

Humedales artificiales: soluciones verdes para tratar aguas grises en zonas rurales

Daniel Alejandro García López^{1*}

¹ Tecnológico Nacional de México / ITS de Libres

* Dirección para correspondencia: daniel.gl@libres.tecnm.mx

México enfrenta una de las crisis hídricas más graves de América Latina. Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020), más del 70 % de los cuerpos de agua superficiales del país presentan algún grado de contaminación. A esto se suma la sobreexplotación de acuíferos para la agricultura y actividades industriales, sin descartar la irregularidad en el acceso al agua potable, especialmente en zonas rurales y, cada vez con más frecuencia, en grandes urbes. Al mismo tiempo, la cobertura de tratamiento de aguas residuales en México apenas alcanza el 63.3 %, lo que significa que millones de metros cúbicos de aguas negras y grises se vierten sin tratamiento al ambiente cada año (CONAGUA, 2020).

Las aguas grises, que provienen de duchas, lavabos y lavadoras, representan hasta el 75 % del volumen total de aguas residuales domésticas. Este tipo de aguas, aunque no presentan materia fecal como las aguas negras, contienen materia orgánica e inorgánica en forma de jabón y restos de lavados. Desafortunadamente, las aguas grises reciben menor atención que las aguas negras, principalmente en zonas rurales con limitada infraestructura sanitaria. En muchas ocasiones este tipo de aguas no están conectadas a un sistema de tratamiento, por lo que terminan en cuerpos de agua donde se convierten en

alimento para formas de vida microscópicas y ocasionan la eutrofización y muerte del ecosistema.

Uno de los retos impuestos por la Agenda 2030 en el objetivo de desarrollo sostenible (ODS) 6, es “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”. Sin embargo, parece que nos encontramos lejos de alcanzar las metas impuestas en materia de agua, principalmente en zonas rurales donde la contaminación del agua requiere respuestas adaptadas a las condiciones regionales y el limitado acceso a servicios. En este contexto, los humedales artificiales emergen como una alternativa viable, ecológica y de bajo costo para tratar aguas residuales en comunidades donde los sistemas de saneamiento son insuficientes o inexistentes.

Humedales artificiales

Los humedales naturales son sistemas altamente productivos. Generalmente se localizan en zonas inundadas y con elevada humedad, donde la actividad de plantas y microorganismos es intensa, acelerando las reacciones químicas. Por esta razón, se les ha llamado "los riñones de los ecosistemas" debido a los múltiples servicios que brindan para mantener la salud ambiental.

Inspirados en estos sistemas, los humedales artificiales buscan replicar sus funciones mediante la selección de especies vegetales adaptadas dentro de un diseño ecológico que emula un humedal natural. Se utilizan principalmente para el

tratamiento de aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales a través de la acción conjunta de plantas acuáticas (macrófitas), microorganismos y un medio filtrante, como grava o arena.

Un humedal artificial se diseña a partir de un estanque poco profundo, impermeabilizado para evitar filtraciones, que se llena con grava como medio filtrante y sustrato para el crecimiento de plantas. Finalmente, se acondicionan tuberías de PVC para la entrada y salida del agua a tratar. Estos sistemas pueden sembrarse con diversas especies vegetales, entre las que destacan el tule, carrizo, papiro, alcatraz o ave del paraíso. Estas plantas son recomendables por su rápido crecimiento, eficiencia en la remoción de contaminantes, adaptabilidad al clima y porque no son especies comestibles.

Funcionamiento de los humedales artificiales

Estos sistemas operan mediante distintos mecanismos (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019), que pueden clasificarse como físicos (filtración, sedimentación), químicos (precipitación, adsorción) y biológicos (biodegradación, fitodepuración). Gracias a esta combinación, logran una alta eficiencia en la eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, metales pesados y contaminantes emergentes como fármacos y microplásticos.

La actividad biológica dentro de un humedal artificial se basa en la asociación benéfica entre plantas y microorganismos, que trabajan conjuntamente en la

descontaminación del agua (Nava-Rojas *et al.*, 2023). Las raíces de estas plantas son el hábitat de una gran cantidad de microorganismos que participan activamente en la degradación de compuestos químicos que van desde formas de nitrógeno y fósforo, hasta estructuras más complejas como productos químicos sintéticos. El éxito de un humedal artificial depende fuertemente de que se establezca una comunidad bacteriana activa y eficiente, capaz de degradar contaminantes. En este sistema, el agua fluye a través de un filtro biológico donde las raíces retienen compuestos que son degradados por microorganismos. La acción de los microorganismos descompone compuestos complejos en formas más sencillas que pueden ser absorbidas por las plantas a cambio del oxígeno producido durante la fotosíntesis. Así se establece una simbiosis orientada a la eliminación de materia orgánica. Los contaminantes presentes en el agua son transformados en gases y minerales aprovechables por los organismos del sistema (Figura 1).

Numerosos estudios han demostrado la eficacia de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises, confirmando su capacidad para remover diversos tipos de contaminantes (Tabla 1). Aunque la eficiencia de los humedales ha sido comprobada en numerosos estudios, en la práctica es necesario validar la calidad del agua que sale de un humedal artificial para garantizar su eficacia en la depuración de los contaminantes presentes en el agua residual.

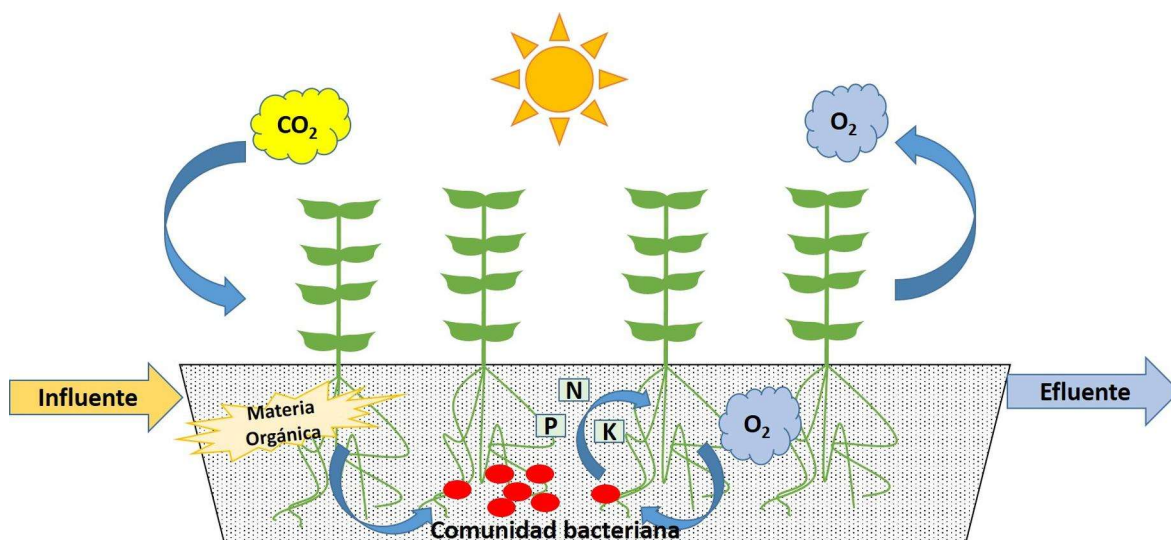


Figura 1. Funcionamiento de un humedal artificial. El influente rico en materia orgánica es aprovechado como fuente de alimento por una comunidad bacteriana, la cual convierte los compuestos orgánicos en compuestos más simples. Los microorganismos intercambian estos compuestos con las raíces, que los aprovechan como nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.) a cambio de oxígeno que proviene de la fotosíntesis. Como resultado, el efluente sale con una menor carga de compuestos orgánicos.

Contaminante	Rango de remoción (%)	Planta utilizada	Referencia
BOD (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	65 – 95	<i>Typha domingensis</i>	Hernández Vásquez et al., 2022.
COD (Demanda Química de Oxígeno)	46.7 – 97.8	<i>Phragmites australis</i>	Hernández Vásquez et al., 2022.
Nitrógeno	57 – 99	<i>Typha latifolia</i>	Tadesse et al., 2015.
Fosfatos	74 – 93	<i>Pistia stratiotes</i>	Olguín et al., 2017.
Fármacos (ibuprofeno)	97	<i>Eichhornia crassipes</i>	Hernández Vásquez et al., 2022.
Metales pesados (Zn, Cd, Pb)	60 – 95	<i>Hydrilla verticillata</i>	Gill et al., 2017, citado en Hernández Vásquez et al., 2022.

Tabla 1. Eficiencia de remoción de contaminantes en humedales artificiales.

Oportunidades y desafíos en la construcción de humedales artificiales

La tecnología de humedales artificiales representa una opción sustentable y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en infraestructuras de pequeña y mediana escala. Por ello, son adaptables a comunidades rurales, zonas agrícolas e incluso a espacios como hoteles o escuelas. Su atractivo radica en que no requieren fuentes adicionales de energía más allá de la solar, son fáciles de operar, se integran armónicamente al paisaje, pueden generar hábitats para aves e insectos, ofrecen buenos índices de remoción de contaminantes como nutrientes, materia orgánica y contaminantes emergentes; además, pueden alcanzar una vida útil de hasta 25 años (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019).

Sin embargo, también enfrentan desafíos importantes. Requieren mayor espacio para tratar grandes volúmenes de agua, y su eficiencia puede verse limitada en climas fríos donde el crecimiento vegetal es lento. Aunado a ello, existe una regulación limitada sobre este tipo de sistemas, lo que dificulta su aceptación como alternativas o complementos a las plantas de tratamiento convencionales.

En la actualidad, la tecnología de humedales artificiales se ha desarrollado ampliamente para el tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos, Canadá, China y Europa, países que han logrado validar la tecnología y adaptarla a entornos urbanos y rurales. Desafortunadamente, en nuestro país, a pesar de que gozamos de condiciones climáticas favorables para el desarrollo de esta tecnología, su uso

se encuentra limitado y se tiene un gran desconocimiento del tema por parte de actores gubernamentales y tomadores de decisiones.

La adopción de esta tecnología se ha visto opacada por el desconocimiento del tema a nivel nacional, regional y municipal, donde se opta por opciones convencionales, como las plantas de tratamiento de aguas residuales, a pesar de que no existe la capacidad económica ni técnica para garantizar su desarrollo y mantenimiento en pequeñas comunidades rurales (Palma-Cabrera *et al.*, 2022). De igual forma, las comunidades rurales cuentan con recursos limitados, por lo que servicios como el tratamiento de aguas residuales pasan a segundo plano; a esto hay que sumar la carencia en gobiernos municipales rurales de instituciones ambientales capacitadas (Palma-Cabrera *et al.*, 2022).

En México, gran parte del esfuerzo para la adopción de humedales artificiales proviene de la academia. Instituciones como el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Instituto de Ecología; A.C. (INECOL), o grandes universidades del país, han desarrollado humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales (Figura 2). También existen casos de éxito en comunidades rurales como San José Pastorías, en Actopan, Veracruz, donde se han instalado humedales artificiales que permiten el tratamiento de aguas con la integración y el apoyo de la comunidad (Marín-Muñoz *et al.*, 2024).

Desafortunadamente, a pesar de ser una tecnología efectiva y comprobada por varios grupos de investigación, la aplicación de humedales artificiales aún se encuentra limitada para resolver el problema de contaminación del agua en

comunidades rurales. Es necesario el conocimiento y la adopción de esta tecnología por parte de las autoridades y la población en general para incorporar herramientas tecnológicas que coadyuven a la solución de esta problemática.



Figura 2. Ejemplos de humedales artificiales en operación, A) humedal a base de plantas de papiro (*Cyperus papyrus*) y pontederia (*Pontederia L.*) para tratar agua del “paseo los lagos” en la ciudad de Xalapa, B) humedal a base de planta lechuguilla acuática (*Pistia stratiotes*) para tratar agua del río sordo en el Instituto de Ecología, AC, ciudad de Xalapa, C) humedal a base de plantas de alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) para tratar agua doméstica en el Instituto Tecnológico Superior de Libres, en ciudad de Libres, Puebla.

Conclusión

Los humedales artificiales son una alternativa al tratamiento de aguas grises que pueden ayudar a lograr los objetivos de la agenda 2030 en materia de agua, especialmente en zonas rurales y con limitado acceso a recursos e infraestructura sanitaria. Existe abundante información disponible sobre el tema, pero desafortunadamente dicha información parece estar concentrada en ámbitos académicos. Es necesario popularizar y divulgar las ventajas de esta tecnología

porque, como se ha visto, la mayor limitante que enfrenta es su limitada visibilidad por actores con capacidad de decisión en ámbitos de gobierno.

Su funcionamiento, basado en procesos físicos, químicos y biológicos mediados por plantas y microorganismos, permite la remoción eficaz de diversos contaminantes. Al ser sistemas vivientes, se integran al paisaje natural y requieren una inversión limitada y poca energía para operar. Frente a los retos que impone el cuidado del agua, los humedales artificiales destacan como soluciones verdes para el tratamiento de aguas grises en zonas rurales.

Referencias

Arteaga-Cortez VM, Quevedo-Nolasco A, del Valle Paniagua DH *et al.* (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua* 10(5): 319-343. DOI: <https://doi.org/10.24850/tyca-2019-05-12>.

CONAGUA (2020). Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua>.

Gill LW, Ring P, Casey B *et al.*, (2017). Long term heavy metal removal by a constructed wetland treating rainfall runoff from a motorway. *Science of The Total Environment* 601–602: 32-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.182>.

Hernández Vásquez LA, Prieto García F, Prieto Méndez J *et al.*, (2022). Artificial wetlands and floating islands: Use of macrophytes. *South Florida Journal of Development* 3(1): 1-36. DOI: <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n1-036>.

Marín-Muñiz JL, Zitácuaro-Contreras I, Ortega-Pineda G *et al.*, (2024). Phytoremediation Performance with Ornamental Plants in Monocultures and Polycultures Conditions Using Constructed Wetlands Technology. *Plants* 13(7): 1051. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13071051>.

Nava-Rojas J, Lango-Reynoso F y Castañeda-Chávez MR (2023). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *Terra Latinoamericana* 41:e1715. DOI <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>.

Olguín EJ, García-López DA, González-Portela RA and Sánchez-Galván G (2017). Year round phytofiltration lagoon assessment using *Pistia stratiotes* within a pilot plant scale biorefinery. *Science of the Total Environment* 592:326-333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.067>.

Palma-Cabrera EM, Marín-Muñiz JL y Ruelas-Monjardín LC (2022). Limitantes para la adopción de humedales artificiales. *Emerging Trends in Education* 8(23):170-178. DOI: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9493691>

Tadesse AT and Seyoum LA (2015). Evaluation of selected wetland plants for removal of chromium from tannery wastewater in constructed wetlands, Ethiopia. *African Journal of Environmental Science and Technology* 9(5):420-427. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJEST2014.1793>.