

J-40402082-9

F
u
n
d
a
c
i
ó
n

A
u
l
a

V
i
r
t
u
a
l

Aula Virtual



Generando Conocimiento

<http://www.aulavirtual.web.ve>



ISSN: 2665-0398

Deposito Legal: LA2020000026

Vol. 7 Nº 15 Año 2026

Periodicidad Continua



REVISTA CIENTÍFICA AULA VIRTUAL

Director Editor:

- Dra. Leidy Hernández PhD.
- Dr. Fernando Bárbara

Consejo Asesor:

- MSc. Manuel Mujica
- MSc. Wilman Briceño
- Dra. Harizmar Izquierdo
- Dr. José Gregorio Sánchez

**Revista Científica Arbitrada de
Fundación Aula Virtual**

Email: revista@aulavirtual.web.ve

URL: <http://aulavirtual.web.ve/revista>



ISSN: 2665-0398

Depósito Legal: LA2020000026

País: Venezuela

Año de Inicio: 2020

Periodicidad: Continua

Sistema de Arbitraje: Revisión por pares. "Doble Ciego"

Licencia: Creative Commons [CC BY NC ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Volumen: 7

Número: 15

Año: 2026

Período: Julio 2026 – Diciembre 2026 (continua)

Dirección Fiscal: Av. Libertador, Arca del Norte, Nro. 52D, Barquisimeto estado Lara, Venezuela, C.P. 3001

La Revista seriada Científica Arbitrada e Indexada **Aula Virtual**, es de acceso abierto y en formato electrónico; la misma está orientada a la divulgación de las producciones científicas creadas por investigadores en diversas áreas del conocimiento. Su cobertura temática abarca Tecnología, Ciencias de la Salud, Ciencias Administrativas, Ciencias Sociales, Ciencias Jurídicas y Políticas, Ciencias Exactas y otras áreas afines. Su publicación es **CONTINUA**, indexada y arbitrada por especialistas en el área, bajo la modalidad de doble ciego. Se reciben las producciones tipo: *Artículo Científico* en las diferentes modalidades cualitativas y cuantitativas, *Avances Investigativos*, *Ensayos*, *Reseñas Bibliográficas*, *Ponencias* o *publicaciones derivada de eventos*, y cualquier otro tipo de investigación orientada al tratamiento y profundización de la información de los campos de estudios de las diferentes ciencias. La Revista **Aula Virtual**, busca fomentar la divulgación del conocimiento científico y el pensamiento crítico reflexivo en el ámbito investigativo.



AVANCES EN EL USO DE PROCESOS ELECTROQUÍMICOS PARA LA REMEDIACIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS CON METALES PESADOS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

ADVANCES IN THE USE OF ELECTROCHEMICAL PROCESSES FOR THE REMEDIATION OF WATER CONTAMINATED WITH HEAVY METALS: A SYSTEMATIC REVIEW

Tipo de Publicación: Artículo Científico

Recibido: 12/06/2026

Aceptado: 14/07/2026

Publicado: 24/07/2026

Código Único AV: e792

Páginas: 1(137-156)

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21534043>

Autor:

Darwin Rolando Ponce Altamirano

Maestría en Biotecnología

 <https://orcid.org/0000-0003-4314-9473>

E-mail: eespinozacol@ucvvirtual.edu.pe

Afiliación: Universidad Estatal de Milagro

País: Ecuador

Resumen

La contaminación de las aguas con metales pesados es consecuencia de actividades humanas como la minería, agricultura y explotación de hidrocarburo, que ocasiona la acumulación de contaminantes como, metales pesados como Co, Cu, Cr, Zn, Ni, que requieren acciones de remediación dado el riesgo que representan para la salud humana, por eso el objetivo de esta investigación fue determinar la eficiencia del uso de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua. Para ello se hizo un análisis de los avances de la remediación electroquímica mediante una revisión sistemática de 140 artículos científicos en bases de datos científicas como Scopus, SciELO, Latindex y Google académico, de los cuales se seleccionaron 24 artículos que están relacionados con los avances en el uso de procesos electroquímicos para la remediación de aguas contaminadas con metales pesados. Los resultados revelan evidencia en un alarmante aumento de los niveles de contaminación de fuentes de agua, ríos y lagos por la metales pesados, lo que trae como consecuencia una menor disponibilidad de agua potable, y el incremento de los riesgos de problemas de salud pública, por la presencia de estos, sin embargo los hallazgos muestran que los procesos electroquímicos son más eficientes que la fitorremediación y biorremediación, para la eliminación del mismo, porque se sugiere como una alternativa viable para la descontaminación y monitoreo de aguas bajo riesgos de contaminación, procurando reducir los costos y asegurando la capacitación del personal.

Palabras Clave

Contaminación, electroquímica, metales, remediación ríos, salud.

Abstract

Water pollution with heavy metals is a consequence of human activities such as mining, agriculture, and hydrocarbon exploitation, which causes the accumulation of contaminants such as heavy metals like Co, Cu, Cr, Zn, and Ni, requiring remediation actions given the risk they represent to human health. Therefore, the objective of this research was to determine the efficiency of using electrochemical methods for the removal of heavy metals from water. To this end, an analysis of the progress in electrochemical remediation was conducted through a systematic review of 140 scientific articles in scientific databases such as Scopus, SciELO, Latindex, and Google Scholar. From these, 24 articles related to advances in the use of electrochemical processes for the remediation of water contaminated with heavy metals were selected. The results reveal an alarming increase in the levels of contamination of water sources, rivers, and lakes by heavy metals, resulting in reduced availability of potable water and increased risks of public health problems due to their presence. However, the findings show that electrochemical processes are more efficient than phytoremediation and bioremediation for their removal. Therefore, they are suggested as a viable alternative for the decontamination and monitoring of waters at risk of contamination, aiming to reduce costs and ensure personnel training.

Keywords

Contamination, electrochemistry, metals, river remediation, health.

Introducción

La polución por metales pesados en el agua representa un asunto ambiental importante que impacta tanto a los ecosistemas acuáticos como a la salud de las personas (Escoto & Orellana, 2025; Flores et al., 2025). Elementos como el plomo, mercurio, cadmio y arsénico pueden llegar a las fuentes de agua debido a varias actividades industriales, agrícolas y urbanas. Por citar un ejemplo, la minería y la producción de dispositivos electrónicos son fuentes frecuentes de la liberación de estos metales pesados, y el uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura puede contribuir también a la acumulación de estos contaminantes en cuerpos acuáticos. Una vez en el agua, los metales pesados tienden a acumularse en los organismos, lo que significa que se concentran dentro de la cadena alimenticia, afectando a las especies acuáticas y, eventualmente, a los humanos que ingieren estos organismos contaminados.

La exposición a metales pesados en el agua puede ocasionar problemas graves de salud, que incluyen trastornos neurológicos, dificultades renales y efectos potencialmente cancerígenos (Cabrera et al., 2026; Ortiz et al., 2026). Además, la contaminación del agua con estos metales no solamente pone en riesgo la calidad del agua potable, sino que también perjudica la diversidad biológica y la salud de los ecosistemas acuáticos. Es fundamental regular y monitorear los niveles de

metales pesados en el agua para reducir estos peligros. La aplicación de métodos de remediación, tales como la filtración y el tratamiento químico, es necesaria para limpiar las fuentes de agua contaminada y proteger tanto la salud pública como el medio ambiente. La sensibilización sobre este problema y la ejecución de políticas efectivas son esenciales para enfrentar la contaminación por metales pesados y asegurar un futuro sustentable.

La eliminación de metales pesados en el agua es un proceso vital para salvaguardar el medio ambiente y la salud pública (Ángeles et al., 2025), dado que metales pesados como el plomo, mercurio, cadmio y arsénico, son contaminantes que pueden generar impactos adversos significativos en los ecosistemas acuáticos y en los seres vivos que dependen de estos recursos hídricos. La presencia de estos metales en el agua puede provenir de diferentes actividades humanas, que incluyen la minería, la industria y la agricultura (Pacheco et al., 2025), resaltando así la necesidad de adoptar estrategias efectivas para su eliminación, en este sentido existen varios enfoques de remediación, abarcando técnicas físicas, químicas y biológicas, cada una con sus ventajas y desventajas particulares, cuya elección depende de factores como la concentración de metales, el tipo de agua afectada y los recursos que se tengan a disposición.

En el campo de la biorremediación, se ha estudiado la aplicación de organismos y vegetales

para la captación y conversión de metales pesados en formas menos peligrosas (Cáceres & Cabrera, 2026; Chambe & Morales, 2026), esta estrategia no solo resulta efectiva, sino que también es más sostenible y económica que los métodos químicos convencionales.

Por otro lado, es posible que se requieran tecnologías de tratamiento físico y químico, como la filtración, la adsorción y la precipitación, en los casos de contaminación extrema, por lo que la integración de diversos enfoques puede ofrecer una solución más completa, facilitando una recuperación más efectiva de los cuerpos de agua contaminados.

La remediación electroquímica de metales pesados en el agua es un método innovador que busca erradicar contaminantes dañinos mediante la utilización de corrientes eléctricas (Sánchez et al., 2025; Verdugo et al., 2026), cuyo proceso se fundamenta en principios electroquímicos que permiten la conversión de metales pesados, como el plomo, el mercurio y el cadmio, en formas menos perjudiciales o incluso su completa retirada del agua, la cual se realiza en celdas electroquímicas donde se producen reacciones redox que favorecen la precipitación o la adsorción de estos metales en electrodos, resultando en una marcada disminución de su concentración en el agua.

Un aspecto notable de la remediación electroquímica es su capacidad para tratar grandes

cantidades de agua contaminada de manera eficaz y sostenible (Chuquimbalqui et al., 2025; Vázquez & Salas, 2025), ya que a diferencia de las estrategias tradicionales de remediación, que con frecuencia requieren el uso de químicos agresivos o producen desechos peligrosos, este método emplea principios electroquímicos que pueden ser ajustados para mejorar la eliminación de metales pesados, asimismo, la tecnología puede adaptarse a distintas condiciones ambientales y tipos de contaminantes, lo que la convierte en una opción flexible para limpiar cuerpos de agua contaminados por actividades industriales o mineras.

La adopción de la remediación electroquímica no solo ayuda a restaurar ecosistemas acuáticos, sino que también repercute favorablemente en la salud pública al disminuir la exposición a metales pesados, conocidos por sus efectos perjudiciales en la salud humana, dado que a medida que aumenta la conciencia sobre la contaminación del agua y sus efectos dañinos, la investigación y el avance de tecnologías electroquímicas se vuelven cada vez más relevantes.

En este contexto, es esencial seguir indagando y perfeccionando estas técnicas para asegurar un futuro más limpio y seguro para las próximas generaciones, por lo que el objetivo de esta investigación fue determinar la eficiencia del uso de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua.

Métodos

Ubicación de artículos

Para llevar a cabo la presente investigación se empleó el método de revisión bibliográfica mediante la técnica de búsqueda documental, que hace mención a la eficiencia del uso de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua. Para lo cual se contactó la

existencia de investigaciones parecidas en sus propósitos, alcances y otros elementos destacables. La revisión sistemática se llevó a cabo en dos fases; la primera referida a la heurística en la que se constataron las fuentes de proveniencia de los hallazgos para poder desarrollar la investigación y una fase hermenéutica para el análisis de los resultados (Ver Figura 1).



Figura 1. Protocolo metodológico para la búsqueda de artículos científicos sobre la eficiencia del uso de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua

Técnicas empleadas para selección de artículos

La revisión de literatura y la exploración científica fueron minuciosa y detallada. Posterior a la ubicación de las publicaciones, se analizó cada apartado del artículo y se identificaron los elementos relevantes para categorizar cada uno de los elementos para realizar una evaluación directa y detallada de cada artículo, para posteriormente seleccionar la información más importante y realizar las comparaciones pertinentes, mediante el uso de técnica de pregunta PICO.

P (problema) = Que dificultades se presentan para el uso de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua.

I (intervenciones) = Empleo de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua.

C (comparación) = Entre el desempeño del uso de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua y métodos convencionales.

O (resultados) = Adquisición de competencias para el uso de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua ¿Cuál es la efectividad de los métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua?

Criterios de inclusión

Se tomaron en cuenta los artículos que incluyeron texto con una relación al título del contexto a investigar, y estas publicaciones debieron cumplir con los criterios de la investigación, sino que debieron ser desarrollado dentro del periodo de tiempo establecido. Se tuvo en consideración la terminología en la exploración de información, acotando la búsqueda de hallazgos y resultados anteriores a publicaciones relacionadas con el uso de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua, el cual fue interceptado en manuscritos científicos ubicados en bases de datos como Google Scholar, Latindex y SciELO; de publicaciones referidas a estos artículos corresponden a los años 2020-2025.

Criterio de exclusión

No se tomaron en cuenta los artículos cuyo contenido difiriera al tema central de este estudio o no hubieran sentido lógico. Se eliminaron las publicaciones que no presentaron de una base científica y bases de datos apropiada para justificar los resultados o que los hallazgos presentados provenían de productos que no se podían localizar bases de datos verificables, así mismo se excluyeron

resúmenes, comunicaciones a congresos y trabajos de grado en cualquier nivel académico.

Interpretación de los hallazgos

La etapa de análisis de los resultados denominada hermenéutica, se llevó a cabo sintetizando información y generando comentarios en base a la información sobre la base, este método permite analizar publicaciones de diferentes autores y compararlas en relación a tema de interés, donde se detallan las diversas fuentes que permitieron la recolección de datos desde diferentes perspectivas y estrategias, así como las similitudes y diferencias de diferentes en relación con el tema de investigación.

Resultados

De los 180 artículos revisados con relación sobre mención a la eficiencia del uso de métodos electroquímicos para la eliminación de metales pesados en agua, se seleccionaron 24, de los cuales en los 6 primeros abordan la situación global de la contaminación de metales pesados con agua (Ver Tabla 1).

Titulo	Autores	Año
Contaminación por metales pesados en el sistema de riego Latacunga-Salcedo-Ambato: revisión sistemática de riesgos ambientales y sanitario	Aldaz & Cando	2026
Contaminación hídrica por metales pesados en un contexto de cambio climático mediante análisis bibliométrico	Cabrera	2025
Assessing the environmental, health, and food security implications of heavy metals in irrigation water: a multi-index analytical framework	Egbueri et al.,	2026
Metal contamination—a global environmental issue: sources, implications & advances in mitigation	Ondrasek et al.,	2025
Disonancias entre percepción psicoambiental y contaminación hídrica por metales pesados en zonas agroganaderas	Ramos et al.,	2026
Global trends and prospects in research on heavy metal pollution at contaminated sites	Yu et al.,	2025

Tabla 1. Situación global de la contaminación de metales pesados con agua

Aldaz & Cando (2026) evaluaron la contaminación por metales pesados en el sistema de riego Latacunga-Salcedo-Ambato mediante una revisión sistemática para determinar los riesgos ambientales y sanitario, encontrando que las actividades antrópicas han elevado la presencia de metales como plomo, cromo y cadmio en los recursos hídricos de la cuenca del sistema de riego Latacunga-Salcedo-Ambato con concentraciones elevadas de plomo, cromo y arsénico, elementos que superan los estándares permisibles para el uso de agua en la agricultura, que representan un riesgo carcinogénico y no carcinogénico significativo para la población debido a la bioacumulación en la cadena alimentaria.

Por su parte Cabrera (2025) al estudiar la contaminación hídrica por metales pesados a través de un análisis bibliométrico, destaca que el cambio climático altera los ciclos de lluvia y temperatura, facilitando la movilización, concentración y arrastre de elementos como cadmio, zinc, manganeso, mercurio y plomo hacia fuentes de agua, cuya acumulación puede provocar graves enfermedades crónicas, daños renales y alteraciones neurológicas, debido a la bioacumulación de los mismos en la cadena alimentaria.

Dado la contaminación con metales pesados Egbueri et al., (2026) evaluaron la calidad del agua de riego, la cual se evaluó mediante iones químicos mayores en el sureste de Nigeria, cuyo propósito

fue investigar los recursos hídricos destinados a la agricultura en esta región propensa a la falta de monitoreo continuo y estudiar la transferencia e implicaciones del agua contaminada hacia la red hídrica, y su posible relación con la degradación del suelo, la salud de las plantas y de la salud población.

En este mismo orden de ideas, Ondrasek et al., (2025), determinaron que la actividad industrial, la urbanización y, de manera muy destacada, la agricultura intensiva mediante el uso continuo de agroquímicos como fertilizantes y pesticidas aportan cargas anuales acumulativas de metales como Cu, Zn, As, Cd, Pb y Hg en los agroecosistemas, cuyo riesgo de acumulación aumenta dado, que los metales de origen antropogénico son sustancialmente más móviles y bioabsorbibles que aquellos provenientes de fuentes litogénicas naturales.

Igualmente Ramos-Pacheco et al., (2026) al evaluar la calidad del agua en 10 reservorios utilizados por agricultores y ganaderos en El Paraíso, Santa María (Perú) encontraron la acumulación de metales pesados, pero se evidenció una brecha frente a la percepción psicoambiental de 32 productores encuestados mostro diferencias notables entre el estado real de contaminación hídrica y cómo es percibido por la comunidad agroganadera local, lo que dificulta la adopción de medidas de mitigación, lo cual lleva a afirmación como las reportadas por Yu et al., (2025) quienes destacan que existen una tendencia mundial a la contaminación de ecosistemas por metales pesados, incluyendo las fuentes de agua.

Los próximos 6 artículos abordan los métodos empleados para la descontaminación de metales pesados en agua, cuyos principales hallazgos son descritos y analizados a continuación (Ver Tabla 2).

Titulo	Autores	Año
Harnessing bacterial consortia for effective bioremediation: targeted removal of heavy metals, hydrocarbons, and persistent pollutants	Qattan	2025
Bioremediation of heavy metals in contaminated water: conventional vs. advanced methods	Sati et al.,	2026
Heavy metals contamination and their phytoremediation in soil and water for sustainable environmental restoration	Yadav et al.,	2025
Eco-phytoremediation using Azolla microphylla enhances heavy metal removal, water quality, and biomass valorization in semi-arid wastewater treatment	Benguennouna et al.,	2025
Recent trends in electrochemical methods for real-time detection of heavy metals in water and soil: A review	Kyabutwa et al.,	2025
Review of electrochemical reactors for the efficient removal of heavy metals from wastewater.	Kew & Lau	2025

Tabla 2. Métodos empleados para la descontaminación de metales pesados en agua

Qattan (2025) mediante una revisión científica exhaustiva sobre el uso de consorcios bacterianos artificiales y naturales como una alternativa ecológica y económicamente viable frente a los métodos de descontaminación físico-químicos tradicionales, destaca cómo las estrategias tradicionales basadas en una sola cepa suelen fallar en condiciones de campo reales debido a la complejidad de los contaminantes y la hostilidad del medio, no obstante Sati et al., (2026) ante la problemática global de la contaminación del agua por metales pesados altamente tóxicos y no biodegradables como el cadmio (Cd), cromo (Cr), arsénico (As), zinc (Zn), plomo (Pb) y mercurio (Hg) compara los métodos convencionales de remediación como los físicos y biológicos, haciendo énfasis en el beneficio sinérgico de combinar métodos biológicos con fisicoquímicos, abordando soluciones disruptivas como la integración de la Inteligencia Artificial (IA) y la nanotecnología para optimizar los procesos de limpieza.

Por su parte Yadav et al., (2025) ante la amenaza de los metales pesados, metales no biodegradables y altamente persistentes como el cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) destacan las ventajas de la fitorremediación, dado que los métodos fisicoquímicos tradicionales de descontaminación suelen ser sumamente costosos, invasivos con la microbiota local y complejos de ejecutar, mientras que la fitorremediación es una

tecnología verde, económica, estéticamente agradable y guiada por energía solar que aprovecha la fisiología vegetal para limpiar el medio ambiente. En este mismo contexto, Benguennouna et al., (2025) demuestran que el helecho acuático *Azolla microphylla* es una herramienta altamente eficiente y ecológica para depurar aguas residuales en regiones semiáridas, logrando descontaminar metales pesados, estabilizar el agua para el riego agrícola y generar biomasa útil de forma simultánea.

En relación a los métodos electroquímicos Kyabutwa et al., (2025) destacan que los mismos son elegidos por ser de bajo costo, alta sensibilidad, miniaturizarlos y fáciles de usar en el campo, afirmación que fue confirmada por Kew & Lau (2025), quienes al comparar la eficiencia de remoción de diferentes configuraciones de reactores electroquímicos, encontraron eficiencias sobresalientes del 99.73% para plomo (Pb), 98.54% para cadmio (Cd) y 98.92% para cobre (Cu) al generar especies coagulantes que precipitan los metales.

Una vez abordadas las ventajas y limitaciones, los siguientes 6 artículos indican las ventajas de los métodos electroquímicos para la remoción de metales pesados en agua, cuyos principales hallazgos son descritos y analizados a continuación (Ver Tabla 3).

Titulo	Autores	Año
Nanomaterials for the removal and detection of heavy metals: a review.	De Silva et al.,	2025
Incorporation of transition metal-oxide on 3D porous carbon network for electrochemical water desalination and heavy-metals removal.	Hai et al.,	2025
Physicochemical vs electrochemical technologies for metal recovery–main insights, comparison, complementarity and challenges	Mourdikoudis & Dominguez-Benetton	2025
Amino-enriched Zn-MOFs with self-reduction for energy-free simultaneous removal and electrochemical detection of heavy metal ions in the aquatic environment	Shao et al.,	2025
Sustainable separation technologies for heavy metal removal from wastewater: An upgraded review of physicochemical methods and its advancements	Shofia et al.,	2025
Recent advances in designable nanomaterial-based electrochemical sensors for environmental heavy-metal detection	Zhang et al.,	2025

Tabla 3. Ventajas de los métodos electroquímicos para la remoción de metales pesados en agua

De Silva et al., (2025) a diferencia de otras revisiones enfocadas únicamente en la limpieza, este estudio profundiza en el monitoreo y caracterización de trazas de metales pesados en entornos acuáticos mediante métodos espectroscópicos y ópticos, cuya ventaja es que el uso de nanosistemas mejora la sensibilidad analítica, los métodos electroquímicos, que usan sensores basados en nanomateriales garantizan una cuantificación más rápida y en tiempo real de contaminantes.

En este mismo orden de ideas Hai et al., (2025) al evaluar la tecnología de desalinización electroquímica basada en deionización capacitiva, encontraron que la misma proporciona una gran área superficial y canales abiertos para que el agua fluya y los iones se muevan rápidamente, lo que mejora la

capacidad de capturar y retener de forma selectiva tanto las sales del agua como los metales pesados contaminantes mediante reacciones electroquímicas, mejorando la eficiencia para la determinación de los mismos.

Por su parte Mourdikoudis & Domínguez-Benetton (2025) entre la ventajas de los métodos electroquímicos destacan que sustituyen la energía térmica por potencia eléctrica a menores temperaturas de operación y permiten una selectividad molecular superior para separar metales específicos de flujos complejos, además que su facilidad operativa, lleva a una mayor viabilidad para la automatización de procesos en comparación con las plantas químicas convencionales, lo que a juicio de Shao et al., (2025) garantiza una captura masiva y rápida de iones de metales pesados debido a su alta porosidad y la afinidad de los grupos

amino, lo que lo convierte en un sensor de alta sensibilidad para monitorear los niveles de contaminación en el agua en tiempo real, con límites de detección ultrabajo.

Igualmente Shofia et al., (2025) al evaluar técnicas tradicionales y avanzadas como adsorción, filtración por membranas, electrodiálisis y precipitación química, encontraron como los métodos electroquímicos optimizan estos procesos con la ventaja que consuman menos energía, reducen el uso de químicos tradicionales y minimicen la generación de lodos tóxicos, lo cual es ideal para la eliminación de metales pesados como plomo, mercurio, cadmio, cromo y arsénico, además, no son biodegradables y se acumulan en los seres vivos.

Por ultimo Zhang et al., (2025), entre las ventajas de los métodos electroquímicos en campos de Aplicación Real, destacan su alta sensibilidad para identificar de forma rápida y simultánea trazas ultrabajas de iones altamente tóxicos como el plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd) y arsénico (As) en recursos hídricos y cadenas alimenticias, por lo que consideran factible su producción a gran escala, y la transición hacia dispositivos portátiles miniaturizados e inteligentes integrados con el Internet de las Cosas (IoT).

Finalmente, los últimos 6 artículos describen las desventajas de los métodos electroquímicos para la remoción de metales pesados en agua cuyos principales hallazgos son descritos y analizados a continuación (Ver Tabla 4).

Titulo	Autores	Año
A critical review of electrocoagulation and other electrochemical methods.	Javed & Mushtaq	2023
Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologic	Oladimeji et al.,	2024
A review on sources of heavy metals, their toxicity and removal technique using physico-chemical processes from wastewater	Rafique et al.,	2022
Recent developments in heavy metals detection: Modified electrodes, pretreatment methods, prediction models and algorithms.	Shi et al.,	2025
Electrochemical sensors for heavy metal ion detection in aqueous medium: a systematic review.	Sulthana et al.,	2024
Direct current electrochemical method for removal and recovery of heavy metals from water using straw biochar electrode	Wang et al.,	2022

Tabla 4. Desventajas de los métodos electroquímicos para la remoción de metales pesados en agua

Javed & Mushtaq (2023). destacan que las tecnologías electroquímicas ofrecen alta confiabilidad, simplicidad de operación, huella de carbono reducida y flexibilidad para adaptarse a fluctuaciones en los caudales de los efluentes en comparación con los métodos químicos tradicionales, sin embargo la pasivación del electrodo debido a la formación de capas aislantes reducen la eficiencia con el tiempo, mientras que el consumo energético y los costos operativos asociados, conllevan a la necesidad de integrar estos procesos en sistemas híbridos para tratar efluentes con mezclas de contaminantes altamente solubles o de bajo peso molecular.

Por su parte Oladimeji et al., (2024) si bien destacan que los métodos electroquímicos permiten remover partículas nanométricas con una precisión estructural su desventaja principal es el alto costo de capital inicial y de operación sigue siendo el mayor obstáculo para implementar masivamente estas tecnologías avanzadas a escala industrial, igualmente Rafique et al., (2022) señalan que los mismos ofrecen altos estándares de pureza y retención, pero se enfrentan a desafíos severos de costos operativos elevados y problemas de taponamiento (fouling) de membranas.

Por su parte, Shi et al., (2025) destacan que los métodos electroquímicos se pueden usar para desarrollar modelos de predicción mediante la Integración de herramientas informáticas para

calibrar los datos y reducir las interferencias de otros elementos químicos, sin embargo, el uso de algoritmos avanzados como la aplicación de aprendizaje automático como el Machine Learning para automatizar y acelerar la detección en tiempo real, requiere la contratación y capacitación de personal capacitado.

Adicionalmente Sulthana et al., (2024) al comparar los métodos electroquímicos frente a los métodos analíticos tradicionales, este enfoque sistemático destaca que la electroquímica ofrece un análisis rápido y en tiempo real en entornos de campo con alta precisión y bajo límite de detección (LOD), costos de operación reducidos e instrumentación portátil con capacidad de detección multiparamétrica, donde el núcleo operativo de estos dispositivos radica en la ingeniería de superficies sobre el electrodo de trabajo, que como se mencionó previamente requiere de la capacitación del personal.

Sin embargo, Wang et al., (2022) señalan que el desafío a superar para el desarrollo de nuevos métodos para eliminar metales pesados, radican es en que los procedimientos tradicionales suelen ser costosos, generan lodos contaminantes o tienen una capacidad de retención limitada, ventaja que ofrecen los métodos electroquímicos a pesar de la inversión inicial y necesidad de entrenamiento.

Discusión

La contaminación por metales pesados en los cuerpos de agua constituye un asunto ambiental de gran importancia a nivel mundial, afectando tanto a los ecosistemas acuáticos como a la salud de las personas (Adu & Aneke, 2025; Madjar & Vasile, 2025). Metales como el plomo, mercurio, cadmio y arsénico pueden entrar en las aguas a causa de distintas actividades industriales, agrícolas y urbanas, los hallazgos muestran que la concentración de estos elementos dañinos en el agua puede resultar en consecuencias desastrosas, no solo para las especies acuáticas, sino también para las comunidades que dependen de estas fuentes para consumo y actividades económicas, dado que la exposición a metales pesados puede llevar a graves enfermedades, tales como trastornos neurológicos, daños renales y cáncer, lo cual resalta la necesidad urgente de abordar esta cuestión.

La revisión de literatura a nivel global, se han llevado a cabo diversas iniciativas para supervisar y reducir la contaminación por metales pesados en las aguas, dado que organizaciones internacionales y gobiernos han implementado regulaciones y estándares de calidad del agua (Biedunkova & Kuznietsov, 2025; Laoye et al., 2025), así como programas de monitoreo que ayudan a identificar y reducir las fuentes de contaminación, sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, la situación sigue siendo alarmante en muchas áreas, especialmente en

naciones en vías de desarrollo donde la regulación y el control son menos eficaces, por lo tanto la colaboración internacional y las inversiones en tecnologías para el tratamiento del agua son cruciales para enfrentar este desafío, garantizando así un acceso seguro y sostenible al agua potable para las generaciones venideras en especial de métodos de bajo costo y alta sensibilidad como son los procesos electroquímicos.

En este orden de ideas, los resultados mostraron que la remediación electroquímica de metales pesados en el agua ofrece varias ventajas que la hacen una opción atractiva para el tratamiento de contaminantes (Chen et al., 2025; Cun et al., 2026), debido a que este enfoque posibilita la eliminación eficaz de metales pesados, como el plomo, el mercurio y el cadmio, que son altamente perjudiciales y representan un grave peligro para la salud y el medioambiente, dado que través de procesos electroquímicos, se logra facilitar la reducción y precipitación de estos metales, resultando en su conversión a formas menos nocivas o su completa eliminación del agua, por lo que esta capacidad de tratamiento directo y eficiente es esencial en la lucha contra la contaminación del agua.

Adicionalmente, la remediación electroquímica se distingue por su flexibilidad y capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales (Yin et al., 2025), debido a que estos

métodos pueden ser utilizados en distintos tipos de ambientes, abarcando desde aguas superficiales hasta aguas subterráneas, siendo efectivo ante diferentes niveles de contaminantes, asimismo la posibilidad de ajustar los parámetros del proceso, como la corriente eléctrica y la duración del tratamiento, permite optimizar la remediación de acuerdo a las características específicas del lugar contaminado, incrementando la eficacia del tratamiento, sino que también reduce el impacto ambiental asociado con otras técnicas de remediación más invasivas.

Finalmente, un elemento importante de la remediación electroquímica es su sostenibilidad, es que a diferencia de técnicas convencionales que pueden producir desechos peligrosos o exigir el uso de sustancias químicas dañinas, este método es generalmente más amigable con el medio ambiente, debido que la energía eléctrica se utiliza como fuente principal y la oportunidad de recuperar metales valiosos durante el proceso contribuyen a un ciclo de tratamiento más responsable y eficaz (Liu et al., 2025), por lo tanto, la remediación electroquímica no solo soluciona el problema de la contaminación, sino que también fomenta prácticas más sostenibles en la administración de recursos hídricos. Sin embargo, la remediación electroquímica de metales pesados en el agua presenta varias desventajas que deben ser evaluadas antes de su uso.

En primer lugar, este procedimiento puede ser costoso, dado que necesita de equipamiento especializado y un mantenimiento regular para asegurar su funcionamiento óptimo, además, la energía necesaria para realizar el proceso electroquímico puede causar un aumento significativo en los gastos operativos, limitando su factibilidad en proyectos a gran escala, asimismo, la eficacia de la remediación puede ser influenciada por la presencia de otros contaminantes en el agua, lo que podría afectar las reacciones electroquímicas y reducir la efectividad del proceso (Khorasani, 2025; Kyabutwa et al., 2025).

Otro punto a tener en cuenta es el posible impacto ambiental de la remediación electroquímica, dado que aunque este método puede eliminar metales pesados, también tiene el potencial de generar subproductos tóxicos que necesitan ser gestionados adecuadamente para prevenir la contaminación secundaria (Liang et al., 2025; Zhang et al., 2025), igualmente la remediación electroquímica puede no ser efectiva en todas las aguas contaminadas, especialmente aquellas con altos niveles de sólidos suspendidos o materia orgánica, lo que restringe su uso. Por último, la necesidad de un monitoreo constante y la posibilidad de que el proceso no alcance los resultados deseados pueden generar incertidumbre en los proyectos de remediación, lo que podría disuadir su implementación en ciertas circunstancias.

Conclusiones

Los métodos electroquímicos han surgido como una opción prometedora para limpiar aguas afectadas por metales pesados, un desafío ambiental cada vez más preocupante a nivel mundial, estas técnicas se fundamentan en el uso de corriente eléctrica para provocar reacciones químicas que eliminan contaminantes, brindando beneficios notables en contraste con métodos convencionales, que se ha mostrado en la revisión exhaustiva de los progresos en este ámbito científico, que muestra una variedad de técnicas, desde la electrocoagulación hasta la electrooxidación, cada una con características y eficiencias únicas para remover metales pesados como el plomo, el mercurio y el cadmio.

Los métodos electroquímicos han sobresalido por su habilidad para agrupar partículas contaminantes, lo que facilita su posterior sedimentación y remoción, mostrando que estos métodos no solo son eficaces en disminuir la concentración de metales pesados, sino que también puede ajustarse para tratar diferentes clases de aguas residuales, lo que lo hace una opción adaptable disminuyendo la toxicidad de los metales pesados presentes en el agua y los riesgos potenciales para la salud de las personas y la ictiofauna de la zona afectada.

Con el avance de las investigaciones, se están creando nuevas tecnologías y perfeccionando los parámetros operativos para optimizar la efectividad y sostenibilidad de estos procesos electroquímicos, también se está considerando la integración de fuentes de energía renovable en la remediación electroquímica, lo que podría minimizar el impacto ambiental y los gastos operativos, por lo que el análisis sistemático de los avances en la aplicación de procesos electroquímicos para la limpieza de aguas contaminadas por metales pesados enfatiza la necesidad de continuar la investigación y desarrollo de estas tecnologías, que presentan soluciones efectivas y sostenibles ante uno de los retos ambientales más urgentes de nuestra época.

Referencias

- Adu, J. T., & Aneke, F. I. (2025). Evaluation of heavy metal contamination in landfills from e-waste disposal and its potential as a pollution source for surface water bodies. *Results in Engineering*, 25, 104431. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104431>
- Aldaz, L. A. V., & Cando, D. A. G. (2026). Contaminación por metales pesados en el sistema de riego Latacunga-Salcedo-Ambato: revisión sistemática de riesgos ambientales y sanitario. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 14(1), 68-77. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.36610/j.jsabs.20261304>
- Ángeles, N. B. D., Luna, F. D. J. O., & Baptista, R. C. (2025). Quimioremediación de metales pesados en agua mediante síntesis de polímeros basados en química click. *Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y*

- Gobierno*, (4), 31-39. Documento en línea. Disponible <https://revistaestudiosieeg.com/index.php/eieeg/article/view/83/66>
- Benguennouna, N., Benabdelmoumene, D., Dahmouni, S., Bengharbi, Z., Qadi, W. S., Hamezah, H. S., & Mediani, A. (2025). Eco-phytoremediation using *Azolla microphylla* enhances heavy metal removal, water quality, and biomass valorization in semi-arid wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 101437. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101437>
- Biedunkova, O., & Kuznietsov, P. (2025). Integration of water management in the assessment of the impact of heavy metals discharge from the power plant with mitigation strategies. *Ecological Indicators*, 175, 113618. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113618>
- Cabrera, H. A. (2025). Contaminación hídrica por metales pesados en un contexto de cambio climático mediante análisis bibliométrico. *Esprint Investigación*, 4(4), 59-72. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.61347/ei.v4i4.183>
- Cabrera, M. F. G., Medina, J. A. G., Rosero, C. N. L., & Pancho, F. R. A. (2026). Análisis contaminación de suelos por metales pesados en áreas mineras. *ASCE MAGAZINE*, 5(1), 1009-1028. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.70577/asce.v5i1.629>
- Cáceres, G. L. C., & Cabrera, D. U. M. (2026). Biorremediación de agua contaminada con metales pesados utilizando plumas de pollo en humedales de Ite, Tacna, Perú. *Agroindustrial Science*, 16(1), 35-42. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2026.01.04>
- Chambe Cáceres, G. L., & Morales Cabrera, D. U. (2026). Biorremediación de agua contaminada con metales pesados utilizando plumas de pollo en humedales de Ite, Tacna, Perú. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2026.01.04>
- Chen, Y., Deng, D., Xu, L., Zhu, X., Li, H., & Sun, C. (2025). Covalent bond modulation of charge transfer for sensitive heavy metal ion analysis in a self-powered electrochemical sensing platform. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 100144. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.actphy.2025.100144>
- Chuquimbalqui-Marina, D., Azabache-Aliaga, Y. D., Ordóñez-Ruiz, K. M., & Bardalez-Tuesta, C. M. (2025). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: Análisis bibliométrico de publicaciones científicas y revisión de resultados. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 4(1), e802-e802. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.51252/reacae.v4i1.802>
- Cun, M., Yang, S., Liu, L., Guo, J., Zhu, P., Yin, Z., ... & Liu, W. (2026). Carbon-induced multiscale coupling mechanisms of chlorine release and heavy metal migration during thermal treatment of MSWI fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 142101. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115800>
- De Silva, M., Cao, G., & Tam, K. C. (2025). Nanomaterials for the removal and detection of heavy metals: a review. *Environmental Science: Nano*, 12(4), 2154-2176. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1039/D4EN01041H>
- Egbueri, J. C., Agbasi, J. C., Khan, M. Y. A., Abba, S. I., Turki, A. F., & ElKashouty, M. (2026). Assessing the environmental, health, and food security implications of heavy metals in irrigation water: a multi-index analytical framework. *Analytical Letters*, 59(3), 373-408. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1080/00032719.2025.2484451>
- Escoto, R. A. G., & Orellana, M. T. (2025). Determinación de contaminación por metales pesados en muestras de agua superficial y de profundidad del lago de Ilopango, El Salvador.

- Revista Minerva*, 8(1), 31-39. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115800>
- Flores, M. M., Alvarado, J. B., Villaverde, S. I., Gonzales, C. G., Saavedra, M. A., & Quispe, D. P. (2025). Contenido de metales pesados en los peces en el Perú: una revisión sistémica. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 12(1), 131-141. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.53287/ejdm7553mt10z>
- Hai, A., Bharath, G., Patah, M. F. A., AlMohamadi, H., Banat, F., & Daud, W. M. A. W. (2025). Incorporation of transition metal-oxide on 3D porous carbon network for electrochemical water desalination and heavy-metals removal. *Electrochimica Acta*, 528, 146337. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146337>
- Javed, A., & Mushtaq, A. (2023). A critical review of electrocoagulation and other electrochemical methods. *Int. J. Chem. Biochem. Sci.*, 23(1), 98-110. Documento en línea. Disponible <https://iscientific.org/wp-content/uploads/2023/05/13-IJCBS-23-23-21.pdf>
- Kew, S. Y. N., & Lau, S. Y. (2025). Review of electrochemical reactors for the efficient removal of heavy metals from wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.04.062>
- Khorasani, M. (2025). A review on different electroanalytical techniques used in the development of heavy metal ions electrochemical sensors. *International Journal of New Chemistry*, 12(2), 149-158. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.22034/ijnc.2024.715983>
- Kyabutwa, P. L., Alyamni, N., Abot, J. L., & Zestos, A. G. (2025). Recent trends in electrochemical methods for real-time detection of heavy metals in water and soil: A review. *Current Opinion in Electrochemistry*, 101749. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2025.101749>
- Laoye, B., Olagbemide, P., Ogunnusi, T., & Akpor, O. (2025). Heavy metal contamination: Sources, health impacts, and sustainable mitigation strategies with insights from nigerian case studies. *F1000Research*, 14, 134. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.12688/f1000research.160148.4>
- Liang, M., Luo, G., & Lei, P. (2025). Recent advances in bioelectrochemical approaches for sustainable environmental remediation. *International Journal of Electrochemical Science*, 20(8), 101077. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2025.101077>
- Liu, C., Hu, W., Zhu, X., Zhang, S., & Wang, W. (2025). Removal of Cu and Pb in Contaminated Loess by Electrokinetic Remediation Using Novel Hydrogel Electrodes Coupled with Focusing Position Adjustment and Exchange Electrode. *Processes*, 13(9), 2915. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/pr13092915>
- Madjar, R. M., & Vasile Scăteanu, G. (2025). An overview of heavy metal contamination in water from agriculture: origins, monitoring, risks, and control measures. *Sustainability*, 17(16), 7368. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/su17167368>
- Mourdikoudis, S., & Dominguez-Benetton, X. (2025). Physicochemical vs electrochemical technologies for metal recovery—main insights, comparison, complementarity and challenges. *Chemistry-Methods*, 5(3), e202400046. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101309>
- Oladimeji, T. E., Oyedemi, M., Emetere, M. E., Agboola, O., Adeoye, J. B., & Odunlami, O. A. (2024). Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal

- technologies. *Heliyon*, 10(23). Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370>
- Ondrasek, G., Shepherd, J., Rathod, S., Dharavath, R., Rashid, M. I., Brtnicky, M., ... & Rengel, Z. (2025). Metal contamination—a global environmental issue: sources, implications & advances in mitigation. *RSC advances*, 15(5), 3904-3927. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1039/d4ra04639k>
- Ortiz, D. J. J. D., Torres, L. A., Chávez, S. M. H., Hernández, R. E. G., Monroy, J. M. G., & Calderón, S. G. (2026). Impacto de la contaminación del agua por la producción pecuaria: consecuencias ambientales y riesgos para la salud. *Revista de Investigación LOGIKÉ*, 1(17), 38-44. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.5377/ril-univo.v1i17.22662>
- Qattan, S. Y. (2025). Harnessing bacterial consortia for effective bioremediation: targeted removal of heavy metals, hydrocarbons, and persistent pollutants. *Environmental Sciences Europe*, 37(1), 85. Documento en línea. Disponible https://doi.org/10.1186/s12302-025-01103-y?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- Pacheco-Marchán, S., Vergara-Alfaro, N., Bermejo, L. A., Villar-Cruz, C., & Ordinola-Zapata, A. (2025). Revisión sistemática sobre la contaminación por metales pesados de suelos agrícolas del Perú. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 29(129), 146-156. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.47460/uct.v29i129.1019>
- Rafique, M., Hajra, S., Tahir, M. B., Gillani, S. S. A., & Irshad, M. (2022). A review on sources of heavy metals, their toxicity and removal technique using physico-chemical processes from wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), 16772-16781. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18638-9>
- Ramos-Pacheco, R. L., Ramos-Pacheco, H. D. R., López-Ramos, C. A., & López-Traslaviña, H. S. (2026). Disonancias entre percepción psicoambiental y contaminación hídrica por metales pesados en zonas agroganaderas. *Agroecología Global. Revista Electrónica de Ciencias del Agro y Mar*, 8(14), 16-36. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.35381/a.g.v8i14.4892>
- Sánchez-Medina, A. F., Romero-Sáez, M., & Ramírez-Sánchez, C. (2025). Eliminación de complejos antibiótico-metal en aguas residuales mediante métodos electroquímicos: una revisión. *Tecnológicas*, 28(63). Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.22430/22565337.3344>
- Sati, S., Sharma, P. K., Naithani, P., Jha, P. K., Panwar, V., Behera, N. R., ... & Mittal, A. (2026). Bioremediation of heavy metals in contaminated water: conventional vs. advanced methods. *Frontiers in Water*, 8, 1749800. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3389/frwa.2026.1749800>
- Shao, Z., Di, K., Ding, L., You, F., Fan, C., & Wang, K. (2025). Amino-enriched Zn-MOFs with self-reduction for energy-free simultaneous removal and electrochemical detection of heavy metal ions in the aquatic environment. *Analytica Chimica Acta*, 1333, 343408. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343408>
- Shi, Y., Zhang, S., Zhou, H., Dong, Y., Liu, G., Ye, W., ... & Zhao, G. (2025). Recent developments in heavy metals detection: Modified electrodes, pretreatment methods, prediction models and algorithms. *Metals*, 15(1), 80. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/met15010080>
- Shofia, S. I., Vickram, A. S., Saravanan, A., Deivayanai, V. C., & Yaashikaa, P. R. (2025). Sustainable separation technologies for heavy metal removal from wastewater: An upgraded review of physicochemical methods and its advancements. *Sustainable Chemistry for the*

- Environment*, 10, 100264. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100264>
- Sulthana, S. F., Iqbal, U. M., Suseela, S. B., Anbazhagan, R., Chinthaginjala, R., Chitathuru, D., ... & Kim, T. H. (2024). Electrochemical sensors for heavy metal ion detection in aqueous medium: a systematic review. *ACS omega*, 9(24), 25493-25512. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00933>
- Vázquez, D. I. A., & Salas, I. I. R. (2025). La química "Clic" como actor clave en los procesos de monitoreo y remediación ambiental. Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno, (3), 25-32. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.32870/eieeg.vi3.61>
- Verdugo, G. Z., Arzaluz, M. G., López, A. M. N., & Peláez, M. L. S. (2026). Nanotecnología al rescate del agua. Contactos, *Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, (145), 95-107. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.20983/cienciavital.2025.03.ap1.02>
- Wang, Z., Tan, Z., Li, H., Yuan, S., Zhang, Y., & Dong, Y. (2022). Direct current electrochemical method for removal and recovery of heavy metals from water using straw biochar electrode. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130746. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130746>
- Yadav, K., Kumar, D., Gupta, A. K., Gupta, B., Tyagi, P., Sharma, A., ... & Chaitanya, A. K. (2025). Heavy metals contamination and their phytoremediation in soil and water for sustainable environmental restoration. *Discover Environment*, 3(1), 201. Documento en línea. Disponible https://doi.org/10.1007/s44274-025-00390-9?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- Yin, C., Liu, Y., Hu, T., & Chen, X. (2025). Graphitic carbon nitride nanomaterials-based electrochemical sensing interfaces for monitoring heavy metal ions in aqueous environments. *Nanomaterials*, 15(7), 564. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/nano15070564>
- Yu, J. A., Chen, Z., Gao, W., He, S., Xiao, D., Fan, W., ... & Nugroho, W. A. (2025). Global trends and prospects in research on heavy metal pollution at contaminated sites. *Journal of Environmental Management*, 383, 125402. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125402>
- Zhang, H., Li, L., Wang, C., Liu, Q., Chen, W. T., Gao, S., & Hu, G. (2025). Recent advances in designable nanomaterial-based electrochemical sensors for environmental heavy-metal detection. *Nanoscale*, 17(5), 2386-2407. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1039/d4nr04108a>