

## Biomonitoreo con plantas en ecosistemas acuáticos

### *Biomonitoring with plants in aquatic ecosystems*

Divulgación

Sandra Janet Palomares-García<sup>1</sup>, Sonia Gallegos-Martínez<sup>1</sup>, Huemantzin Balan Ortiz-Oliveros<sup>2</sup>, Pedro Ávila-Perez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Av Tecnológico 100-s/n, Col Agrícola Bellavista, Metepec, México, CP. 52149

<sup>2</sup>Departamento de Desechos Radiactivos, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Ocoyoacac, México, C.P. 52750

Autor de Contacto: DD24280373@toluca.tecnm.mx

### Resumen

La contaminación por metales pesados representa una amenaza ambiental debido a su persistencia, no degradabilidad y toxicidad para los organismos vivos. En este contexto, el biomonitoreo con plantas acuáticas, particularmente macrófitas, emerge como una herramienta eficaz para evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos. A diferencia de los análisis fisicoquímicos convencionales, el biomonitoreo permite detectar la biodisponibilidad de los contaminantes y su impacto biológico a lo largo del tiempo. Las macrófitas, gracias a la capacidad de acumular metales en sus tejidos, amplia distribución y tolerancia a ambientes contaminados, han demostrado ser útiles como biomonitores pasivos de metales como, por ejemplo: Cd, Pb, Zn, Cu y Hg. El análisis de sus tejidos facilita la identificación de gradientes de contaminación y proporciona datos esenciales para el manejo ambiental. Este trabajo expone los fundamentos del biomonitoreo con macrófitas, revisa estudios de caso recientes, sus ventajas y perspectivas en el monitoreo de ecosistemas acuáticos contaminados.

### Abstract

Heavy metal pollution poses an environmental threat due to its persistence, non-degradability, and toxicity to living organisms. In this context, biomonitoring with aquatic plants, particularly macrophytes, emerges as an effective tool for assessing the quality of aquatic ecosystems. Unlike conventional physicochemical analyses, biomonitoring allows for the detection of contaminant bioavailability and their biological impact over time. Macrophytes, thanks to their ability to accumulate metals in their tissues, their wide distribution, and their tolerance to contaminated environments, have proven useful as passive biomonitors of metals such as Cd, Pb, Zn, Cu, and Hg. Analysis of their tissues facilitates the identification of contamination gradients and provides essential data for environmental management. This paper presents the fundamentals of macrophyte biomonitoring, reviews recent case studies, and reviews its advantages and prospects for monitoring contaminated aquatic ecosystems.

### Introducción

El aumento de las actividades humanas como la minería, la industria metalmecánica y electrónica, la quema de combustibles fósiles, los gases de escape de los vehículos, la ganadería y la agricultura (Ortiz et al., 2024) han acelerado las emisiones por metales provenientes de fuentes antropogénicas, deteriorando el medio ambiente y la salud humana. La contaminación con metales pesados se considera un problema global debido a su persistencia, no degradabilidad y toxicidad para los organismos vivos. Los cuerpos de agua son, los ecosistemas más vulnerables, por lo tanto, es necesario un monitoreo de las sustancias contaminantes que ingresan en ellos con la finalidad de implementar medidas de control apropiadas y prevenir daños a estos hábitats. El biomonitoreo se posiciona como uno de los métodos recomendados, ya que proporciona información no solo sobre el nivel de contaminación, sino también sobre la biodisponibilidad de los elementos y su impacto biológico.

El biomonitoreo es una técnica científica para evaluar el grado de contaminación en el medio ambiente, incluyendo la exposición humana a sustancias químicas naturales y sintéticas, a partir del muestreo y análisis de tejidos y fluidos de un organismo vegetal individual (Zhou, 2008). Las fuentes naturales de contaminación por metales pesados incluyen la erosión, la meteorización de las rocas y las erupciones volcánicas. Los fertilizantes que se utilizan para aportar K, P y N para mejorar el crecimiento de los cultivos, producen un incremento de metales como Cd, Pb, Fe y Hg (Ali et al., 2020). Estos metales contaminantes se almacenan fácilmente en las plantas, a través de las cuales ingresan a la cadena alimentaria y se transmiten a los humanos. Se ha confirmado que algunos metales son mutagénicos, cancerígenos,

teratogénicos, alergénicos o disruptores endocrinos, producen efectos perjudiciales sobre el sistema inmunitario, así como daños en la médula ósea y el sistema nervioso central (Ferri, 2023).

Las plantas han adquirido un papel crucial como herramientas para evaluar y supervisar la calidad y el bienestar de los ecosistemas acuáticos. Su función como productores primarios, les otorga a las plantas un rol esencial en el ecosistema. Entre ellas se encuentran las plantas acuáticas. Se han identificado relaciones entre las concentraciones de metales en el agua y las macrófitas, así como entre los metales sedimentados en el suelo y las plantas acuáticas que pueden alcanzar el sedimento y acumular niveles más altos de varios contaminantes metálicos, tales como Pb, Cd, Hg, Cr, Ar, Ni, Zn, Cu y Fe (Tanwir et al., 2020). Así, los estudios ambientales que incluyen organismos vegetales pueden identificar riesgos potenciales de toxicidad en el medio ambiente, dado que la contaminación que afecta a las plantas tiene un impacto directo e indirecto en otros organismos y en la salud general del ecosistema, incluidos los humanos (Ceschin et al., 2021).

### Desarrollo

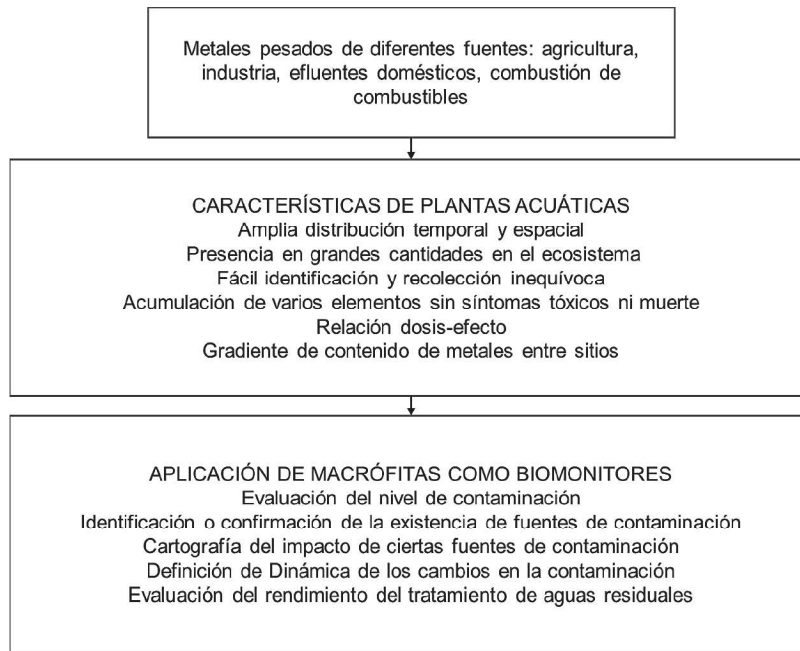
Los ambientes acuáticos son vulnerables a la acumulación y los efectos tóxicos de los metales pesados, convirtiendo al monitoreo de los ecosistemas acuáticos en uno de los temas de mayor importancia en la actualidad, siendo indispensable implementar medidas de control adecuadas y prevenir daños a estos ambientes. En este sentido, el biomonitoreo que implica el uso de organismos vivos para la detección y seguimiento de metales pesados, se considera la opción principal para el monitoreo de aguas dulces, ya que permite evaluar las concentraciones de contaminantes en función de la dosis a lo largo del tiempo (Polechonska & Klink, 2023).

El término metal pesado surge de la clasificación de Gamelan en 1817, quien dividió los elementos en metales ligeros, metales pesados y no metales. “Un metal con alta gravedad específica y mayor peso atómico se llama metal pesado” (Tanwir et al., 2020). Los organismos acuáticos sufren las consecuencias de estos metales debido a su lixiviación desde diversas fuentes puntuales o difusas lo que provoca la mezcla de sustancias tóxicas en el entorno. Por esta razón, la contaminación por metales representa un grave riesgo para la flora y fauna acuática (Tanwir et al., 2020).

Muchas plantas acuáticas tienen la capacidad de absorber elementos esenciales para su crecimiento y desarrollo (micronutrientes), como Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn y algunas especies son capaces de acumular elementos que no tienen función biológica conocida y son tóxicos incluso en bajas concentraciones, como As, Cd, Cr, Co, Ag, Hg (Polechonska & Klink, 2023).

En el caso de las macrófitas, plantas acuáticas que habitan en cuerpos de agua o en sus inmediaciones, y que se clasifican en tres grupos funcionales principales (sumergidas, emergentes y flotantes), al encontrarse arraigadas al sustrato facilitan tanto su localización como su identificación en el ambiente. Estas plantas presentan varias características que las hacen útiles para el monitoreo ambiental: son capaces de absorber contaminantes presentes en el entorno acuático (Bellino et al., 2020), permiten la detección de efectos acumulativos de dichos contaminantes a lo largo del tiempo (Ferri, 2023), exhiben una tolerancia a la contaminación por metales pesados, y son fáciles de recolectar. Además, pueden ser cultivadas en condiciones controladas de laboratorio, lo que amplía su utilidad en estudios experimentales (Zhou et al., 2008). Estas especies sirven de base para proponer parámetros biológicos que ayuden en la detección temprana de contaminación o la aparición de contaminantes nuevos, además se considera que son más económicos y sencillos en comparación con el monitoreo de parámetros físicoquímicos del agua. Por lo tanto, las macrófitas pueden utilizarse para monitorear la contaminación por elementos metálicos, en una correlación directa entre las concentraciones de metales en la planta y su entorno al momento de analizar sus tejidos vegetales.

La Figura 1 ilustra de manera esquemática los impactos de la contaminación por metales traza en ecosistemas de agua dulce y el rol de las macrófitas como bioindicadores acumulativos en la detección de estos contaminantes. Esta visión permite comprender mejor las interacciones entre los contaminantes, los organismos acuáticos y las técnicas de biomonitoreo (Polechonska & Klink, 2023).



**Figura 1.** Esquema de los impactos de la contaminación por metales traza y aplicación de bioindicadores acumulativos en ecosistemas de agua dulce (modificado de Polechonska & Klink, 2023).

A nivel global, se han implementado campañas de biomonitoreo como es el caso de México, que cuenta con un programa de biomonitoreo con organismos acuáticos entre estos macrófitas en el marco del programa internacional Global Water Watch (GWW) desde 2005, en el cual a partir de 2010 vienen integrando diferentes comunidades locales de los estados de Veracruz y Michoacán (Walteros, 2023). Otra experiencia similar se dio en la cuenca Salí-Dulce en Argentina donde se ha realizado el biomonitoreo acuático con plantas acuáticas mostrando que el biomonitoreo es eficaz para determinar la calidad de los cuerpos de agua (Walteros, 2023).

En un estudio de Bai et al. (2018) constituye una referencia clave en la evaluación del potencial de las plantas acuáticas como bioacumuladoras de metales pesados. En su investigación, realizada en el lago Taihu (China), se analizó la capacidad de cuatro especies (*Potamogeton malaianus*, *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides peltata* e *Hydrilla verticillata*) para acumular metales pesados presentes en el agua, como resultado de descargas industriales y aguas residuales domésticas. Los resultados demostraron que estas macrófitas eran excelentes acumuladores de metales pesados, lo que permitió posicionarlas como excelentes biomonitores de la contaminación en ecosistemas acuáticos.

Polechonska et al. (2022) demostraron la eficacia de cuatro macrófitas flotantes libres, *Lemna minor*, *Lemna trisulca*, *Salvinia natans* y *Azolla filiculoides*, como agentes de biomonitoreo de metales como Cd, Co, Cu, Mg, Na, Pb, Zn y Ni. Entre ellos, *L. trisulca* se destacó como el mejor bioacumulador, seguida por *S. natans*, *L. minor* y *A. filiculoides*. El estudio se realizó en el río Rzuchowska Struga, ubicado en la Baja Silesia, a unos 10 km al noroeste de Glogów, Polonia. Se seleccionaron trece sitios de muestreo y las plantas recolectadas fueron enjuagadas con agua desionizada para eliminar residuos. En laboratorio, las especies se secaron a 50 °C hasta alcanzar peso constante, y luego se pulverizaron en mortero de ágata. Las muestras se digirieron por triplicado en un horno de microondas, utilizando 3 mL de HNO<sub>3</sub> al 65 %. Tras enfriar, las muestras se diluyeron a 25 mL con agua desionizada. El contenido de oligoelementos se determinó con un espectrofotómetro de absorción atómica. Para validar el método, se utilizó como material de referencia el IPE-176 (*Phragmites communis*) del programa WEPAL (Países Bajos), obteniéndose recuperaciones entre el 95 % y el 105 %. La planta dominante en acumulación es *Myriophyllum spicatum*, donde registró los valores máximos para Fe 97.9 mg/kg, Mn 6.09 mg/kg, Zn 1.21 mg/kg, Cu 70.9 mg/kg y Pb 30.3 mg/kg.

Por otro lado, Petrov et al. (2023) evaluó la bioacumulación de metales en plantas acuáticas del río Okhta, en San Petersburgo, Rusia. Los autores analizaron las concentraciones de Fe, Mn, Cu y Zn en especies como *Sagittaria sagittifolia* L., *Typha latifolia* L., *Calla palustris* L., *Nuphar lutea* L., *Ceratophyllum demersum* L., *Phalaris arundinacea* L., *Carex acuta* L., *Filipendula ulmaria* y *Stratiotes aloides* L. El estudio contempló siete estaciones de muestreo, recolectando entre cinco y diez individuos por especie. Las muestras fueron lavadas con agua destilada para eliminar residuos, y posteriormente divididas en tejidos aéreos y subterráneos. Tras el secado al aire, los tejidos se

pulverizaron con mortero de ágata, se tamizaron (malla de 2 mm) y se mineralizaron por incineración seca en mufla a 550 °C durante 10 h. La extracción de metales se llevó a cabo mediante digestión ácida con HNO<sub>3</sub> al 33 %, y las concentraciones fueron determinadas por espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). Los resultados mostraron un aumento en la acumulación de metales durante el crecimiento de las plantas, lo cual destaca su potencial como biomonitores pasivos. De estas especies destacan *Nuphar lutea*, mayor concentración de Fe y Mn con 91.39 y 80.35 mg/kg respectivamente y *Ceratophyllum demersum* con valores más altos de Cu 2.75 y Zn 6.35 mg/kg.

En México, la especie *Hydrocotyle ranunculoides* fue estudiada en el Curso Alto del Río Lerma, Estado de México, con el objetivo de evaluar su capacidad para acumular metales como Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb. Los resultados indicaron que esta especie presenta una alta eficiencia de bioacumulación ( $\geq 70$  %), principalmente en sus estructuras sumergidas con valores máximos de Cr 15.76 mg/kg Mn 4324 mg/kg Fe 20268 mg/kg Cu 30.37 mg/kg Zn 172 mg/kg y Pb 7.70 mg/kg. Se observaron niveles elevados de Fe, Zn, Cu y Mn, y menores concentraciones de Cr y Pb (Zarazúa et al., 2013), lo que la posiciona como un bioindicador adecuado para monitorear la presencia de metales pesados en ambientes acuáticos. En este estudio después del lavado de las especies se secaron por liofilización y fueron molidas hasta obtener un polvo homogéneo. El proceso de digestión fue con microondas y analizada mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

### Conclusiones

El biomonitoreo con plantas acuáticas, en particular con macrófitas, se confirma como una herramienta eficaz y asequible para evaluar la contaminación por metales pesados en ecosistemas acuáticos. Debido a su capacidad para acumular sustancias contaminantes, entre ellas los metales pesados, les permite a estas especies evaluar la biodisponibilidad y posibles efectos ecológicos a largo plazo.

Los casos de estudio analizados demuestran que las macrófitas, en sus diferentes especies, tienen la capacidad para acumular metales pesados y detectar la contaminación por metales traza en ambientes acuáticos en diferentes contextos geográficos, tales como lagos con descargas industriales en China, los ríos rurales en Europa y los programas de calidad del agua en América Latina. Su importancia radica en la capacidad para proporcionar datos valiosos sobre la calidad del agua de manera accesible y económica, protegiendo la biodiversidad y la salud humana.

El biomonitoreo con macrófitas ofrece una herramienta para la protección y gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos. Con el avance científico y la creciente conciencia ambiental, su aplicación futura se encamina como un componente clave en la conservación de la biodiversidad y la salud humana.

### Referencias

- Ali, S., Abbas, Z., Rizwan, M., Zaheer, I., Yavaş, İ., Ünay, A., Abdel-DAIM, M., Bin-Jumah, M., Hasanuzzaman, M., & Kalderis, D. (2020). Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: A review. *Sustainability*, 12(5), 1927. <https://doi.org/10.3390/su12051927>.
- Bai, L., Liu, X.-L., Hu, J., Li, J., Wang, Z.-L., Han, G., Li, S.-L., & Liu, C.-Q. (2018). Heavy metal accumulation in common aquatic plants in rivers and lakes in the taihu basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(12), 2857. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122857>.
- Bellino, A., Alfani, A., De Riso, L., Gregorio, R., Pellegrino, T., & Baldantoni, D. (2020). Long-established and new active biomonitors jointly reveal potentially toxic element gradients across spatial scales in freshwater ecosystems. *Ecological Indicators*, 118, 106742. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106742>.
- Ceschin, S., Bellini, A., & Scalici, M. (2021). Aquatic plants and ecotoxicological assessment in freshwater ecosystems: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(5), 4975-4988. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11496-3>.
- Ferri, E. N. (2023). *Advancements in biomonitoring and remediation treatments of pollutants in aquatic environments*, 2nd edition. *Applied Sciences*, 13(17), 9737. <https://doi.org/10.3390/app13179737>.
- Ortiz-Oliveros, H. B., Mendoza-Guzmán, M. M., Zarazúa-Ortega, G., Lara-Almazán, N., Mestizo-Gutiérrez, S. L., & González-Ruiz, A. (2024). Evaluation of succulent plants *Echeveria elegans* as a biomonitor of heavy metals and radionuclides. *Environmental Research*, 251, 118611. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118611>.
- Petrov, D. S., Korotaeva, A. E., Pashkevich, M. A., & Chukaeva, M. A. (2023). Assessment of heavy metal accumulation potential of aquatic plants for bioindication and bioremediation of aquatic environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 122.

- Polechońska, L., Szczeńniak, E., & Klink, A. (2022). Comparative analysis of trace and macro-element bioaccumulation in four free-floating macrophytes in area contaminated by copper smelter. *International Journal of Phytoremediation*, 24(3), 324-333. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1937932>.
- Polechońska, L., & Klink, A. (2023). Macrophytes as passive bioindicators of trace element pollution in the aquatic environment. *WIREs Water*, 10(2), e1630. <https://doi.org/10.1002/wat2.1630>.
- Tanwir, K., Amna, Javed, M. T., Shahid, M., Akram, M. S., Haider, M. Z., Chaudhary, H. J., Ali, Q., & Lindberg, S. (2020). Ecophysiology and stress responses of aquatic macrophytes under metal/metalloid toxicity. En M. Hasanuzzaman (Ed.), *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives I* (pp. 485-511). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2156-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2156-0_16).
- Walteros, J. (2023). Una revisión sobre el biomonitoreo acuático participativo en América Latina y el Caribe. *Acta Biológica Colombiana*, 28(2), 178-188.
- Zarazúa, G., Ávila-Pérez, P., Tejada, S., Valdivia-Barrientos, M., Zepeda-Gómez, C., & Macedo-Miranda, G. (2013). Evaluación de los metales pesados Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb en sombrerillo de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) del curso alto del río Lerma, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29, 17-24.
- Zhou, Q., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., & Jiang, G. (2008). Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*, 606(2), 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.11.018>.