental para promover prácticas agrícolas sostenibles y reducir la dependencia de los plaguicidas (Benitez-Díaz & Miranda-Contrera, 2013).

El informe del Banco Mundial, *Quality Unknown: The Invisible Water Crisis*, se centra en la situación del agua en América Latina y examina los

desafíos que enfrentan los países de la región para garantizar el acceso a agua potable y saneamiento (Damania et al., 2019). En el informe también se exponen los riesgos asociados con la contaminación del agua, la falta de infraestructura adecuada y la carencia de acceso a información confiable sobre la calidad del agua (Damania et al., 2019).

El estudio realizado por Pabón et al. (2020), se enfoca en la contaminación del agua por metales pesados, los que pueden ser tóxicos para la salud humana en concentraciones superiores a los valores establecidos en las normas de calidad de agua y el medio ambiente. Se discuten los diferentes métodos de análisis para detectar o cuantificar la presencia de metales pesados en el agua, como la espectroscopía y la electroquímica. También se mencionan las tecnologías de remoción de metales pesados como la adsorción, la precipitación, el intercambio iónico y la electrocoagulación. El artículo proporciona una visión general de los desafíos asociados con la contaminación del agua por metales pesados y las posibles soluciones tecnológicas para abordar este problema.

La contaminación de los ríos no solo afecta la vida terrestre, sino también la vida marina. En su investigación, Escobar (2002) determinó que alrededor del 70 % al 75 % de la contaminación marina a nivel global es generada por actividades humanas que ocurren en la superficie terrestre. Además, el 90 % de los contaminantes son transportados al mar por ríos. Por otra parte, entre un 70 % y 80 % de la población mundial, que equivale a aproximadamente 3.6 billones de personas, reside en zonas costeras, especialmente en áreas urbanas, donde una parte significativa de los residuos se arrojan directamente al océano (Escobar, 2002). Como resultado, muchos ecosistemas críticos, incluyendo bosques de manglares, arrecifes de coral, lagunas costeras y otras zonas de interfaz entre la tierra y el mar han sido alterados hasta el punto de no poder recuperarse (Pico-Lozano & Mendoza-Intriago, 2020). La alteración del curso de los ríos que desembocan en el mar y la interrupción del flujo de agua en estos ríos debido a la construcción de represas, extracción de áridos o canalización, también han afectado los ecosistemas marinos y sus ambientes asociados (Escobar, 2002).

Este artículo proporciona una revisión crítica de la investigación sobre la presencia de contaminantes en el medio ambiente y los alimentos en

América Latina. Se centra en dos categorías principales: los contaminantes heredados, que son aquellos que ya están presentes en el ambiente y el suelo, y los contaminantes emergentes, que surgen debido a nuevos productos químicos y actividades humanas.

En el trabajo titulado *Legacy and emerging pollutants in Latin America: A critical review of occurrence and levels in environmental and food samples* de Souza et al. (2022), se realizó una revisión crítica de los contaminantes en el medio ambiente y los alimentos, y su impacto potencial en la salud humana y los ecosistemas en la región. Al comprender la presencia y los niveles de estos contaminantes, se pueden tomar medidas adecuadas para proteger a las personas y el entorno natural. El artículo destaca la importancia de estudiar los contaminantes heredados, como por ejemplo los pesticidas, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes. Estos contaminantes pueden haber estado presentes durante mucho tiempo en el ambiente y acumularse en los alimentos y en los tejidos vivos, representando riesgos para la salud humana y la biodiversidad. Además, el artículo también aborda los contaminantes emergentes, que son el resultado de nuevos productos químicos y actividades industriales. Estos contaminantes incluyen productos farmacéuticos y químicos utilizados en la fabricación de bienes de consumo y disruptores endocrinos. Es importante comprender la presencia y los niveles de estos contaminantes emergentes para evaluar los posibles riesgos para la salud humana y el medio ambiente (Souza et al., 2022).

El artículo de Torres-Palma et al. (2022) aborda la importancia de comprender los contaminantes de preocupación emergente (CECs) y su impacto en el suelo, el agua y las corrientes de aire. Se centra específicamente en los avances y desafíos relacionados con los CECs en países iberoamericanos. La revisión examina la presencia y los niveles de los CECs en estos países, así como las fuentes y las rutas de contaminación. También, se analizan los posibles impactos en la salud humana y el medio ambiente asociados con estos contaminantes. Por otro lado, el artículo destaca los avances en técnicas de eliminación de los CECs, como los procesos de oxidación avanzada, la adsorción con carbón activado y la filtración por membrana. Se presentan casos de estudio exitosos y se discuten estrategias emergentes para fomentar la adopción de métodos efectivos de eliminación

de CECs en países iberoamericanos. El trabajo también aborda los desafíos que enfrentan estos países, como la falta de datos y la necesidad de colaboración interdisciplinaria. Se enfatiza la importancia de desarrollar políticas y regulaciones adecuadas, así como de promover la cooperación entre los países iberoamericanos en la gestión de los CECs.

En el trabajo de dos Santos et al. (2023) el equipo examina a fondo el potencial del tratamiento descentralizado de agua y aguas residuales mediante procesos electrificados en los países de América Latina. Se analizan los desafíos que enfrenta la región en este ámbito, así como las oportunidades de innovación que pueden contribuir a mejorar el tratamiento del agua. Es fundamental abordar de manera sostenible las necesidades de agua de las poblaciones en países que carecen de infraestructura adecuada, y el enfoque descentralizado con procesos electrificados se presenta como una solución prometedora. América Latina se enfrenta a numerosos desafíos en términos de tratamiento del agua, incluida la falta de infraestructura y la escasez de recursos. El tratamiento descentralizado ofrece una alternativa eficaz al evitar la necesidad de extensas redes de tuberías y plantas de tratamiento centralizadas. Este artículo explorará en detalle el potencial de este enfoque en la región latinoamericana y su capacidad para abordar los desafíos actuales. Se examinan las oportunidades de innovación que pueden impulsar mejoras significativas en el tratamiento del agua. Se destacarán las tecnologías emergentes y las mejores prácticas en el campo, junto con casos exitosos de implementación en América Latina (dos Santos et al., 2023).

Las investigaciones anteriormente citadas sobre la contaminación físicoquímica de los acuíferos en Latinoamérica demuestran la alta exposición de la población a contaminantes ambientales y la complejidad de los factores que contribuyen a la contaminación (Peña-Guzmán et al., 2019). Los estudios en las diferentes fuentes de agua pueden proporcionar información valiosa sobre los riesgos para la salud humana y el medio ambiente, y ayudar a establecer medidas de mitigación y control. Además, las investigaciones realizadas en los diferentes acuíferos pueden mejorar la comprensión de los impactos de la contaminación en los ecosistemas y en la economía, así como promover políticas públicas y prácticas empresariales más sostenibles.

La calidad del agua en Latinoamérica es de suma importancia debido a su relevancia en diversas actividades como el consumo humano, la agricultura, la industria y la preservación del ecosistema. Sin embargo, la región enfrenta numerosos desafíos en términos de contaminación, escasez de agua y falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto, es fundamental llevar a cabo una revisión narrativa de la literatura publicada sobre los sensores de calidad de agua utilizados en la región con el fin de evaluar y monitorear eficazmente la calidad del agua y tomar decisiones informadas para su gestión. Aunque existen sensores y tecnologías disponibles en el mercado para el monitoreo de la calidad del agua, es importante realizar una revisión actualizada y específica para Latinoamérica. Las características geográficas, climáticas y socioeconómicas de la región pueden influir en los requerimientos y desafíos del monitoreo de calidad del agua. Asimismo, es necesario evaluar la disponibilidad, precisión, costo y mantenimiento de los sensores existentes, así como identificar las limitaciones y brechas en su implementación en la región.

Se espera que esta revisión narrativa sobre sensores de calidad de agua y contaminación de fuentes de agua en Latinoamérica tenga un impacto directo en la toma de decisiones y en el diseño de políticas públicas relacionadas con la gestión del agua. Además de proporcionar información valiosa sobre las tecnologías disponibles, sus ventajas y desventajas, así como lecciones aprendidas de estudios y proyectos previos en la región.

Búsqueda en base de datos

En este trabajo de revisión se realizó una búsqueda bibliográfica de publicaciones científicas y técnicas publicadas en bases de datos como Google académico, Pudmed Central y el Portal Dominicano de Información Científica, Tecnológica, Humanística y Social con palabras clave en español e inglés como: “sensores de agua + Latinoamérica”; “contaminación de acuíferos + Latinoamérica”; “sensores de bajo costo + Latinoamérica”; “sensores en ríos + Latinoamérica”, “contaminación de ríos + Latinoamérica”; “*surface water contamination effects*”; “*surface water contamination*” donde fueron identificados un total de 254 trabajos publicados desde el 2010 hasta el 2023, aunque también se incluyeron investigaciones relevantes de años

anteriores sobre la contaminación de los acuíferos y el uso de sensores en la región de Latinoamérica, estos estudios fueron filtrados y se seleccionaron un total de 45 trabajos sobre los temas de contaminación de fuentes de agua y el uso de sensores para el monitoreo de la calidad del agua.

Contaminación fisicoquímica de los ríos y agua de consumo humano en República Dominicana

En la República Dominicana, se han desarrollado varias investigaciones sobre el impacto de la contaminación fisicoquímica en las cuencas de los principales ríos del país (Espinal et al., 1993). Uno de los primeros estudios publicados en este campo fue el artículo “Contaminación química y bacteriológica de los ríos Ozama e Isabela”, en el cual se desarrolló un estudio para evaluar la calidad del agua en los puntos de muestreo seleccionados en ambas cuencas. Los resultados muestran que los ríos están altamente contaminados con niveles excesivos de metales pesados y bacterias coliformes fecales, lo que indica la presencia de contaminación orgánica e inorgánica. Se identificaron las fuentes de contaminación como el vertido de aguas residuales y la descarga de desechos tóxicos industriales, entre otras. Se concluye que se necesita un enfoque integral para abordar la contaminación de los ríos y se recomienda la implementación de medidas preventivas y correctivas para proteger la calidad del agua y la salud pública (Espinal et al., 1993).

En el trabajo “Determinación de metales pesados en aguas y sedimentos del río Haina”, sus autores evaluaron la presencia de metales pesados en las aguas y sedimentos del río Haina en la República Dominicana (Contrera Pérez et al., 2004). Se recolectaron muestras en diferentes puntos del río y se analizaron para determinar la concentración de metales como plomo, cadmio, mercurio, zinc, cobre y níquel. Los resultados indicaron que las concentraciones de metales pesados en las aguas y sedimentos del río Haina excedían los límites establecidos por las normas nacionales como la “Norma ambiental de calidad de aguas superficiales y costeras” (Ministerio de Medio Ambiente, 2012) y normas internacionales (Gaba, 1983), lo que representa un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Los autores sugieren que se deben implementar medidas de control y gestión ambiental para reducir la contaminación del río y mejorar su calidad (Contrera Pérez et al., 2004).

El trabajo de Phillips et al. (2007), describe los efectos de la escorrentía de origen difuso y las aguas residuales urbanas en la calidad del agua del río Yaque del Norte, el más grande de la República Dominicana. Se realizaron muestreos en diferentes puntos de la cuenca para analizar la presencia de contaminantes como nutrientes, metales pesados y bacterias fecales. Los resultados indicaron que la escorrentía de origen difuso proveniente de actividades agrícolas y la descarga de aguas residuales urbanas son las principales fuentes de contaminación del afluente. Además, se encontró que la concentración de contaminantes microbiológicos y fisicoquímicos en el río superaron los límites recomendados, según la “Norma ambiental de calidad de aguas superficiales y costeras” para el uso recreativo y la vida acuática. Se concluye que es necesario implementar medidas de gestión y tratamiento de aguas residuales para mejorar la calidad del agua del río Yaque del Norte y proteger su ecosistema acuático y la salud humana.

El estudio de la calidad de agua realizado por Baum et al. (2014) evaluó la calidad microbiana del agua potable mejorada en la República Dominicana, utilizando un muestreo aleatorio de 60 puntos de abastecimiento de agua en tres regiones del país. Se analizaron las muestras para determinar la presencia de *Escherichia coli* y coliformes fecales totales, y se encontró que el 43 % de las muestras no cumplían con los estándares de la Organización Mundial de la Salud para agua potable segura (OMS, 2011). A su vez, se observaron diferencias significativas en la calidad del agua entre las tres regiones estudiadas. Los hallazgos destacan la necesidad de una mayor atención y monitoreo de la calidad del agua potable mejorada en la República Dominicana.

Rogers-Brown et al. (2016) desarrollaron un plan piloto para examinar las disparidades en la calidad del agua entre barrios habitados por mayoría haitiana y barrios dominicanos en dos ciudades de la República Dominicana. Se recolectaron muestras de agua de grifo en 20 hogares y se midieron los parámetros de turbiedad, pH, cloro residual, coliformes fecales y totales. Los resultados mostraron que la calidad del agua en las viviendas de barrios predominantemente haitianos es significativamente peor que en los hogares de barrios dominicanos, presentando mayores concentraciones de coliformes fecales y totales y una mayor de turbiedad.

El artículo titulado *La contaminación del agua superficial del río Yaque del Norte* abordó la problemática de la contaminación de este importante río de la República Dominicana, que abastece de agua potable a una gran parte de la población (Guzmán, 2017). El estudio se enfoca en la evaluación de la calidad del agua en diferentes puntos del río y en la identificación de los principales contaminantes microbiológicos y fisicoquímicos tanto de origen puntual como no puntual. Los resultados revelan altos niveles de contaminación en los diferentes puntos de colecta, con concentraciones elevadas de materia orgánica, nutrientes, metales pesados y otros contaminantes. Además, se identificaron varias fuentes de contaminación como descargas de aguas residuales sin tratamiento, vertidos de industrias y prácticas agrícolas inadecuadas. El artículo destaca la importancia de tomar medidas para prevenir la contaminación y mejorar la calidad del agua del río Yaque del Norte como la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles. También, se enfatiza la necesidad de involucrar a la comunidad en la gestión del recurso hídrico y en la adopción de prácticas más responsables en el uso y manejo del agua (Guzmán, 2017).

El reporte de la Autoridad Portuaria de Asuntos Marítimos (ANAMAR), titulado “Análisis de los niveles contaminantes en zonas costeras mediante la determinación de concentraciones de isótopos estables: caso estuario río Ozama”, se enfocó en la evaluación de la calidad del agua en la zona costera del estuario del río Ozama en la República Dominicana, mediante el análisis de la concentración de isótopos estables. Se encontró que los niveles de contaminación mediante isótopos en el estuario eran elevados, con altas concentraciones de metales pesados y nutrientes, en las muestras obtenidas del efluente. Los resultados indicaron que la contaminación proviene de una variedad de fuentes, incluyendo actividades industriales y residenciales, así como descargas de aguas residuales no tratadas. El estudio destaca la importancia del monitoreo continuo y la implementación de medidas de control para mejorar la calidad del agua en el estuario y proteger la salud humana y el medio ambiente (Vargas, 2017).

En el trabajo final de grado titulado *Estudio de la calidad de las aguas superficiales y caracterización de la cuenca del río Cabón, afluente del río Ozama, ubicado en Santo Domingo Norte, República Dominicana, 2017*,

los investigadores se enfocaron en la realización de muestreos y análisis físico-químicos y bacteriológicos en diferentes puntos del río (González Pujols & Clases, 2018). Los resultados indicaron que la calidad del agua del río Cabón es afectada por la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo metales pesados y materia orgánica. Asimismo, se identificaron diversas fuentes de contaminación como la actividad agrícola, la disposición inadecuada de residuos sólidos y el vertido de aguas residuales sin tratamiento. Se recomienda la implementación de medidas de protección y manejo de la cuenca para mejorar la calidad del agua y prevenir la contaminación (González Pujols & Clases, 2018).

La investigación de Moreno Bereguete (2020) se enfocó en el estudio de la calidad del agua y las fuentes de contaminación en el arroyo Yerba Buena en Jarabacoa, República Dominicana. Se recolectaron muestras de agua de diferentes puntos a lo largo del arroyo y se analizaron para determinar la concentración de contaminantes, como sólidos suspendidos totales, metales pesados y coliformes fecales. Los resultados indicaron que el arroyo estaba altamente contaminado, principalmente debido a la descarga de aguas residuales de hogares y negocios cercanos. Además, se encontró que la deforestación y la erosión del suelo también contribuían a la contaminación del agua. Se concluyó que se requieren medidas urgentes para mejorar la gestión de aguas residuales y promover prácticas sostenibles de uso de la tierra para proteger la calidad del agua del arroyo Yerba Buena, y garantizar la salud pública y el bienestar ambiental en la zona.

El trabajo de Calderón et al. (2021) analizó la distribución de aislamientos bacterianos gramnegativos productores de betalactamasas en el río Isabela de Santo Domingo, República Dominicana. El objetivo principal de este estudio es determinar la presencia y distribución de bacterias gramnegativas productoras de betalactamasas, en particular, en el río Isabela. Se llevó a cabo la recopilación de muestras de agua del río y se realizaron análisis microbiológicos para identificar y caracterizar las bacterias gramnegativas productoras de betalactamasas presentes en la muestra. La importancia de este estudio radica en comprender la distribución de estas bacterias resistentes en un ecosistema acuático crucial para la ciudad de Santo Domingo como el río Isabela. Esto proporciona información relevante sobre la prevalencia de bacterias resistentes y su posible impacto en

la salud pública y el medio ambiente. Los resultados obtenidos ofrecen información valiosa sobre la presencia de bacterias resistentes en el ecosistema acuático y resaltan la necesidad de abordar este problema para proteger la salud pública y el medio ambiente.

El trabajo publicado por Bonnelly et al. (2023) presenta una investigación sobre la susceptibilidad de las bacterias encontradas en las aguas del río Ozama en Santo Domingo, República Dominicana, hacia los antibióticos betalactámicos. Los resultados del estudio revelaron la presencia de múltiples bacterias resistentes a estos antibióticos, lo que plantea una potencial amenaza para la salud pública y el medio ambiente. En vista de esto, se sugiere la necesidad de aumentar la vigilancia y el monitoreo de las aguas y suelos en la región, con el objetivo de prevenir la propagación de bacterias resistentes a los antibióticos. Esta investigación resalta la importancia de implementar medidas de control y promover prácticas adecuadas de uso de antibióticos para salvaguardar la eficacia de estos medicamentos y proteger la salud de la población, además de medidas para disminuir la contaminación de los ríos urbanos con sustancias que puedan contribuir al aumento de la contaminación microbiana.

En general, estos estudios indican que la contaminación fisicoquímica y microbiológica de los ríos es un problema común en todo el mundo, y que puede tener un impacto negativo en la calidad del agua y en la salud humana y del ecosistema. Es importante realizar estudios de monitoreo y control para identificar las fuentes de contaminación y tomar medidas para mejorar la calidad del agua de los ríos.

Principales parámetros para la medición de la contaminación fisicoquímica en los ríos

La medición de los contaminantes fisicoquímicos en los ríos es importante porque permite evaluar la calidad del agua y determinar si es adecuada para uso humano y ecosistémico (Tariq et al., 2020). La contaminación fisicoquímica proviene de diversas fuentes como la industria, la agricultura, las descargas de aguas residuales y la escorrentía urbana, y puede afectar la salud humana, la vida acuática y los ecosistemas en general. Por lo tanto, la medición de los contaminantes fisicoquímicos en los ríos

es esencial para monitorear la salud del ambiente y tomar medidas para prevenir y mitigar la contaminación (Meneses-Campo et al., 2019; Tariq et al., 2020).

La identificación y seguimiento de los contaminantes permite establecer planes de acción para controlar y reducir la contaminación, protegiendo la salud humana y la biodiversidad acuática (Samboni Ruiz et al., 2007).

La medición de los contaminantes fisicoquímicos se realiza mediante la toma de muestras de agua y el posterior análisis en laboratorio. Los parámetros que se miden incluyen la temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos suspendidos, nutrientes, metales pesados, compuestos orgánicos, entre otros parámetros que pueden incluir las diferentes normas nacionales e internacionales (Gholizadeh et al., 2016).

Los principales parámetros que son utilizados para la medición de la contaminación fisicoquímica de los ríos y fuentes de agua son los siguientes:

- **Temperatura:** la temperatura del agua puede afectar la solubilidad de los contaminantes y la vida acuática. Se puede medir con termómetros digitales o de mercurio (APHA, 2017).
- **pH:** es uno de los parámetros más comunes para medir la calidad del agua. Este es una medida de la acidez o alcalinidad del agua y puede afectar la solubilidad y la toxicidad de los contaminantes. Se puede medir con medidores de pH y existen diferentes tipos, pero los más comunes son los electrónicos (Skoog et al., 2017). Un pH entre 6.5 y 8.5 se considera aceptable para la vida acuática y para los usos recreativos del agua (APHA, 2017).
- **Conductividad eléctrica:** la conductividad eléctrica es un indicador de la presencia de iones disueltos en el agua. Para medir la conductividad eléctrica del agua, se utiliza un dispositivo llamado conductímetro o medidor de conductividad. Estos instrumentos constan de dos electrodos, generalmente de metal, que se sumergen en el agua (Skoog et al., 2017). Estudios han demostrado una alta correlación entre la conductividad eléctrica y la concentración de nitratos y fosfatos en el agua (APHA, 2017; Rodríguez, 2010).

- Oxígeno disuelto: el oxígeno disuelto es esencial para la vida acuática y puede verse afectado por la contaminación (Wei et al., 2019). Puede ser medido a través de medidores de oxígeno disuelto basado en la tecnología de la galvanización. Este tipo de medidor utiliza una sonda o electrodo especial sumergido en el agua que contiene una membrana permeable al oxígeno (Skoog et al., 2017). Un valor de oxígeno disuelto menor a 5 mg/L indica una condición de hipoxia que puede ser letal para la vida acuática (APHA, 2017).
- La DBO es una medida de la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica presente en el agua (Rodríguez, 2010). Una alta concentración de DBO, indica una mayor presencia de materia orgánica y mayor contaminación en el agua. Se puede medir mediante pruebas de laboratorio, las cuales realizan a través un ensayo que implica tomar una muestra de agua y medir el contenido de oxígeno disuelto en ella en dos momentos diferentes: al inicio (DBO inicial) y después de un período de incubación en el que los microorganismos consumen el oxígeno mientras descomponen la materia orgánica (DBO final). La diferencia entre la DBO inicial y la DBO final representa la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos y se expresa en miligramos de oxígeno por litro de agua (mg/L) (APHA, 2017; Rodríguez, 2010).
- Sólidos suspendidos totales (SST): los SST son partículas físicas que se encuentran en suspensión en el agua (Rodríguez, 2010). Los SST pueden ser utilizados para identificar la erosión del suelo y otras fuentes de contaminación en los ríos (APHA, 2017; Rodríguez, 2010). La turbidez es una medida indirecta de los SST, ya que se basa en la capacidad de las partículas suspendidas para dispersar la luz. Se utiliza un instrumento llamado turbidímetro, que emite un haz de luz a través de la muestra de agua y mide la cantidad de luz dispersada por las partículas suspendidas (Skoog et al., 2017).
- Metales pesados: los metales pesados como mercurio, plomo y cadmio pueden ser tóxicos para la vida acuática y humana. La presencia de estos en los ríos puede ser causada por actividades mineras e industriales (APHA, 2017; Kapoor & Singh, 2021). Para su determinación, los metales pesados pueden formar complejos coloreados con reactivos

específicos para cada metal. La intensidad del color formado es proporcional a la concentración del metal pesado presente en el agua. Este método es relativamente simple y económico, pero puede ser menos preciso y selectivo en comparación con otros métodos (Malik et al., 2019).

- Contaminantes orgánicos: los contaminantes orgánicos como pesticidas y herbicidas pueden ser tóxicos para la vida acuática y humana. La presencia de contaminantes orgánicos en los ríos puede ser causada por actividades agrícolas (APHA, 2017; de Souza et al., 2020; Endara et al., 2020).
- Nutrientes (nitrógeno y fósforo): los nutrientes pueden provenir de fuentes naturales y antropogénicas, y causar proliferación excesiva de algas y otras especies acuáticas. Se miden mediante pruebas de laboratorio (APHA, 2017; Sharpley, 2016).

A través de la medición de estos parámetros, se determina si el agua cumple con los estándares de calidad establecidos por las autoridades competentes de los diferentes países y las normas vigentes en estos, además se pueden identificar posibles fuentes de contaminación para tomar medidas preventivas y correctivas. Este tipo de contaminación afecta la calidad del agua y, por lo tanto, la salud de las personas y el medio ambiente. Algunos de los problemas que pueden surgir incluyen:

- Reducción de la disponibilidad de agua potable y el aumento del costo de purificación del agua, debido a las deficiencias en el acceso al agua potable por la población y la falta de disponibilidad por causa de la contaminación acuática.
- Muerte de animales acuáticos y pérdida de biodiversidad (Walker et al., 2019).
- Afectación de la calidad del suelo y la salud de las plantas, lo que impacta directamente los cultivos y la producción de alimentos en los países (Walker et al., 2019).
- Posible contaminación de la cadena alimentaria y daños a la salud humana (Walker et al., 2019).

Por esta razón es importante realizar un monitoreo constante de los ríos a través de medios autónomos y de mediciones repetidas como son los sensores para la detección de la calidad de agua, que permitan identificar las fuentes de contaminación de forma rápida y eficiente.

Sensores remotos para la detección de contaminación en agua

El monitoreo de la calidad del agua es un aspecto crítico para garantizar agua segura y limpia para el consumo humano, los procesos industriales y la vida acuática (Gholizadeh et al., 2016). El uso de sensores para monitorear la calidad del agua ha aumentado su popularidad debido a su facilidad de uso, precisión y rentabilidad. La medición de los contaminantes físicoquímicos en el agua es esencial para evaluar la calidad del agua y garantizar su seguridad para los seres humanos y el medio ambiente. Esto se debe a que la presencia de contaminantes puede tener un impacto negativo en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos (Gholizadeh et al., 2016; Raich, 2013; Samboni Ruiz et al., 2007).

Podemos definir un sensor de calidad de agua como un dispositivo que mide y monitorea ciertos parámetros físicos, químicos o biológicos del agua para evaluar su calidad. Algunos de estos incluyen la temperatura, el pH, la turbidez, la conductividad eléctrica, la concentración de oxígeno disuelto y la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Bhardwaj et al., 2015; Kruse, 2018; UN-SPIDER, 2020). Un sensor es un dispositivos diseñado para medir de manera continua o periódica diferentes variables físicas, químicas y biológicas que caracterizan la calidad del agua (Gholizadeh et al., 2016). Estos sistemas proporcionan información en tiempo real y permiten monitorear el estado del agua de manera constante, detectar anomalías, tomar decisiones y actuar de forma preventiva o correctiva para evitar o reducir los impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana (Gholizadeh et al., 2016; Raich, 2013).

Diversos estudios, han explorado el uso de sensores para el monitoreo de las aguas de diferentes acuíferos como ríos y lagos, utilizando tecnologías basada en el internet de las cosas (IoT) y plataformas de prototipaje electrónica como Arduino o computadores basados en placas como Raspberry Pi (Ting & Yee, 2020). En el trabajo realizado por Zulkifli et al. (2022), se realizó una revisión sobre los diferentes sistemas de monitoreos basados

en IoT, que se han desarrollado para estudiar diferentes cuencas en diversos países y regiones, para la detección de contaminantes, medición de la calidad de agua y el observación del acuíferos en tiempo real, demostrando que este tipo de dispositivos pueden ser vitales para la gestión eficiente del recurso agua (Zulkifli et al., 2022).

En la revisión realizada por Dong et al. (2015), los autores recompilaron una variedad artículos científicos sobre sistemas de monitoreo de calidad de agua, incluyendo sistemas basados en IoT, sistemas de monitoreo en la nube y sistemas de monitoreo de la calidad del agua en tiempo real. En esta revisión se hace una comparación sobre estos métodos independientes y los métodos tradicionales, precisan una estructura de laboratorios, implican un costo elevado, requieren más tiempo y no proporcionan una supervisión continua, debido a que se necesita la colecta de muestras de agua, que muchas veces no son realizadas de forma frecuente. Los autores concluyen que unos de los mayores beneficios de los sensores remotos son la reducción de costos, la mejora de la eficiencia en la gestión del agua y la detección temprana de problemas de calidad del agua.

Algunos estudios recientes como el de O'Grady et al. (2021) donde los autores realizaron una revisión sobre los monitores de calidad de agua usando una plataforma tecnológica basada en sensores remotos y sistemas de información geográficas de las áreas de las cuencas. El trabajo discute los beneficios y desafíos de cada nivel de tecnología, así como las estrategias para integrar los datos recolectados de diferentes niveles. En conclusión, los autores muestran una visión general de las tecnologías de monitoreo de calidad del agua en las cuencas, y sugieren que la integración de diferentes niveles de tecnología puede mejorar la eficacia del monitoreo y la gestión de la calidad del agua.

En el trabajo presentado por Yaroshenko et al. (2020), los autores revisaron los avances recientes en la tecnología de sensores químicos y su aplicación en el monitoreo de la calidad del agua en tiempo real. Los sensores químicos son capaces de medir una amplia gama de parámetros de calidad del agua como la concentración de iones, la turbidez, la conductividad y el pH. El equipo discute cómo estos sensores químicos se integran a sistemas de monitoreo en tiempo real para proporcionar una supervisión

continua y automatizada de la calidad del agua. Estos sistemas ayudan a detectar rápidamente los cambios en la calidad del agua y permitir una respuesta inmediata a los problemas de calidad del agua.

Conclusión

La investigación sobre la contaminación fisicoquímica en los acuíferos es importante para Latinoamérica debido a la alta exposición de la población a contaminantes ambientales y la complejidad de los factores que contribuyen a la contaminación. Los estudios en la contaminación acuática proporcionarían información valiosa acerca de los riesgos para la salud humana y el medio ambiente, y pueden ayudar a establecer medidas de mitigación y control.

El uso de sensores remotos de calidad de agua, basados en tecnologías de IoT y algoritmos de inteligencia artificial son de importantes para monitorear y controlar los vertidos contaminantes en el río latinoamericano. Estos sensores constituyen una herramienta clave para el manejo sostenible de los recursos hídricos. La implementación del sistema de monitoreo de tiempo real permite la supervisión sostenible y automática de la calidad del agua, para que pueda responder de manera rápida y efectiva al problema de contaminación.

Por otro lado, además, los sensores de calidad del agua pueden medir los extensos parámetros químicos y físicos como la temperatura, el pH, la conductividad y la turbidez, parámetros que permiten estudiar la calidad del agua y el impacto de la contaminación de los acuíferos en el medio ambiente y la salud humana.

El monitoreo y manejo de datos presenta grandes desafíos, y abordarlos de manera efectiva requiere de una infraestructura adecuada, así como capacitación del personal encargado de supervisar la operación del sistema. Además, la coordinación es esencial entre las autoridades locales y las comunidades.

Los ríos latinoamericanos pueden beneficiarse enormemente del uso de sensores de calidad del agua para la prevención de la contaminación

fisicoquímica, lo que lleva a una gestión sostenible del agua y a la protección de la salud humana y ambiental. El uso de estos dispositivos promete ser una herramienta eficaz para lograr estos objetivos.

Agradecimientos

El presente trabajo fue desarrollado con el apoyo del Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología de la República Dominicana a través del Fondo Nacional de Innovación y Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDOCYT), mediante el proyecto: Estimación de la calidad de agua en las cuencas Ozama, Isabela y Haina a través de una red de sensores móviles, basados en hardware *open-source* (Cod. 2022-3A4-255).

Referencias

- Acosta, G. F. (2015). Caracterización físico-química y microbiológica del agua del río Soacha, Cundinamarca, Colombia. *RIAA*, 6(2), 119-144. <https://doi.org/10.22490/21456453.1410>
- APHA, American Public Health Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (sud.); T. 6). n.
- Ayora Villalva, E. N. (2021). *Evaluación de la contaminación físico-química y microbiológica de aguas del Estero Salado, puente de Gómez Rendón, Guayaquil-Ecuador año 2021*. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Químicas.
- Baum, R., Kayser, G., Stauber, C. & Sobsey, M. (2014). Assessing the microbial quality of improved drinking water sources: results from the Dominican Republic. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 90(1), 121.
- Benitez-Díaz, P. & Miranda-Contrera, L. (2013). Contaminación de aguas superficiales por residuos de plaguicidas en Venezuela y otros países de Latinoamérica. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 29, 7-23.
- Bhardwaj, J., Gupta, K. K. & Gupta, R. (2015). A review of emerging trends on water quality measurement sensors. *2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD)*, 1-6.

- Bonnelly, R., Queiroz Cavalcante, A. L., Calderon, V. V., Baraúna, R. A., Jucá Ramos, R. T., Rodríguez-Rodríguez, Y., De Francisco, L. E. R., Maroto Martín, L. O., Perdomo, O. P. & Franco De Los Santos, E. F. (2023). Beta-lactam susceptibility profiles of bacteria isolated from the Ozama river in Santo Domingo, Dominican Republic. *Sustainability*, 15(6), 5109.
- Calderón, V. V., Bonnelly, R., Del Rosario, C., Duarte, A., Baraúna, R., Ramos, R. T., Perdomo, O. P., Rodriguez de Francisco, L. E. & Franco, E. F. (2021). Distribution of Beta-Lactamase Producing Gram-Negative Bacterial Isolates in Isabela River of Santo Domingo, Dominican Republic. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.519169>
- CEPAL, C. E. para A. L. y el C. (1980). Agua, desarrollo y medio ambiente en América Latina: informe. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*.
- Contrera Perez, J. B., Mendoza, C. L. & Gómez, A. (2004). Determinación de metales pesados en aguas y sedimentos del Río Haina. *Ciencia y Sociedad*, 29(I), 38-71.
- Damania, R., Desbureaux, S., Rodella, A.-S., Russ, J. & Zaveri, E. (2019). *Quality unknown: the invisible water crisis*. World Bank Publications.
- de Souza, R. M., Seibert, D., Quesada, H. B., de Jesus Bassetti, F., Fagundes-Klen, M. R. & Bergamasco, R. (2020). Occurrence, impacts and general aspects of pesticides in surface water: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 135, 22-37.
- Dong, J., Wang, G., Yan, H., Xu, J. & Zhang, X. (2015). A survey of smart water quality monitoring system. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 4893-4906.
- dos Santos, A. J., Barazorda-Ccahuana, H. L., Caballero-Manrique, G., Chérémond, Y., Espinoza-Montero, P. J., González-Rodríguez, J. R., Jáuregui-Haza, U. J., Lanza, M. R. V, Nájera, A. & Oporto, C. (2023). Accelerating innovative water treatment in Latin America. *Nature Sustainability*, 1-3.
- Endara, A. de las M. G., Heinert, M. E. J. & Solórzano, H. X. P. (2020). Contaminación del agua y aire por agentes químicos. *RECIMUNDO*, 4(4), 79-93.

- Escobar, J. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. CEPAL.
- Espinal, G., Mendoza Gómez, C. L., Contreras Pérez, J. B. & Vásquez, J. (1993). Contaminación química y bacteriológica de los ríos Ozama e Isabela. *Ciencia y Sociedad*, XVII(1), 31-39. <http://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/bitstream/handle/123456789/822/10.22206%-25cys%25y1993%25v18%25i1%25p031-039.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gaba, J. M. (1983). Federal Supervision of State Water Quality Standards Under the Clean Water Act. *Vand. L. Rev.*, 36, 1167.
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M. & Reddi, L. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors (Switzerland)* (T. 16, Numeris 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s16081298>
- González Pujols, N. S. & Clases, S. J. (2018). *Estudio de la calidad de las aguas superficiales y caracterización de la cuenca del río Cabón, afluente del río Ozama, ubicado en Santo Domingo Norte República Dominicana 2017* [Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña]. <https://repositorio.unphu.edu.do/bitstream/handle/123456789/1113/Estudio%20de%20la%20calidad%20de%20las%20aguas%20superficiales%20y%20caracterización%20de%20la%20cuenca%20del%20Río%20Cabón%2C%20afluente%20del%20Río%20Ozama%2C%20ubicado%20en%20Santo%20Domingo%20Norte%20República%20D.pdf?sequence=1&isAllo>
- Guzmán, J. A. A. (2017). La contaminación del agua superficial del Río Yaque del Norte. *Desarrollo Local Sostenible*, 1.
- Kapoor, D. & Singh, M. P. (2021). Heavy metal contamination in water and its possible sources. *Heavy metals in the environment* (pp. 179-189). Elsevier.
- Kruse, P. (2018). Review on water quality sensors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(20), 203002.
- Malakootian, M., Mohammadi, A. & Faraji, M. (2020). Investigation of physicochemical parameters in drinking water resources and health risk assessment: a case study in NW Iran. *Environmental Earth Sciences*, 79(9), 195.

- Malik, L. A., Bashir, A., Qureshi, A. & Pandith, A. H. (2019). Detection and removal of heavy metal ions: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 1495-1521.
- Martínez, A. P. (2020). El derecho humano al agua y al saneamiento y su relación con la protección del medio ambiente en América Latina. *Anuario de derechos humanos*, 16(1), 99-118.
- Meneses-Campo, Y., Castro-Rebolledo, M. I. & Jaramillo-Londoño, A. M. (2019). Comparación de la calidad del agua en dos ríos altoandinos mediante el uso de los índices BMWP/COL. y ABI. *Acta biológica colombiana*, 24(2), 299-310.
- Ministerio de Medio Ambiente, R. D. (2012). *Norma ambiental de calidad de aguas superficiales y costeras* (p. 12). <http://ambiente.gob.do/files/Norma-Ambiental-sobre-Control-de-Descargas-a-Aguas-Superficiales-alcantarillado-sanitario-y-aguas-costeras.pdf>
- Mokarram, M., Saber, A. & Sheykhi, V. (2020). Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123380.
- Moreno Bereguete, A. C. (2020). *Análisis de calidad de agua y fuentes de contaminación del arroyo Yerba Buena en Jarabacoa, República Dominicana*. CATIE.
- O'Grady, J., Zhang, D., O'Connor, N. & Regan, F. (2021). A comprehensive review of catchment water quality monitoring using a tiered framework of integrated sensing technologies. *Science of The Total Environment*, 765, 142766.
- Organización Mundial de la Salud. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. *World Health Organization, Ginebra*, IV(4).
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A. & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.
- Peña-Guzmán, C., Ulloa-Sánchez, S., Mora, K., Helena-Bustos, R., López-Barrera, E., Álvarez, J. & Rodríguez-Pinzón, M. (2019). Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. *Journal of environmental management*, 237, 408-423.

- Phillips, P., Russell, F. A. & Turner, J. (2007). Effect of non-point source runoff and urban sewage on Yaque del Norte River in Dominican Republic. *International Journal of Environment and Pollution*, 31(3-4), 244-266.
- Pico-Lozano, E. & Mendoza-Intriago, M. (2020). Evaluación de la calidad del agua de mar en la desembocadura del río Manta y sus efectos en la supervivencia de larvas de camarón blanco (*Litopenaeus Vannamei*). *Revista de Ciencias del Mar y Acuicultura YAKU*. 3(6), 13-20.
- Raich, J. (2013). Review of sensors to monitor water quality. *European reference network for critical infrastructure protection (ERNICIP) project*.
- Rodríguez, J. P. (2010). Contaminación del agua. *Contaminación ambiental en Colombia* (pp. 255-300). *Fundación en causa por el desarrollo humano*.
- Rogers-Brown, J., Johnson, R., Smith, D. & Ramsey-White, K. (2016). A pilot study to examine the disparities in water quality between predominantly Haitian neighborhoods and Dominican neighborhoods in two cities in the Dominican Republic. *International journal of environmental research and public health*, 13(1), 39.
- Samboni Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y. & Escobar, J. C. (2007). A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v27n3.14858>
- Sankhla, M. S., Kumari, M., Nandan, M., Kumar, R. & Agrawal, P. (2016). Heavy metals contamination in water and their hazardous effect on human health-a review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 5(10), 759-766.
- Sharpley, A. (2016). Managing agricultural phosphorus to minimize water quality impacts. *Scientia Agricola*, 73, 1-8.
- Skoog, D. A., Holler, F. J. & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis*. Cengage learning.
- Souza, M. C. O., Rocha, B. A., Adeyemi, J. A., Nadal, M., Domingo, J. L. & Barbosa Jr, F. (2022). Legacy and emerging pollutants in Latin America: A critical review of occurrence and levels in environmental and food samples. *Science of the Total Environment*, 848, 157774.

- Tariq, M., Anayat, A., Waseem, M., Rasool, M. H., Zahoor, M. A., Ali, S., Rizwan, M., Abdel-Daim, M. M. & Alkahtani, S. (2020). Physicochemical and bacteriological characterization of industrial wastewater being discharged to surface water bodies: significant threat to environmental pollution and human health. *Journal of Chemistry*, 2020, 1-10.
- Ting, J. & Yee, S. (2020). Review on water quality monitoring technologies. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 18(1416), 10-11591.
- Torres-Palma, R. A., Hernández, F., Santos, M. M. & Vilar, V. J. P. (2022). Occurrence, impact, and elimination of contaminants of emerging concern (CECs) in soil, water, and air streams: advances and challenges in Ibero-American countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42117-42119.
- Uhlenbrook, S. & Connor, R. (2019). The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind. *UN Water*.
- UN-SPIDER, O. for O. S. A. (2020). *Aplicación de datos del mes: Monitoreo de la calidad del agua | UN-SPIDER Knowledge Portal*. Aplicación de datos del mes. <https://www.un-spider.org/es/enlaces-y-recursos/fuentes-de-datos/daotm-monitoreo-calidad-agua>
- Ustaoglu, F., Taş, B., Tepe, Y. & Topaldemir, H. (2021). Comprehensive assessment of water quality and associated health risk by using physicochemical quality indices and multivariate analysis in Terme River, Turkey. *Environmental science and pollution research*, 28(44), 62736-62754.
- Vargas M, E. D. (2017). *Análisis de los niveles contaminantes en zonas costeras mediante la determinación de concentraciones de isótopos estables caso estuario río Ozama. Conferencia Internacional Marítima Oceanográfica*.
- Walker, D. B., Baumgartner, D. J., Gerba, C. P. & Fitzsimmons, K. (2019). Surface water pollution. *Environmental and pollution science* (pp. 261-292). Elsevier.
- Wei, Y., Jiao, Y., An, D., Li, D., Li, W. & Wei, Q. (2019). Review of dissolved oxygen detection technology: From laboratory analysis to online intelligent detection. *Sensors*, 19(18), 3995.

- Yaroshenko, I., Kirsanov, D., Marjanovic, M., Lieberzeit, P. A., Korostynska, O., Mason, A., Frau, I. & Legin, A. (2020). Real-time water quality monitoring with chemical sensors. *Sensors*, *20*(12), 3432.
- Zulkifli, C. Z., Garfan, S., Talal, M., Alamoodi, A. H., Alamleh, A., Ahmaro, I. Y. Y., Sulaiman, S., Ibrahim, A. B., Zaidan, B. B. & Ismail, A. R. (2022). IoT-Based Water Monitoring Systems: A Systematic Review. *Water*, *14*(22), 3621.