

La tecnología de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales

Florentina Zurita ^{1,*}, Luis Carlos Sandoval Herazo ^{2,3}

¹ Centro de Investigación en Calidad Ambiental. Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara. Ocotlán, Jalisco, México.

² Laboratorio de humedales y sustentabilidad ambiental. División de estudios de posgrado e investigación. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Masantla, Veracruz, México.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad de Sucre, Colombia.

* Autor de correspondencia: florentina.zurita@academicos.udg.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de septiembre de 2024

Aceptado: 22 de octubre de 2024

Publicado: 26 de octubre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.186>

Resumen: En México y otros países de América Latina, la mayor parte de las aguas residuales tratadas provienen de áreas urbanas, mientras que las zonas rurales y las pequeñas industrias suelen carecer de sistemas adecuados de tratamiento. Los humedales construidos representan una alternativa eficiente y económica frente a otras tecnologías de saneamiento. Este artículo explora aspectos clave de estos sistemas, como su clasificación en convencionales (de flujo superficial y subsuperficial) e intensificados (que incorporan aireación para acelerar la remoción de contaminantes). También se examinan sus principales componentes: vegetación, medio filtrante y microorganismos, los cuales son esenciales para la eficacia del tratamiento. Además, se describen los distintos tipos de aguas residuales que se pueden tratar mediante humedales construidos, desde aguas residuales domésticas hasta efluentes industriales con altos niveles de contaminantes, como los de la industria tequilera. La investigación sigue avanzando en la optimización de estos sistemas, enfocándose en la selección de especies vegetales y medios filtrantes apropiados que permitan el desarrollo de comunidades microbianas. Esto busca incrementar la eficacia del tratamiento y ampliar su aplicación a diversos tipos de aguas residuales como etapa principal de tratamiento.

Palabras clave: Humedales de tratamiento; aguas residuales domésticas; aguas residuales industriales, vegetación, medio filtrante.

Introducción

Para proteger los ecosistemas acuáticos que funcionan como cuerpos receptores de aguas residuales, éstas se deben someter a un tratamiento antes de ser descargadas o reutilizadas. Lamentablemente, en México, similar a otros países de América Latina, esto se cumple sólo en forma parcial. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023), en el año 2022 existían 2 774 plantas en operación para el tratamiento de aguas residuales municipales, las cuales trataron 143.8 m³/s, es decir el 66.7% del caudal colectado en los sistemas de alcantarillado. Es importante enfatizar que la mayor parte de las aguas residuales que se tratan son las que se generan en las zonas urbanas, mientras que en las zonas rurales el nivel de tratamiento es mínimo. Respecto a las aguas industriales, el caudal que se trató en el año 2022 fue de 58.11 m³/s en 3 909 plantas de tratamiento (CONAGUA, 2023). En general, las industrias grandes y medianas son las que tratan las aguas residuales que generan, mientras que las pequeñas y microindustrias tienen mayor probabilidad de descargar sus aguas residuales sin tratamiento. De acuerdo con Zurita *et al* (2022), esta situación es la que prevalece en la industria tequilera en el estado de Jalisco.

El nivel de contaminación de las aguas residuales se determina dependiendo de la concentración y tipo de contaminantes que contiene. El contenido de materia orgánica que se mide como demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) o demanda química de oxígeno (DQO), representa contaminantes que al degradarse agotan el nivel de oxígeno en los cuerpos acuáticos receptores. Otro grupo de contaminantes son los sólidos en suspensión (SST) que interfieren con la penetración de la luz en los cuerpos de agua. Un grupo más de contaminantes son los nutrientes, principalmente el nitrógeno y fósforo; responsables de la presencia de algas y malezas acuáticas en los cuerpos de agua. El nitrógeno se puede encontrar en forma orgánica (como un componente de la materia orgánica), en forma amoniacial (NH₄⁺), como nitrato (NO₃⁻) o nitrito (NO₂⁻). Las aguas residuales municipales también pueden contener una diversidad de compuestos farmacéuticos como antibióticos, analgésicos, etc. Por otra parte, algunos tipos de aguas residuales industriales pueden contener metales pesados en altas concentraciones, grasas y aceites, solventes, entre otros.

Existen diferentes tecnologías o formas de limpiar las aguas residuales, y una de ellas son los humedales construidos. Los humedales construidos son conocidos porque en general, pueden requerir menores costos de construcción en comparación con las tecnologías altamente mecanizadas; pero, sobre todo, de operación. En este documento se

hablará de esta tecnología para el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales y las tendencias actuales sobre su utilización.

Desarrollo

Tipos de humedales

La tecnología de los humedales para el tratamiento de aguas residuales ha avanzado tanto en las últimas décadas que actualmente podemos clasificarlos en humedales convencionales y humedales intensificados. Respecto a los primeros, la principal clasificación es con respecto a la hidrología de los sistemas: pueden ser de flujo superficial o de flujo subsuperficial (horizontal o vertical). Para su construcción se realizan excavaciones en el terreno que generalmente se impermeabilizan. En estas excavaciones se coloca un medio filtrante (grava, arena, tezontle, etc.) con características muy específicas (granulometría, porosidad, etc.) que sirve de soporte a la vegetación, que es el elemento más distintivo de un sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales construidos. El tipo de humedal más utilizado a nivel global es el subsuperficial de flujo horizontal como etapa secundaria o terciaria de tratamiento. Respecto a los humedales construidos intensificados, los de mayor uso son los aireados, ya sean subsuperficiales verticales u horizontales. El objetivo de la aireación es incrementar la velocidad de remoción de contaminantes para reducir el espacio de terreno que se requiere para la construcción de los sistemas.

Componentes de los humedales

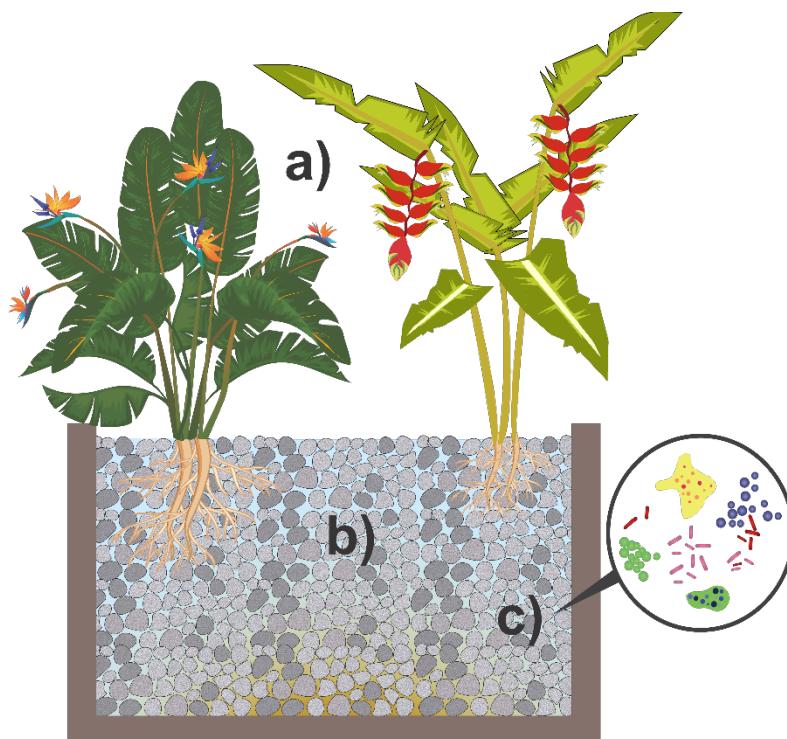


Figura 1. Principales componentes de un Humedal Construido: (a) vegetación, (b) medio filtrante y (c) microrganismos

Los componentes de los humedales determinantes en su eficiencia para el tratamiento de las aguas residuales son: la vegetación, el medio filtrante y los microrganismos, tal como se puede apreciar en la Figura 1. En general, la vegetación es el elemento más distintivo de los humedales y el más importante, aunque dependiendo del tipo de humedal su importancia puede ser mayor. Las especies más utilizadas son de los géneros *Phragmites*, *Typha* y *Scirpus*; sin embargo, se han evaluado con éxito, sobre todo en México, un amplio número de especies ornamentales como *Zantedeschia aethiopica*, *Strelitzia reginae*, *Heliconia latispatha*, etc. En los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, las plantas permiten la existencia de una zona de raíces donde hay oxígeno (rizósfera oxidada) gracias a su capacidad para introducir el oxígeno del aire adentro del sistema; en esta zona se desarrolla una diversidad de microbios que participan en la transformación y remoción de diferentes contaminantes presentes en las aguas residuales. Además, las plantas

participan en la remoción de contaminantes mediante su captación directa, por ejemplo, minerales (nitrógeno, fósforo, metales pesados) y compuestos farmacéuticos entre otros. La diversidad de comunidades microbianas, determinantes en la eficiencia de los sistemas de humedales, dependen en buena parte de la presencia de la vegetación. Cada especie desarrolla un sistema de raíces muy específico, que determina la amplitud de la zona en donde hay oxígeno. Respecto al medio filtrante, su función primaria es sostener la vegetación y se debe seleccionar de manera tal que sus características permitan un crecimiento óptimo de las raíces. El medio filtrante también debe facilitar el desarrollo de los microbios en forma de una película adherida; un medio poroso como el tezontle es más apropiado que la grava para esta función.

Diferentes tipos de aguas residuales

Mientras que, en las aguas residuales domésticas (las que se generan en las casas), la concentración de contaminantes en general es relativamente baja, en las aguas residuales industriales, la cantidad y diversidad de contaminantes es muy amplia y depende del tipo de actividad industrial (Tabla 1). Entre las aguas residuales más contaminantes se encuentran los efluentes de destilería (que se producen en aquellas industrias que producen etanol), de la industria textil, petroquímica, efluentes de rastros, curtidurías, etc. Debido a la complejidad de las aguas residuales industriales, el costo para su tratamiento generalmente suele ser bastante elevado. Esta es la razón principal que las micro y pequeñas empresas argumentan para no tratar sus efluentes. Sin embargo, existen sistemas de tratamiento alternativos como los humedales construidos que tienen costos de operación, construcción y mantenimiento, comparativamente menores.

Tabla 1. Comparación de algunas características de aguas residuales domésticas con algunas aguas residuales industriales.

Parámetro	Doméstica	Industria tequilera	Industria Textil	Efluente porcícola	Industria de la pulpa y papel*
DQO (mg/L)	250-1000	45,381 ± 17,369	1428 ± 84	54,500.0	399–2,035
DBO ₅ (mg/L)	110-400	23,254 ± 7924	419 ± 32	13,187.5	110–582
SST (mg/L)	100-350	7127 ± 7294		NR	620–1,120
Color aparente (Unidades de Pt-Co)	Gris parduzco claro	Café rojizo	2545 ± 21 El principal constituyente	NR	959–5,830
Nitrógeno total (mg/L)	20-85	254 ± 127	NR	1670.8	NR
Fósforo total (mg/L)	4-15			415.7	0.5–1.8
pH	Alrededor de 7	3.6 ± 0.2	5.5–9.0	5.9	4.7–10.0
Conductividad (μS/cm)	Variable (alrededor de 1000)	3044 ± 1007	NR	7200	NR
Referencia		(Zurita <i>et al.</i> 2022)	(Ariza-Pineda <i>et al.</i> 2023, Kumar and Saravanan 2017)	(Moretti <i>et al.</i> 2021)	(Kumar and Choudhary 2018)

Experiencias en el uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales domésticas/municipales

Desde sus orígenes como tecnología de tratamiento de aguas residuales, los humedales construidos se han utilizado principalmente para el saneamiento de aguas residuales domésticas o municipales, bajo diferentes condiciones climáticas. Esto, debido a la baja concentración de contaminantes en este tipo de agua residual. En sistemas a escala real, generalmente se aplica una etapa de pretratamiento en la que, mediante rejillas y desarenadores, se remueven las basuras gruesas y arena, respectivamente. Posteriormente, hay una etapa de tratamiento primario en la que el agua residual se somete a una etapa de sedimentación. De esta manera, el sistema de humedal se implementa como una etapa de tratamiento secundario. Las eficiencias de remoción de contaminantes que se alcanzan en los humedales, son similares a las eficiencias en los sistemas biológicos convencionales como el sistema de lodos activados

Experiencias en el uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales agroindustriales/industriales

Los humedales construidos se han evaluado e implementado para el tratamiento de aguas residuales industriales de origen textil, petroquímica, industria del petróleo, del papel, del vino, porcícola, curtidurías, etc. principalmente como tratamiento final de depuración. Generalmente las aguas residuales industriales reciben un tratamiento primario para la remoción de sólidos en suspensión, grasas y aceites y se neutralizan o un tratamiento primario fisicoquímico para la reducción de color o metales pesados, si se requiere. Posteriormente puede seguir una etapa de tratamiento biológico anaerobio para reducir la carga orgánica y posteriormente una etapa de tratamiento biológico aerobio o en su lugar, un sistema de humedales de tratamiento. Por lo que en general, cuando las aguas residuales industriales ingresan a los humedales de tratamiento, la concentración de contaminantes suele ser ya baja. Sin embargo, debido a la naturaleza de los contaminantes (recalcitrante, tóxicos, etc.) presentes en las aguas residuales industriales, la vegetación a emplear debe evaluarse previamente para determinar si es capaz de resistir un efluente industrial específico. De acuerdo con algunos estudios realizados en México, se encontró que la especie ornamental *Iris sibirica* es capaz de tolerar y crecer al ser expuesta a vinazas tequileras (Tejeda *et al.* 2022). Además, utilizando esta especie en humedales subsuperficiales de flujo horizontal y humedales verticales de flujo ascendente (Montoya *et al.* 2023) demostraron que es posible tratar vinazas tequileras mezcladas con agua residual doméstica, con una concentración promedio de DQO de 14 055 mg/L y DBO₅ de 10 619 mg/L mediante y lograr porcentajes de remoción de 95 y 98%, respectivamente; esto utilizando estos sistemas como tratamiento secundario después de una etapa neutralización y sedimentación. Este estudio demuestra la capacidad de los humedales de tratamiento para tratar aguas residuales industriales no sólo como etapa de depuración, sino como la etapa principal.

Tendencias en el uso de los humedales construidos

Los humedales construidos son una tecnología bastante probada para la remoción de los diferentes contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas. Sin embargo, aún se realiza mucha investigación y se requiere optimizar los sistemas para la remoción de contaminantes específicos como el nitrógeno y los contaminantes emergentes. Para el nitrógeno, se han probado modificaciones, como los humedales verticales parcialmente saturados. Además, en climas tropicales y subtropicales de los países en vías de desarrollo, se está trabajando en la búsqueda nuevas especies vegetales que puedan tener un valor agregado, así como de medios filtrantes innovadores que permitan la reducción de costos. En general, se puede afirmar que la tendencia en el uso de estos sistemas es demostrar que es posible utilizarlos para cualquier tipo de agua residual con las modificaciones necesarias, como una etapa principal de tratamiento. Por otra parte, ante los problemas de escasez del agua en muchas regiones del mundo, los humedales construidos representan una opción de bajo costo que se puede implementar en el sitio de generación para la producción de aguas residuales reutilizables.

Conclusiones

Alrededor del mundo, se ha demostrado que los humedales construidos son altamente efectivos para el tratamiento de aguas residuales domésticas y para una diversidad de aguas residuales industriales. Actualmente, se siguen realizando investigaciones para ampliar su marco de aplicación a cualquier tipo de agua residual, no sólo como un tratamiento final sino como una etapa principal en un tren de tratamiento. Para que la implementación sea exitosa, se debe seleccionar la vegetación porque ésta debe resistir la naturaleza recalcitrante o tóxica de los contaminantes en las aguas residuales. De igual manera, se debe utilizar un medio filtrante apropiado para el desarrollo de las comunidades microbianas.

Bibliografía

- Ariza-Pineda, F.J., Macías-Quiroga, I.F., Hinojosa-Zambrano, D.F., Rivera-Giraldo, J.D., Ocampo-Serna, D.M. and Sanabria-González, N.R. (2023) Treatment of textile wastewater using the Co(II)/NaHCO₃/H₂O₂ oxidation system. *Helion* 9(12), e22444, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22444>.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 2024. Estadísticas del agua en México 2023. México. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html.
- Kumar, P.S. and Saravanan, A. (2017) Sustainable fibres and textiles. 323-346, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102041-8.00011-1>.
- Kumar, S. and Choudhary, A.K.J.C.W.F.I.W.T. (2018) Constructed wetland technology for pulp and paper mill wastewater treatment. 309-325, <https://doi.org/10.1002/9781119268376.ch15>.

- Montoya, A., Tejeda, A., Sulbarán-Rangel, B. and Zurita, F. (2023) Treatment of tequila vinasse mixed with domestic wastewater in two types of constructed wetlands. *Water Science and Technology*, <https://doi.org/10.2166/wst.2023.189>.
- Moretti, S.M.L., Bertoncini, E.I., Abreu-Junior, C.H.J.J.o.M.C. and Management, W. (2021) Characterization of raw swine waste and effluents treated anaerobically: parameters for *Brazilian environmental regulation construction aiming agricultural use.* 23, 165-176, <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01115-1>.
- Tejeda, A., Valencia-Botín, A.J. and Zurita, F. (2022) Resistance evaluation of Canna indica, Cyperus papyrus, Iris sibirica, and Typha latifolia to phytotoxic characteristics of diluted tequila vinasses in wetland microcosms. *International Journal of Phytoremediation*, 1-10, <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2145266>.
- Zurita, F., Tejeda, A., Montoya, A., Carrillo, I., Sulbarán-Rangel, B. and Carreón-Álvarez, A.J.W. (2022) Generation of tequila vinasses, characterization, current disposal practices and study cases of disposal methods. *Water.* 14(9), 1395, <https://doi.org/10.3390/w14091395>.