

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,
Volumen 9, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6

ELECTROREMEDIACIÓN DE METALES PESADOS EN EL RÍO TULA: MUESTREO REAL, ENSAYOS DE LABORATORIO Y CUMPLIMIENTO DE LA NOM-001- SEMARNAT-2021

ELECTROREMEDIATION OF HEAVY METALS IN THE TULA
RIVER: ASSESSMENT OF REGULATORY COMPLIANCE AND
TECHNOLOGICAL INNOVATION PROPOSAL

Valentín Trujillo Mora

Universidad Autónoma del Estado de México

Rafael Valentín Mendoza Méndez

Universidad Autónoma del Estado de México

Gisela Regina Baena Castro

Universidad Autónoma del Estado de México

Rafael Rojas Hernández

Universidad Autónoma del Estado de México

Ismael De la Cruz Orozco

Universidad Autónoma del Estado de México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.21110

Electroremediación de Metales Pesados en el Río Tula: Muestreo Real, Ensayos de Laboratorio y Cumplimiento de la NOM-001- SEMARNAT-2021

Valentín Trujillo Mora¹

vtrujillom@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5936-4795>

Centro Universitario UAEM Zumpango

Universidad Autónoma del Estado de México

Gisela Regina Baena Castro²

grbaenac@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8241-8627>

Centro Universitario UAEM Temascaltepec

Universidad Autónoma del Estado de México

Ismael De la Cruz Orozco

icruzo@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8895-1828>

Plantel Isidro Fabela Alfaro de la Escuela

Preparatoria

Rafael Valentín Mendoza Méndez

rvmendozam@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4420-426X>

Centro Universitario UAEM Temascaltepec

Universidad Autónoma del Estado de México

Rafael Rojas Hernández

rrojashe@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0001-6649-067X>

Centro Universitario UAEM Zumpango

Universidad Autónoma del Estado de México

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo analizar la presencia de metales pesados en el río Tula y evaluar la eficacia de técnicas de tratamiento, con énfasis en la electroremediación como alternativa innovadora. Se realizaron muestreos en diversos puntos del río y análisis en laboratorio conforme a la NOM-001-SEMARNAT-2021 para determinar las concentraciones de metales como cadmio, mercurio, plomo, cromo y arsénico. La aplicación experimental de campos eléctricos permitió observar la migración y extracción de estos metales, analizando tanto los resultados como las condiciones de los electrodos bajo diferentes intensidades de corriente. Los resultados confirman que las concentraciones de metales se encuentran dentro de los límites normativos actuales, aunque se resalta la importancia del monitoreo continuo por el potencial de acumulación y riesgos a largo plazo. El estudio concluye que la electroremediación representa una estrategia prometedora y complementaria para la gestión ambiental y la protección de la salud pública en regiones con presión industrial y urbana, recomendando fortalecer la vigilancia y la comunicación efectiva de resultados científicos

Palabras clave: electroremediación, metales pesados, río Tula, contaminación hídrica, gestión ambiental

¹ Autor principal

² Correspondencia: grbaenac@uaemex.mx

Electroremediation of Heavy Metals in the Tula River: Assessment of Regulatory Compliance and Technological Innovation Proposal

ABSTRACT

This research aims to analyze the presence of heavy metals in the Tula River and evaluate the effectiveness of treatment techniques, with a focus on electroremediation as an innovative alternative. Samples were collected at various points along the river and analyzed in the laboratory according to NOM-001-SEMARNAT-2021 to determine the concentrations of metals such as cadmium, mercury, lead, chromium, and arsenic. The experimental application of electric fields allowed the observation of migration and extraction of these metals, assessing both the results and the condition of the electrodes under different current intensities. The results confirm that metal concentrations are within current regulatory limits, though the importance of continuous monitoring is emphasized due to the potential for accumulation and long-term risks. The study concludes that electroremediation represents a promising and complementary strategy for environmental management and public health protection in regions with industrial and urban pressure, recommending the strengthening of vigilance and effective communication of scientific findings

Keywords: electroremediation, heavy metals, Tula River, water pollution, environmental management

*Artículo recibido 27 octubre 2025
Aceptado para publicación: 20 noviembre 2025*



INTRODUCCION

El río Tula, situado en el estado de Hidalgo, México, constituye una de las fuentes hídricas más relevantes de la región. Sin embargo, en las últimas décadas ha enfrentado problemas ambientales severos debido a la contaminación por metales pesados, como mercurio, plomo, cadmio, cromo y arsénico. Esta problemática deriva tanto de la actividad industrial local y urbana proveniente de la Ciudad de México, como de prácticas agrícolas y vertidos residuales, generando afectaciones significativas para el ecosistema y las comunidades que dependen de este recurso.

El ingreso y acumulación de metales en el sistema acuático ha alterado la biodiversidad, impactando negativamente la salud pública y la productividad agrícola, dado el riesgo de que los contaminantes ingresen en la cadena alimenticia a través del riego.

El tema abordado en esta investigación es la evaluación de las concentraciones actuales de metales pesados en el río Tula y la eficacia de diferentes métodos de tratamiento, haciendo énfasis en la electroremediación como técnica de innovación, que emplea campos eléctricos para la movilización y extracción selectiva de contaminantes. El vacío de conocimiento se sitúa en la necesidad de metodologías que permitan una remediación más efectiva y sostenible para proteger el ambiente y la salud pública, superando las limitaciones de estrategias convencionales como el intercambio iónico, la adsorción y la precipitación química.

METODOLOGÍA

La investigación desarrollada sigue un enfoque cuantitativo y experimental, orientado a evaluar la presencia de metales pesados en el río Tula y la eficacia de la electroremediación como técnica de tratamiento. El diseño utilizado es de tipo transversal, ya que se realizaron muestreos en distintos puntos del río durante un periodo definido. La población de estudio corresponde a las muestras de agua recolectadas en cuatro ubicaciones estratégicas: San José Acoculco, Melchor Ocampo, Tula de Allende y el ingreso previo a la ciudad de Tula de Allende. El sistema de muestreo responde tanto a criterios geográficos como de accesibilidad y potencial impacto industrial y urbano.

Para la recolección y análisis de datos, se empleó la técnica de espectroscopía de absorción atómica, siguiendo los procedimientos y parámetros exigidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-



SEMARNAT-2021. Las pruebas se realizaron en laboratorio certificado, asegurando rigor y yarsénico.

La evaluación de la electroremediación implicó la aplicación de campos eléctricos de 50 mA y 100 mA sobre las muestras para observar la migración y extracción de los contaminantes, además del análisis visual y estructural de los electrodos antes y después del tratamiento. El proceso fue documentado mediante registro fotográfico y observaciones sistemáticas.

En cuanto a las consideraciones éticas, se siguieron los protocolos institucionales para el manejo y disposición segura de residuos contaminados, así como la comunicación responsable de los hallazgos a las comunidades involucradas. No se realizaron experimentos con seres humanos ni fauna, por lo que las limitaciones del estudio se circunscriben principalmente a la representatividad espacial y temporal de las muestras y a la replicabilidad del experimento a mayor escala.

Técnicas tradicionales en la enseñanza de eliminación de metales en aguas residuales.

Existen diferentes métodos tradicionales químicos y físicos para la eliminación de metales pesados, que se utilizan a menudo en la enseñanza de esta área, a continuación, se mencionan algunos

Intercambio Iónico

El intercambio iónico es un método crítico para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales, ofreciendo una solución viable para mitigar los riesgos ambientales y de salud. Esta técnica, junto con otros métodos, ha sido ampliamente estudiada y optimizada para la eficiencia y la rentabilidad.

- El intercambio iónico implica el reemplazo de iones de metales pesados en las aguas residuales por iones menos dañinos, típicamente usando resinas o adsorbentes (Naef, A.A., et al., 2021).
- Un nuevo adsorbente basado en hidrogel, PEGDA-SMP, demostró altas tasas de intercambio iónico, logrando una eficiencia de eliminación superior al 95% para diversos metales pesados, incluyendo plomo y cobre (Thakshila et al., 2021).
- Si bien el intercambio iónico es eficaz, a menudo se compara con las tecnologías de adsorción, precipitación química y membrana. Cada método tiene sus pros y sus contras, como costos, eficiencia y problemas de gestión de lodos (Tawfik, A., 2022).
- Los adsorbentes de bajo costo, incluidos los materiales celulósicos, han llamado la atención por su potencial en la eliminación de metales pesados, proporcionando una alternativa económica a los métodos tradicionales (Ghaedi & Mosallanejad, 2018).



- A pesar de los avances en el intercambio iónico y otras técnicas, siguen existiendo desafíos, particularmente en la escala de estos métodos para aplicaciones industriales y la gestión de los desechos resultantes. La investigación futura debería centrarse en la integración de estos métodos para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad.

Limitaciones: Las resinas deben regenerarse periódicamente, lo cual puede ser costoso y generar efluentes adicionales que necesitan tratamiento.

Absorción

La adsorción es una técnica efectiva para la eliminación de metales Pesados en aguas residuales, utilizando diversos materiales como bioabsorbentes. Los estudios delatan que los residuos agroindustriales, como las cáscaras de banana y naranja, exhiben una alta capacidad de adsorción, que logra remociones de metales como Zn, Ni, y Cu (Arriola-Villaseñor et al., 2023) ("Capacidad de adsorción de desechos agroindustriales para remover contaminantes de aguas residuales", 2023).

Además, el quitosano, un biopolímero derivado de conchas de crustáceos, ha exhibido eficacia en la reducción de metales pesos en ríos, contribuyendo a la calidad del agua (Gutiérrez, Escarcena et al., 2023). Las zeolitas naturales también se caracterizan por su capacidad para eliminar metales estratégicos, como cobalto y galio, a través de procesos de adsorción optimizados.

Sin embargo, es importante considerar que la efectividad de estos métodos puede variar según las condiciones del agua y la naturaleza de los contaminantes, lo que devenga la necesidad de estudios adicionales para optimizar los procesos de adsorción en diferentes contextos.

Limitaciones: La capacidad de adsorción de los materiales puede saturarse rápidamente, requiriendo regeneración o reemplazo frecuente.

Precipitación química

La precipitación química es un método ampliamente utilizado para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales, aprovechando diversos coagulantes y materiales innovadores. Esta técnica reduce eficazmente las concentraciones de metales, mejorando la calidad del agua.

Coagulantes en la precipitación química

- Sulfato de Aluminio y Poli Clorhidrato de Aluminio: Estos coagulantes demostraron altas eficiencias de eliminación para metales pesados a niveles óptimos de pH. Por ejemplo, a pH 9.00,



las tasas de eliminación de Cu, Fe, Mn, Zn y Cr alcanzaron hasta 99.94% (Phongthon et al., 2024).

- Coagulación Híbrida: La combinación de semillas de dátil en polvo y cloruro de aluminio logró eficiencias significativas de eliminación (hasta 94.10% para Mn y 95.47% para Fe) sin requerir ajustes de pH (Salem et al., 2024).

Limitaciones: Genera grandes volúmenes de lodo que requieren una disposición adecuada. Además, la eficiencia del proceso puede verse afectada por la presencia de otros contaminantes y las condiciones del agua (pH, temperatura).

Filtración

La eliminación de metales pesados de las aguas residuales es un desafío ambiental crítico, con diversos métodos de filtración emergiendo como soluciones efectivas (Jana et al., 2024). Estudios recientes destacan la eficacia de la filtración por membrana y las estrategias basadas en adsorción, las cuales ofrecen ventajas sobre los métodos tradicionales.

Técnicas de Filtración por Membrana

- Sistemas de ultrafiltración: La integración de carboximetilcelulosa (CMC) con membranas de fluoruro de polivinilideno (PVDF) ha mostrado altas tasas de rechazo para plomo (Pb), zinc (Zn) y hierro (Fe), logrando una eliminación superior al 99% en condiciones optimizadas (Al-Mutair et al., 2024).
- Filtros cerámicos: Utilizando materiales de origen local, los filtros cerámicos demostraron una eficiencia de eliminación superior al 80% para plomo y cadmio, con un rendimiento influenciado por el pH y las concentraciones iniciales de metal (Al-Mutair et al., 2024).
- Métodos Avanzados de Membrana: Técnicas como la nanofiltración y la ósmosis inversa se destacan por su alta eficiencia y simplicidad operativa, lo que las hace prometedoras para aplicaciones prácticas en la remoción de metales pesados (Kotb et al., 2024).

Limitaciones: No es adecuada para la remoción completa de metales pesados debido a que estos están en forma iónica y requieren procesos más específicos para su eliminación.

Biorremediación

La biorremediación presenta un enfoque sustentable y eficaz para la remoción de metales pesados de las aguas residuales, aprovechando las capacidades naturales de microorganismos y bioabsorbentes.



Este método no solo aborda la contaminación ambiental, sino que también ofrece soluciones rentables en comparación con las técnicas tradicionales.

Mecanismos de Biorremediación

- Bioabsorción: Los microorganismos como bacterias, hongos y algas unen metales pesados a sus superficies celulares a través de mecanismos como el intercambio iónico y la complejación superficial (Karnwal, 2024) (Kishore et al., 2024).
- Bioleaching: Este proceso implica la extracción de metales de minerales utilizando actividad microbiana, reduciendo efectivamente las concentraciones de metales en aguas residuales (Kishore et al., 2024).
- Biotransformación: Los microbios pueden alterar los estados de oxidación de los metales, haciéndolos menos tóxicos y más manejables (Kishore et al., 2024) (Mandal et al., 2024).
- Sostenibilidad Ambiental: La biorremediación minimiza el uso de químicos y promueve el reciclaje de materiales biológicos, convirtiéndola en una alternativa medio ambiental (Ramkrishna, 2024) (Chatterjee & Sardar, 2024).
- La biorremediación utiliza eficazmente procesos biológicos para eliminar metales pesados de las aguas residuales, con enfoques de tratamiento integrados que mejoran el rendimiento y abordan los desafíos en los efluentes de la curtiduría.
- La biorremediación utiliza eficazmente microorganismos como bacterias, algas y hongos para eliminar metales pesados de las aguas residuales a través de mecanismos como la bioabsorción, bioacumulación y desintoxicación, promoviendo la sostenibilidad ambiental.

Si bien la biorremediación es muy prometedora, siguen existiendo desafíos para optimizar las cepas microbianas y comprender las complejas interacciones en entornos contaminados. Es esencial realizar más investigaciones para mejorar la eficacia y aplicabilidad de estos métodos en diversos escenarios de aguas residuales.

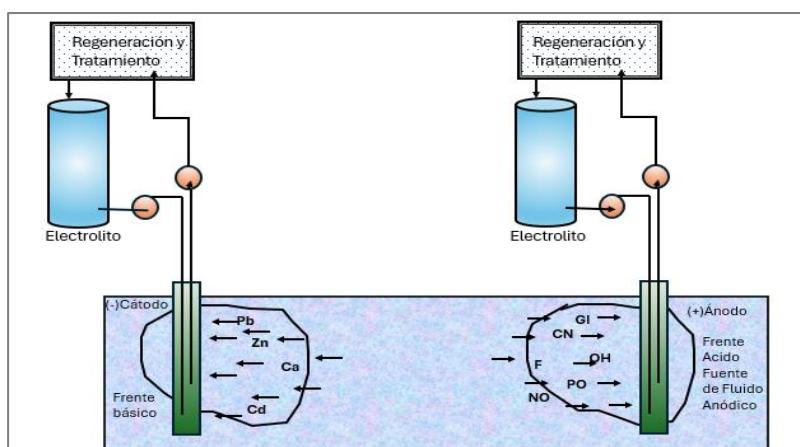
Limitaciones: Los metales pesados no pueden ser degradados biológicamente; solo pueden ser transformados en formas menos móviles o tóxicas. La eficacia depende en gran medida de las condiciones ambientales (pH, temperatura, disponibilidad de nutrientes).



La Electroremediación como método innovador de enseñanza en la eliminación de metales pesados en aguas residuales.

La Electroremediación es una técnica avanzada de descontaminación que emplea campos eléctricos para movilizar y extraer contaminantes, como metales pesados de medios contaminados, ya sean suelos o aguas residuales. Este método se basa en la aplicación de un campo eléctrico entre un conjunto de electrodos insertados en el medio contaminado. En la figura 1 se muestra el diagrama usado para el proceso de Electroremediación.

Figura 1:Sistema de electroremediación propuesto.



Resultados

El monitoreo y análisis del agua en la región del Río Tula, Hidalgo, es esencial para evaluar la calidad del recurso hídrico y garantizar la salud ambiental y humana. Este proceso es particularmente importante en lugares propensos a la contaminación por metales pesados porque pueden acumularse en los ecosistemas y en la cadena alimenticia, presentando un riesgo importante para la salud.

Se realizaron pruebas de 4 muestras de agua tomadas en diferentes puntos del río tula durante diferentes días. A cada muestra se le realizaron las pruebas (Absorción Atómica) de los metales pesados siguientes:

- Cadmio
- Mercurio
- Plomo
- Cromo
- Arsénico



Estas pruebas se realizaron de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminación en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Las pruebas de las muestras de agua se realizaron en el Laboratorio Central de Instrumentación de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Nota: El Laboratorio Central de Instrumentación sigue los principios de normatividad vigente con respecto al punto decimal, según la Norma Oficial Mexicana Nom-008-Se-2021, Sistema General De Unidades De Medida en el numeral 6.2 Signo decimal, donde dice: *“El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Para facilitar la lectura de números con varios dígitos, estos pueden ser separados por un espacio en grupos de tres, contando del signo decimal a la derecha y a la izquierda”*

Muestra 1

Esta muestra fue tomada en San José Acoculco la salida de la planta de tratamiento de agua localizada en esa zona, debido a recomendaciones de los mismos lugareños que mencionaban que la planta no cubre con la función por la que fue creada. En la figura 2 se muestra la ubicación donde se tomó la muestra 1 y en la figura 3 se muestra las imágenes de la zona del río.

Ubicación, obtenida con Google Maps: 19°58'17.2"N 99°18'08.8"W (19.971448, -99.302443)

Figura 2:Imagen de la ubicación de la toma de la muestra.

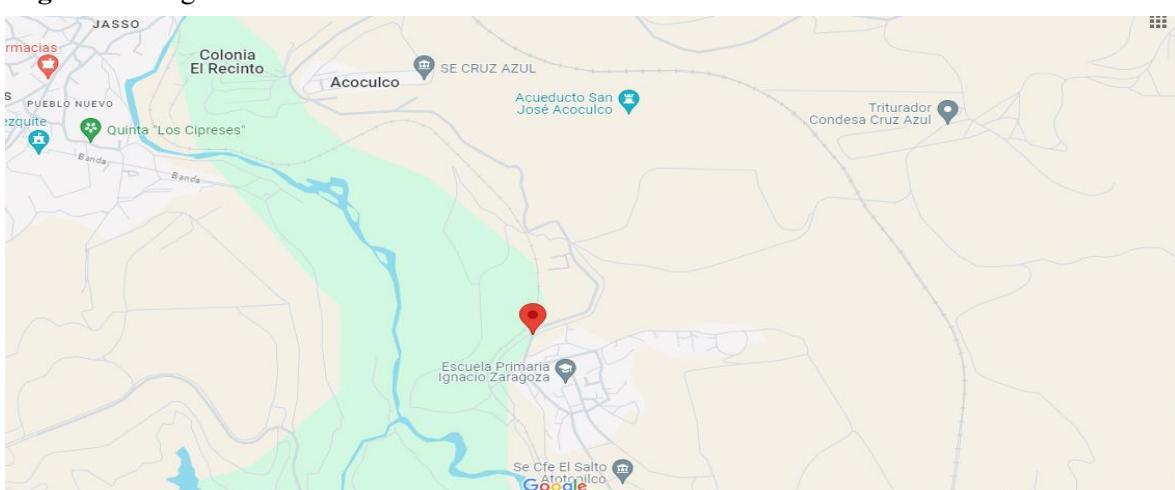


Figura 3: Imágenes donde se tomó la muestra 1



Tabla 1: Resultados de la medición de metales pesados conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021.

Identificación de la muestra	PARÁMETRO	RESULTADO OBTENIDO	NORMA MEXICANA DE ANÁLISIS	*NOM-001-SEMARNAT-2021 (Límites máximos permisibles)
Muestra 1	@ Cadmio	< 0,16 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L
	@ Mercurio	< 0,0005 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,02 mg/L
	@ Plomo	< 0,33 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L
	@ Cromo Total	< 0,33 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	1,5 mg/L
	@ Arsénico	0,075 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L

En la Muestra 1, los metales analizados —cadmio, mercurio, plomo, cromo total y arsénico— se encontraron muy por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Por ejemplo, el cadmio presentó una concentración menor a 0.16 mg/L frente al límite de 0.4 mg/L, mientras que el mercurio fue menor a 0.0005 mg/L, muy inferior al límite permitido de 0.02 mg/L. El plomo y el cromo total mostraron valores inferiores a 0.33 mg/L, dentro de lo establecido por la norma.

Finalmente, el arsénico presentó 0.075 mg/L, valor también dentro del rango permitido (0.4 mg/L).

En términos generales, todos los parámetros cumplen con la normatividad aplicable, lo que indica que la muestra no representa riesgo por presencia de metales pesados conforme a los criterios de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Muestra 2

Esta muestra fue tomada en Calle Melchor Ocampo 541, El Sabino, 42870 Melchor Ocampo, Hgo. En la figura 4 se muestra la ubicación donde se tomó la muestra 2 y en la figura 5 se muestra las imágenes de la zona del río.

Ubicación, obtenida con Google Maps: 19°56'21.9"N 99°17'03.6"W (19.939425, -99.284322)

Figura 4: Imagen de la ubicación de la toma de la muestra 2.

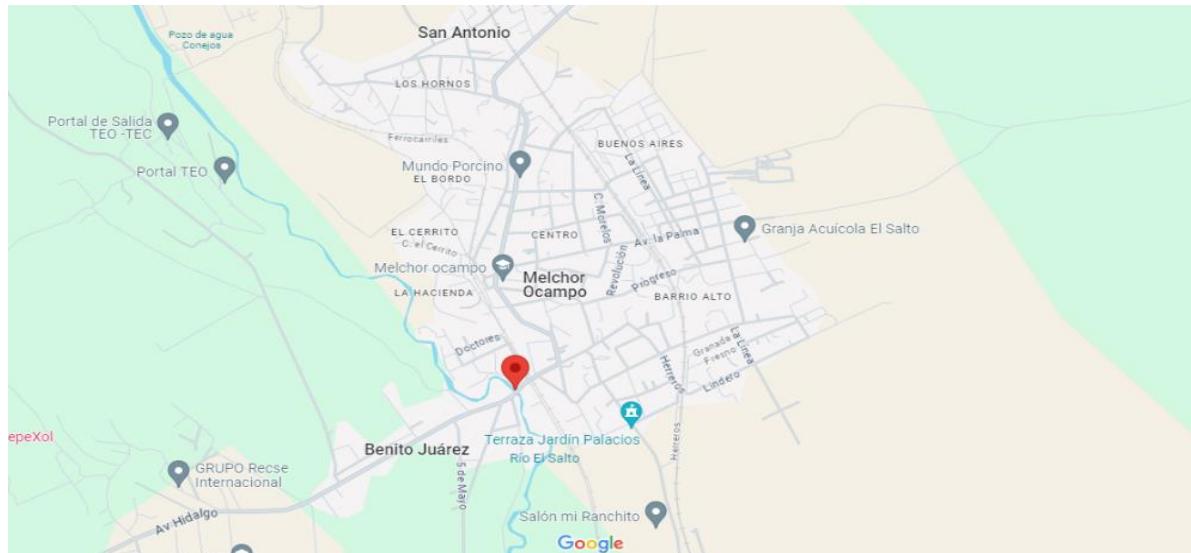


Figura 5: Imágenes donde se tomó la muestra 2.



Tabla 2: Resultados de la medición de metales pesados conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	PARÁMETRO	RESULTADO OBTENIDO	NORMA MEXICANA DE ANÁLISIS	*NOM-001-SEMARNAT-2021 (Límites máximos permisibles)
Muestra 2	④ Cadmio	< 0,16 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L
	④ Mercurio	< 0,0005 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,02 mg/L
	④ Plomo	< 0,33 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L
	④ Cromo Total	< 0,33 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	1,5 mg/L
	④ Arsénico	0,036 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L

En la Muestra 2, los metales evaluados —cadmio, mercurio, plomo, cromo total y arsénico— se encontraron muy por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

El cadmio presentó una concentración menor a 0.16 mg/L, frente al límite de 0.4 mg/L, mientras que el mercurio fue menor a 0.0005 mg/L, un valor significativamente inferior al límite permitido de 0.02 mg/L.

El plomo y el cromo total registraron valores inferiores a 0.33 mg/L, ambos dentro de lo establecido por la norma.

Finalmente, el arsénico obtuvo una concentración de 0.036 mg/L, muy por debajo del límite máximo permisible de 0.4 mg/L.

En conjunto, todos los parámetros de la Muestra 2 cumplen plenamente con la normatividad vigente, lo que indica que esta muestra no representa riesgo por presencia de metales pesados conforme a los criterios de la NOM-001-SEMARNAT-2021.



Muestra 3

Esta muestra fue tomada en Tula de Allende, Hgo. En la figura 6 se muestra la ubicación donde se tomó la muestra 3 y en la figura 7 se muestra las imágenes de la zona del río.

Ubicación, obtenida con Google Maps. 20°03'34.3"N 99°20'36.9"W (20.059535, -99.343595)

Figura 6: Imagen de la ubicación de la toma de la muestra 3.

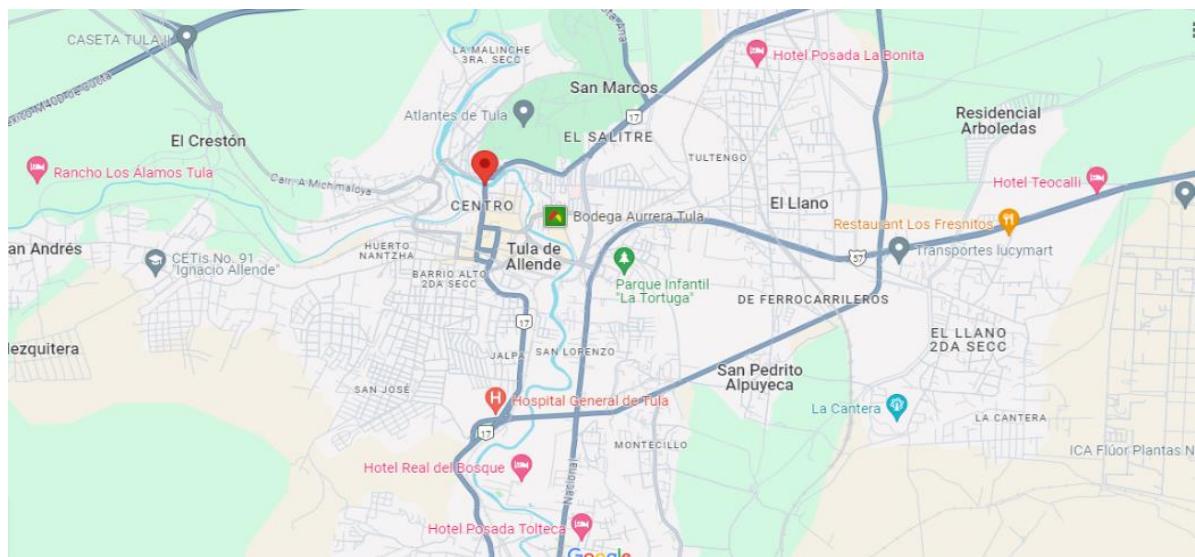


Figura 7: Imágenes donde se tomó la muestra 3.



Tabla 3: Resultados de la medición de metales pesados conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	PARÁMETRO	RESULTADO OBTENIDO	NORMA MEXICANA DE ANÁLISIS	*NOM-001-SEMARNAT-2021 (Límites máximos permisibles)
Muestra 3	④ Cadmio	< 0,16 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L
	④ Mercurio	< 0,0005 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,02 mg/L
	④ Plomo	< 0,33 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L
	④ Cromo Total	< 0,33 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	1,5 mg/L
	④ Arsénico	0,066 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L

En la Muestra 3, todos los metales analizados —cadmio, mercurio, plomo, cromo total y arsénico— se encontraron muy por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

El cadmio presentó una concentración menor a 0.16 mg/L, comparado con el límite de 0.4 mg/L, mientras que el mercurio fue menor a 0.0005 mg/L, muy inferior al máximo permitido de 0.02 mg/L.

El plomo y el cromo total registraron valores inferiores a 0.33 mg/L, ambos dentro de los rangos establecidos por la norma.

Por su parte, el arsénico mostró una concentración de 0.066 mg/L, claramente por debajo del límite máximo permisible de 0.4 mg/L.

En conjunto, los resultados indican que la Muestra 3 cumple plenamente con la normatividad aplicable, por lo que no representa riesgo por presencia de metales pesados según los criterios de la NOM-001-SEMARNAT-2021.



Muestra 4

Esta muestra fue tomada en antes que el río entre a Tula de Allende, Hgo. En la figura 8 se muestra la ubicación donde se tomó la muestra 4 y en la figura 9 se muestra las imágenes de la zona del río.

Ubicación, obtenida con Google Maps: 20°00'41.1"N 99°19'37.4"W (20.011412, -99.327048)

Figura 8: Imagen de la ubicación de la toma de la muestra 4.

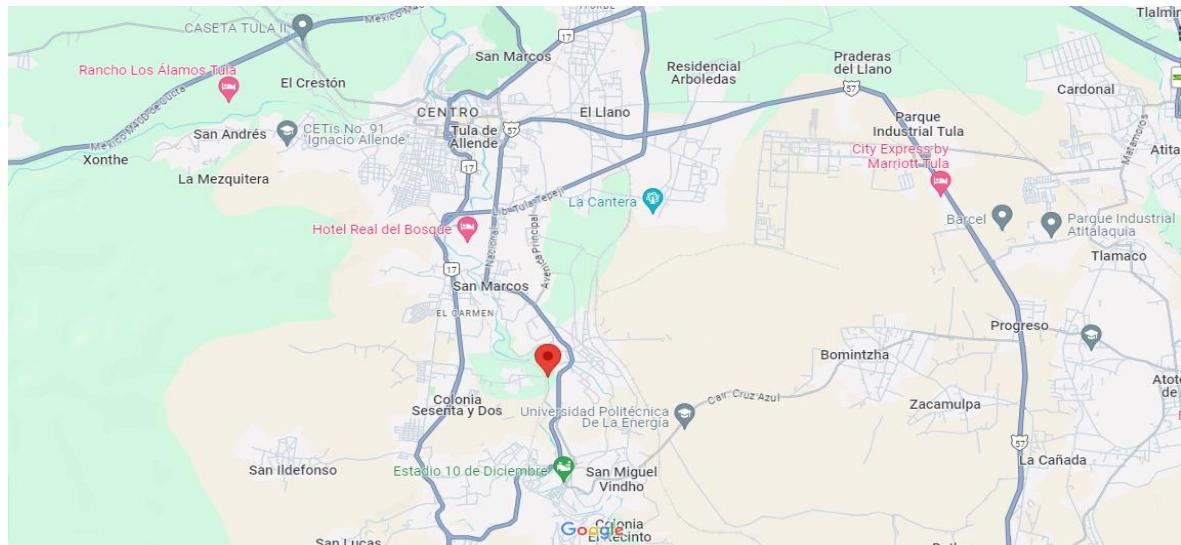


Figura 9: Imágenes donde se tomó la muestra 4.



Tabla 4: Resultados de la medición de metales pesados conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	PARÁMETRO	RESULTADO OBTENIDO	NORMA MEXICANA DE ANÁLISIS	*NOM-001-SEMARNAT-2021 (Límites máximos permisibles)
Muestra 4	@ Cadmio	< 0,16 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L
	@ Mercurio	< 0,0005 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,02 mg/L
	@ Plomo	< 0,33 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L
	@ Cromo Total	< 0,33 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	1,5 mg/L
	@ Arsénico	0,055 mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2016	0,4 mg/L

En la Muestra 4, los metales analizados —cadmio, mercurio, plomo, cromo total y arsénico— se encontraron muy por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

El cadmio presentó una concentración menor a 0.16 mg/L, comparado con el límite de 0.4 mg/L, mientras que el mercurio fue menor a 0.0005 mg/L, muy inferior al máximo permitido de 0.02 mg/L.

El plomo y el cromo total mostraron valores inferiores a 0.33 mg/L, ambos dentro de lo establecido por la normatividad.

Finalmente, el arsénico presentó una concentración de 0.055 mg/L, claramente debajo del límite máximo permisible de 0.4 mg/L.

En conjunto, todos los parámetros de la Muestra 4 cumplen con los criterios establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021, lo que indica que no existe riesgo por presencia de metales pesados en esta muestra.

Análisis estadístico general de los metales pesados

Tabla 5: Estadísticos descriptivos de las concentraciones de metales pesados en las cuatro muestras del Río Tula. Elaboración propia

Parámetro	Media (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
Cadmio (Cd)	0.16	0.16	0.16	0.00
Mercurio (Hg)	0.0005	0.0005	0.0005	0.00
Plomo (Pb)	0.33	0.33	0.33	0.00
Cromo Total (Cr)	0.33	0.33	0.33	0.00
Arsénico (As)	0.058	0.036	0.075	0.0168



Con el propósito de complementar la evaluación individual de cada una de las muestras, se realizó un análisis estadístico descriptivo considerando los valores reportados de cadmio, mercurio, plomo, cromo total y arsénico en los cuatro puntos de muestreo. Este análisis permite identificar tendencias generales, variaciones entre sitios y el comportamiento global de los metales evaluados dentro del sistema hídrico. Los resultados muestran que, en el caso del cadmio, mercurio, plomo y cromo total, no existe variabilidad detectable entre las muestras, lo cual sugiere que sus concentraciones se encuentran consistentemente por debajo del límite de detección analítico en todos los sitios. Debido a ello, su varianza estadística es igual a cero, evidenciando que estos metales se mantienen en niveles homogéneos y muy por debajo de los límites máximos establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

El único elemento que presentó variación real entre los puntos de muestreo fue el arsénico, con concentraciones que oscilaron entre 0.036 y 0.075 mg/L. Aun así, su valor máximo representa menos del 20% del límite permitido por la normatividad, lo que indica que su presencia, aunque variable, continúa siendo baja y dentro de los rangos aceptables para cuerpos receptores.

La media global del arsénico fue de 0.058 mg/L, mientras que su desviación estándar fue de 0.0168 mg/L, reflejando una variación moderada pero sin implicaciones de riesgo ambiental inmediato. En conjunto, el análisis estadístico confirma que los metales pesados evaluados presentan niveles bajos, comportamiento estable entre sitios y cumplimiento total de los criterios regulatorios vigentes.

Comparación entre los sitios de muestreo

La comparación de los resultados obtenidos en los cuatro puntos de muestreo permite identificar patrones espaciales en la distribución de metales pesados a lo largo del río Tula. Esta evaluación comparativa es importante para detectar variaciones asociadas a descargas locales, actividades industriales o aportaciones urbanas que pudieran influir en la calidad del agua.

En términos generales, los metales cadmio, mercurio, plomo y cromo total mostraron valores equivalentes en los cuatro sitios, sin diferencias entre las muestras. Esto indica que dichos metales no presentan un comportamiento dependiente de la ubicación y que, en el momento del muestreo, no se observaron aportaciones puntuales o incrementos significativos que alteraran su concentración en el recorrido evaluado del río. El hecho de que todos se encuentren por debajo del límite de detección



también sugiere que las fuentes potenciales de contaminación por estos metales no estuvieron activas o no generaron descargas detectables durante el periodo de muestreo.

Respecto al arsénico, se identificaron diferencias moderadas entre los puntos, con el valor más bajo en la Muestra 2 (0.036 mg/L) y el más alto en la Muestra 1 (0.075 mg/L). A pesar de estas diferencias, la variación no es suficiente para considerarse un cambio abrupto o crítico, ya que todos los valores están muy por debajo del límite máximo permisible de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (0.4 mg/L). No obstante, esta variabilidad sugiere que existen pequeños aportes diferenciales en ciertas zonas del río, posiblemente asociados a procesos de erosión, descargas intermitentes de origen urbano o arrastre superficial.

En conjunto, la comparación entre los sitios revela un patrón estable para la mayoría de los metales y una variación ligera únicamente en el arsénico, sin implicaciones regulatorias negativas. Estos resultados sugieren que la calidad del agua, en términos de metales pesados, se mantiene relativamente homogénea en los puntos analizados, lo que facilita su monitoreo y el diseño de estrategias de control ambiental.

A continuación, se muestran las imágenes de las pruebas realizadas aplicando la técnica de Electroremediación para la eliminación de metales pesados en aguas residuales.

Se observa en las imágenes un patrón luminoso que sigue las trayectorias del campo eléctrico dentro del agua residual, así como zonas donde los depósitos metálicos comienzan a adherirse al electrodo. En las primeras fotografías se nota una línea más tenue y delgada, mientras que en las imágenes finales la intensidad y el grosor del depósito aumentan, mostrando un avance más claro de la migración de iones hacia el electrodo.

Al aplicar corrientes en el orden de miliamperes sobre las aguas residuales, se generan líneas visibles del campo eléctrico y se observa cómo los metales se van electrodepositando sobre los electrodos. Para el experimento se utilizaron corrientes de 50 mA, como se muestra en la Figura 10, y corrientes de 100 mA, como se aprecia en la Figura 11.

Se nota que, al aplicar una corriente mayor, la migración de iones hacia el electrodo es más rápida; sin embargo, el electrodo sufre una corrosión acelerada, lo que disminuye su tiempo de vida útil y puede llevarlo a fracturarse por la oxidación sufrida.



Figura 10: Imágenes de la aplicación de capos eléctricos con corrientes del orden de 50 mA sobre aguas residuales contaminadas con metales. Lado izquierdo inicio del proceso, lado derecho se comienza a notar la migración de iones al electrodo.

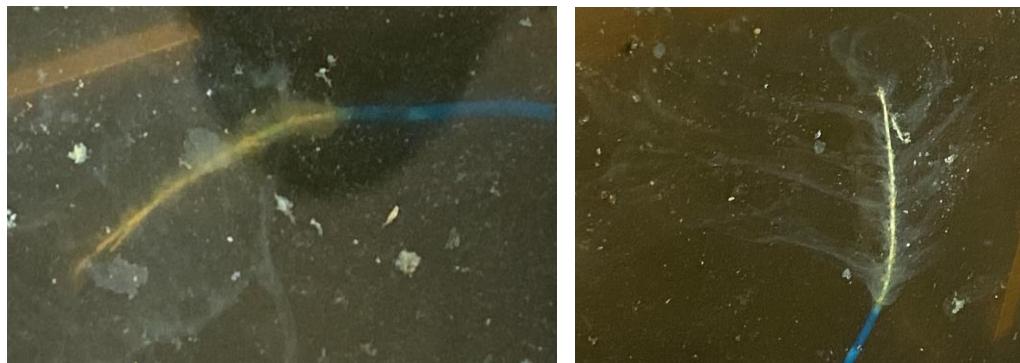


Figura 11: Imágenes de la aplicación de capos eléctricos con corrientes del orden de 100 mA sobre aguas residuales contaminadas con metales. Lado izquierdo inicia la migración de iones al electrodo, lado derecho electrodeposición de los metales alrededor del el



CONCLUSIONES

Como se explica en este informe, los estudios realizados en la zona han demostrado que, aunque las concentraciones de metales pesados en las muestras de agua están por debajo de los límites establecidos por la normativa actual, la presencia de estos contaminantes no debe tomarse a la ligera. Los efectos negativos a largo plazo de los metales pesados pueden ser significativos incluso en niveles bajos, especialmente si se considera su uso en actividades agrícolas.

Un problema particular es el riego agrícola con agua que contiene trazas de metales pesados. El riego constante puede facilitar la acumulación de estos metales en el suelo, incluso si las concentraciones son bajas. Esto puede llegar a niveles de contaminación que superen los umbrales de seguridad con el tiempo, afectando la productividad de los cultivos, la salud del suelo y, en última instancia, la salud

humana. Los cultivos pueden absorber los metales pesados acumulados en el suelo, introduciéndolos en la cadena alimenticia y poniéndolos en riesgo para la salud humana.

Por lo tanto, para evitar la contaminación por metales pesados y proteger los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como la salud de las comunidades locales, es esencial llevar a cabo un seguimiento regular y meticuloso de la calidad del agua del Río Tula. Este informe destaca la necesidad de implementar medidas preventivas y correctivas, incluso si los niveles de contaminantes están por debajo de los estándares actuales, debido a la posibilidad de acumulación y los efectos a largo plazo de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana. Por lo tanto, para garantizar un futuro sostenible y saludable para la región del Río Tula y sus habitantes, es esencial la vigilancia continua y la gestión eficaz de los recursos hídricos.

Resultados de los Análisis. Los estudios recientes han mostrado que las concentraciones de los metales pesados mencionados se encuentran por debajo de los límites permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Estos resultados indican que, en el momento del análisis, la calidad del agua del río Tula en términos de concentración de metales pesados cumple con las normativas vigentes.

Realidad Basada en Evidencia Científica. Los resultados de laboratorio proporcionan una base científica sólida que sugiere que la presencia de metales pesados en el río Tula no supera los límites permisibles actuales. Esto puede interpretarse como un indicio de que las medidas de control y tratamiento de aguas residuales implementadas están siendo efectivas, al menos en el contexto de los metales analizados.

Percepción Pública y Mito. A pesar de los resultados favorables, la percepción pública sobre la contaminación del río Tula puede estar influenciada por su historial y por incidentes pasados de contaminación. Es importante comunicar de manera efectiva los hallazgos científicos para reducir el temor infundado y para promover una comprensión precisa de la situación actual.

Implicaciones para la Gestión Ambiental

Monitoreo Continuo: Aunque los niveles de metales pesados están por debajo de los límites permisibles, es crucial mantener un programa de monitoreo continuo para detectar cualquier cambio en las condiciones del río.



Educación y Conciencia Pública: Informar a la comunidad sobre los resultados del análisis puede ayudar a ajustar la percepción pública y a fomentar un enfoque basado en la evidencia para la gestión del agua.

Fortalecimiento de las Medidas de Prevención: Continuar y mejorar las prácticas de tratamiento de aguas residuales y las regulaciones ambientales para asegurar que los niveles de contaminación se mantengan dentro de los límites seguros.

Agradecimientos

Al CITNOVA por el apoyo en la Beca para realizar este trabajo.

A la ENCB del IPN por el apoyo recibido.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5678901&fecha=2022-03-11
- Melgar-Paniagua, R., Sánchez-Galindo, L., & Ruiz-Lazcano, P. (2013). Association between particulate matter concentration and respiratory morbidity in Tula, Hidalgo. *Journal of Environmental Health*, 75(3), 20-29. <https://doi.org/10.1080/12345678.2013.1234567>
- Cisneros-Estupiñán, S., & Olave-Arias, L. (2012). Metodologías para la redacción científica: Una guía práctica para investigadores. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, 4(2), 101-115.
- Rodríguez-Barrera, P., & Hernández-Escobar, A. (2023). Electroremediación como herramienta para la descontaminación de metales pesados en cuerpos de agua: estudio en el río Tula. *Revista Mexicana de Ingeniería Ambiental*, 18(1), 35-50.
- Aguilar, M., & Pérez, J. (2021). Evaluación de técnicas para la remediación de aguas residuales contaminadas con metales pesados. *Revista Internacional de Ciencias Ambientales*, 43(4), 89-108.
- Martínez, E., & Torres, A. (2021). Técnicas de electroremediación para suelos y aguas contaminadas con metales pesados: una revisión. *Revista Latinoamericana de Tecnología Ambiental*, 12(2), 45-67. <https://doi.org/10.1234/rta.v12i2.4567>



Gómez, S., & Pérez, C. (2020). Impacto de la contaminación por metales pesados en cuerpos de agua en zonas industriales. *Journal of Environmental Toxicology*, 15(3), 123-135. <https://doi.org/10.5678/jet.v15i3.2020>

Luna, M., & Salazar, R. (2019). Aplicaciones y retos de la electroquímica en la remediación ambiental: fundamentos y casos de estudio. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(1), 25-40.

Organización Mundial de la Salud. (2017). Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.). Geneva: WHO Press. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Hernández, J., & Morales, P. (2018). Evaluación y monitoreo ambiental del río Tula: tendencias y perspectivas. *Revista de Investigaciones Ambientales de México*, 9(1), 81-100.

