

Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión

Yvelisse Antonia Pérez^{1,2} , Daniel Garcia-Cortes³ , Ulises Javier Jauregui-Haza^{1,*}

(1) Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), Área de Ciencias Básicas y Ambientales, Avenida de Los Próceros # 49, Los Jardines del Norte 10602, Santo Domingo, República Dominicana.

(2) Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Cayetano Germosén esquina Avenida Luperón, El Pedregal, Santo Domingo, República Dominicana.

(3) Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, Ave. Salvador Allende, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba.

* Autor de correspondencia: Ulises Javier Jauregui-Haza [ulises.jauregui@intec.edu.do]

> Recibido el 25 de julio de 2021 - Aceptado el 23 de marzo de 2022

Como citar: Pérez, Y.A., García Cortés, D.A., Jauregui Haza, U.J. 2022. Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas* 31(1): 2279. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2279>

Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión

Resumen: El tratamiento de las aguas residuales urbanas es un problema no resuelto. Las nuevas tecnologías, como los humedales construidos (HC), ayudan a conservar y proteger los cuerpos de aguas. En esta revisión se analizan los estudios publicados durante los últimos 10 años sobre los HCs como alternativa de tratamiento de las aguas residuales en zonas urbanas. La búsqueda sobre HCs se realizó para el período 2010-2020 en las bases de datos Scopus y Web of Science. Es de esperar un continuo aumento de la introducción de estos sistemas en los ambientes urbanos, por ser soluciones basadas en la naturaleza; de bajo costo; fáciles de diseñar, construir y explotar; que brindan servicios ecosistémicos y que son amigables con el medio ambiente y el entorno. Las áreas que requieren de investigaciones priorizadas para el desarrollo eficiente de los HCs son (1) la búsqueda de nuevas especies de plantas propias de cada zona climática; (2) el fortalecimiento de la sostenibilidad y la potenciación de diferentes servicios ecosistémicos; (3) la continuación del proceso de innovación de los diferentes diseños para aumentar la confiabilidad y el desempeño de estos sistemas; y (4) la integración con otros sistemas de tratamiento para aumentar las posibilidades de reuso del agua.

Palabras clave: ciclo de vida; fitorremediación; República Dominicana; riesgo; servicios ecosistémicos; sostenibilidad

Constructed wetlands as an alternative for the treatment of waste waters in urban areas: a review

Abstract: Constructed wetlands as an alternative to wastewater treatment in urban areas: a review. Urban wastewater treatment is an unsolved problem. New technologies, such as constructed wetlands (CW), help conserve and protect bodies of water. In this review, the studies published during the last ten years on CWs were analyzed as an alternative for wastewater treatment in urban areas. The literature search on CWs was carried out in the Scopus and Web of Science databases for the period of 2010-2020. A continuous increase in the introduction of these systems in urban environments is to be expected, as they are nature-based solutions; low cost, easy to design, build and operate; that provides ecosystem services, and that are friendly to the environment. The main areas of research for the efficient development of CWs are (1) the search for new plant species typical of each climatic zone; (2) the strengthening of sustainability and the improvement of different ecosystem services; (3) to continue the process of innovation of the different CW designs with the objective of increasing the reliability and performance of these systems; and (4) the integration with other treatment systems to increase the possibilities of water reuse.

Keywords: Dominican Republic; risk; ecosystem services; lifecycle; phytoremediation; sustainability

Introducción

En la actualidad el mundo enfrenta un dilema ambiental debido al rápido crecimiento de la población y la urbanización, ejerciendo presión sobre los recursos naturales. Esto demanda apreciar el valor de los ecosistemas, sus funciones y servicios de agua, energía, producción de alimentos, salud y bienestar (Magwaza et al. 2020). El mayor punto de concentración poblacional son las ciudades, ecosistemas donde se integran el hombre y la sociedad (Magwaza et al. 2020). La necesidad de afrontar la gestión del tratamiento de las aguas residuales desde una perspectiva diferente a la convencional, combinando aspectos hidrológicos, me-

dioambientales y sociales, provoca un aumento del uso de humedales construidos (HCs) como alternativa innovadora, eficiente y sostenible de tratar las aguas residuales (Magwaza et al. 2020).

Los HCs son ecosistemas diseñados para manipular los procesos biológicos dentro de un entorno natural semicontrolado (Choi et al. 2018). Son beneficiosos por tener actividades de operación y mantenimiento simples, ser rentables y energéticamente eficientes, proporcionando un hábitat de vida silvestre en áreas urbanas, y un valor estético dentro del entorno local (Choi et al. 2018). Inicialmente, los HCs se usaban para el tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales. En la actualidad su aplicación se extiende para purificar efluentes agrícolas, industriales, drenaje de

minas, lixiviados de vertederos, aguas contaminadas de ríos y lagos, de zonas urbanas y escorrentías de carreteras (Stefanakis 2018). Existen más de 50000 HCs en Europa y más de 10000 en América del Norte (Volkan et al. 2020). Desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos, se encuentran entre los ecosistemas más valiosos por unidad de área en la tierra (Snyder 2019).

Este trabajo presenta un análisis de los estudios publicados durante los últimos 10 años sobre los HCs como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas, teniendo en cuenta que no se ha publicado recientemente un artículo de revisión que presente de manera integrada los aspectos relacionados en este trabajo y las perspectivas en investigaciones y desarrollo de HCs. Responde, por tanto, al interés de focalizar un modelo de HC que permita una gestión sostenible de las aguas residuales domésticas en ambientes urbanos, generando el menor impacto ambiental posible.

Materiales y métodos

La búsqueda sobre HCs se realizó entre 2010-2020 en las bases de datos Scopus y Web of Science. Se emplearon las palabras claves: humedales construidos, humedales artificiales, zona urbana, fitorremediación, ciclo de vida, riesgo y tratamiento de aguas residuales, tanto en español como en inglés.

Resultados y discusión

Se encontraron 6107 artículos en Scopus y 8138 en Web of Science. La Figura 1 muestra la distribución de artículos publicados sobre el tema por año. Se puede observar que, según cada base de datos, entre los años 2011 y 2014 la cantidad de artículos publicados se mantuvo prácticamente constante entre 550 y 650. Sin embargo, a partir del 2014 se aprecia un crecimiento exponencial alcanzando cifras de 1238 y 1015 en Web of Science y Scopus, respectivamente, en el año 2020. Esto muestra el creciente interés de la comunidad científica en el estudio de los humedales construidos como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Del total de artículos se incluyen los 77 considerados más relevantes por los autores.

A continuación, se describen y discuten los aspectos principales relacionados con el uso de humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas.

Humedales construidos en zonas urbanas para el tratamiento de aguas residuales

Los HCs tienen el potencial de abordar los desafíos sociales y económicos relacionados con la reutilización segura del agua. Un HC bien diseñado y con un mantenimiento adecuado puede garantizar la reutilización del agua. Los HCs implican procesos biológicos, físicos y químicos, similares a los que ocurren en los humedales naturales. Entre estos se encuentran la filtración, sedimentación, adsorción, volatilización, fitoacumulación y la actividad microbiana (Khan et al. 2020). Estos procesos se utilizan para controlar la contaminación en el medio ambiente mediante el tratamiento de aguas residuales urbanas, industriales, agrícolas, pecuarias o efluentes mineros (Saxena y Bharagava 2020), aguas contaminadas con petróleo (Bergier y Wlodyka-Bergier 2016), de instalaciones turísticas (Pérez-Salazar et al. 2019) y municipales (Ramprasad et al. 2019). Los HCs se utilizan para eliminar la materia orgánica, los sólidos suspendidos, los nutrientes y algunos metales como hierro, plomo y cadmio del agua residual y, recientemente, contaminantes orgánicos persistentes (Vymazal y Březinová 2015), hidrocarburos (Guittonny-Philippe et al. 2015), además de reducir la contaminación microbiológica (Rajan et al. 2019). Los HCs se utilizan también en la eliminación de fármacos y pesticidas (Campos et al. 2019; Nguyen et al. 2019; Ruppelt et al. 2020; Shan et al. 2020). Resulta de especial importancia la eliminación de antibióticos debido a la afectación de la microbiota de los HCs (Nguyen et al. 2019; Shan et al. 2020).

Los HCs se han utilizado como método de tratamiento secundario de las aguas residuales en comunidades pequeñas (Vymazal 2018), de hasta 1000 habitantes, y en áreas mayores de hasta 2000 habitantes (Grinberga 2020). La limitación del uso de los HCs para grandes extensiones urbanizadas está asociada con la demanda de área superficial (Grinberga 2020; Vymazal 2018). Igualmente, se ha trabajado en integrar la tecnología de HCs en el

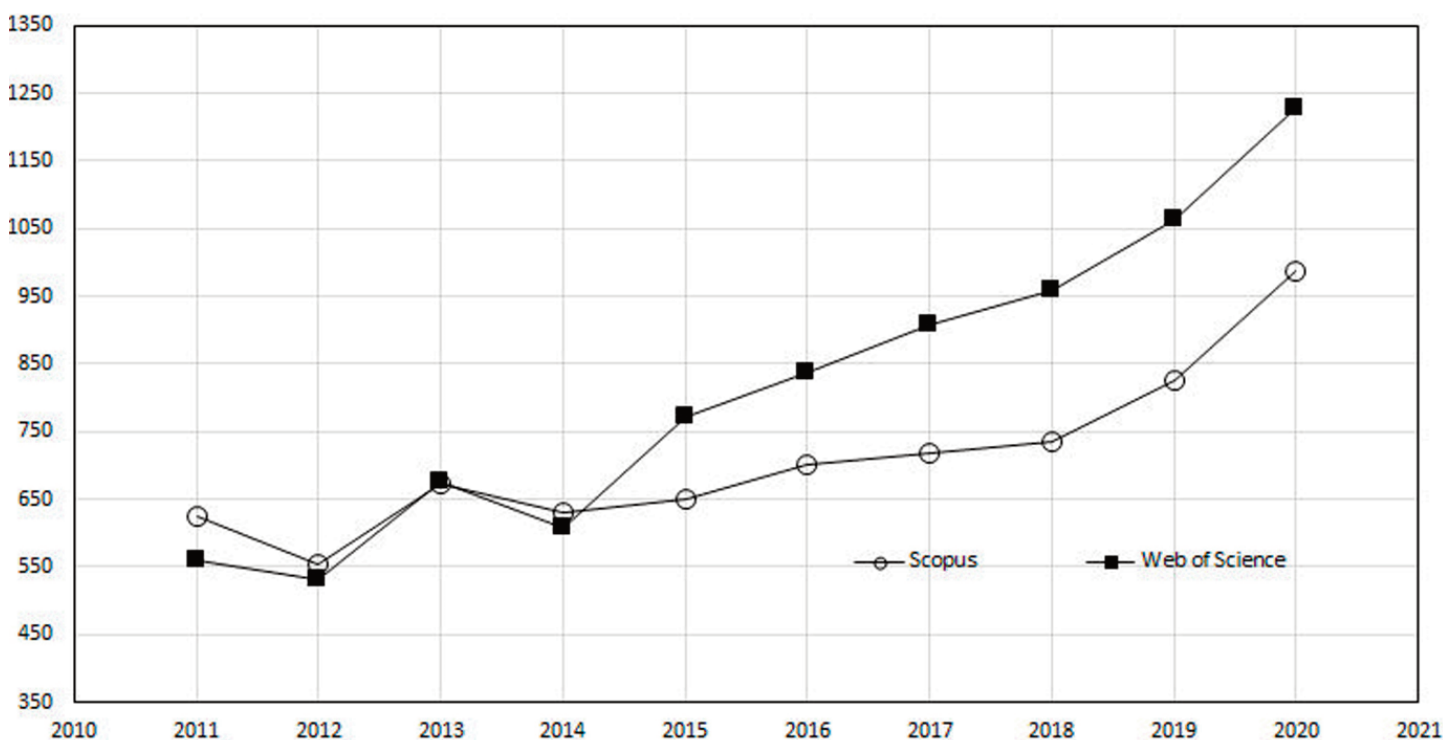


Figura 1. Distribución de artículos publicados sobre humedales construidos por año.

Figure 1. Distribution of articles published on constructed wetlands by year

entorno urbano para gestionar las aguas pluviales y escorrentías contra inundaciones y para la creación de hábitat y provisión de servicios ecosistémicos como la producción de biomasa para bioenergía (Avellán y Gremillion 2019; Rigotti et al. 2020).

Tipos de humedales construidos, condiciones de operación y el tratamiento de contaminantes

La clasificación de los HCs depende de la hidrología del sistema (de flujo libre superficial o de flujo subsuperficial); la forma de crecimiento de las plantas macrófitas (emergentes, sumergidas o de flotación libre); y la dirección del movimiento del agua (horizontal o vertical) (Almuktar et al. 2018; Gorgoglione y Torretta 2018). Estos flujos se pueden combinar en un solo sistema para lograr una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes (Rouso et al. 2019; Torres Bojorges et al. 2017; Vymazal 2014; Wu et al. 2014). Los HCs se pueden clasificar según sus objetivos para la creación de hábitat, para el control de inundaciones o para la purificación de aguas contaminadas (Stefanakis et al. 2014; Vymazal 2014). La **Tabla 1** muestra algunos ejemplos de estudios con HCs.

Los HCs de flujo vertical (HCs-FV) logran una alta tasa de transferencia de oxígeno (Almuktar et al. 2018) a diferencia de los horizontales donde se dificulta la nitrificación de las aguas residuales por la limitación en la disponibilidad de oxígeno (Almuktar et al. 2018; Stefanakis et al. 2014). Este tipo de humedal permite volúmenes relativamente altos de agua a tratar por metro cuadrado, beneficioso para el sector agrícola. Son altamente eficientes en términos de tratamiento de diferentes contaminantes en las aguas residuales, en la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y de las partículas sólidas de las aguas residuales (Almuktar et al. 2018). Pero son poco eficientes en la eliminación de fósforo debido a la insuficiente interacción entre las aguas residuales y los medios del sistema (Almuktar et al. 2018). Varios estudios han demostrado que los HCs-FV funcionan bien en términos de nitrificación, mientras que otros indican su insuficiencia para la desnitrificación (Almuktar et al. 2018). Esta operación se puede mejorar insertando tuberías de aireación para favorecer la nitrificación y eliminación de materia orgánica, en comparación con los humedales de flujo horizontal (Stefanakis et al. 2014).

Tabla 1. Estudios en diferentes tipos de humedales construidos

Table 1. Studies in different types of constructed wetlands

Tipo*	Tiempo de retención	Plantas	Eficiencia de eliminación**
FSSH (Ma et al. 2019)	3 días	<i>Iris pseudacorus</i>	DQO=70-98%, NH ₄ =15-60%, N _{total} =26-50%
FSSH (Campos et al. 2019)	2 y 4 días	<i>Cyperus isocladius</i> y <i>Eichhornia crassipes</i>	Etinilestradiol=9.0-95.6%, Levonorgestrel=39.1-100%, Bisfenol A=29.5-91.2%
FSSH (Vymazal 2019)		<i>Phalaris arundinacea, australis</i> y <i>Typha latifolia</i>	DBO=1,7%, DQO=2,9%, SST=88,3%
FSSH (Aminsharei et al. 2019)	5 y 7 días	<i>Lactuca sativa, Medicago sativa</i> y <i>Phragmites australis</i>	DQO=90.7%, SST=87.8%, N _{total} =59%, P _{total} =67%, Ibuprofeno=89%, Cafeína=97%
FSSH (Vidanage et al. 2020)	3 días	<i>Typha angustifolia</i>	DBO=66%, NO ₃ =15,3%
FSSH (Rigotti et al. 2020)	7 días	<i>Typha domingensis</i> y <i>Schoenoplectus californicus</i>	N _{total} = 30-78%, P _{total} = 11-47%
FSSH (Khalifa et al. 2020)	8 horas	<i>P. australis</i>	DBO = 72-88%, DQO = 71-88%, SST =83-88.5%, NH ₄ = 66-78%, P _{total} = 78-85%, Coliformes totales =98.4-98.6%
FSSV (García-Ávila et al. 2019)	1,12 días	<i>P. australis</i> y <i>Cyperus papyrus</i>	DBO = 75-81%, DQO = 65-70%, SST = 33-63%, NO ₃ = 90%, NH ₄ = 70%, P _{total} = 50%, Coliformes fecales = 94-96%, Coliformes totales =94-96%
FSSV (Mello et al. 2019)	1, 2, 3 días	<i>E. crassipes</i>	DQO = 54-82%, N _{total} = 9-47%, P _{total} = 16-38%
FSSV (Ruppelt et al. 2020)	10 horas	<i>P. australis</i>	Bisfenol A=70%, Sulfametoxazol=30-40%, 1-H-Benzotriazol=70%, Metoprolol=70%, Diclofenaco=70%
FSSV-con reciclado (Button et al. 2019)	7 días	<i>Phalaris arundinacea</i>	Triclosán> 99.7% Sulfametoxazol> 99.7%
FSSV (de Oliveira et al. 2019)	2 días	<i>Heliconia rostrata</i> y <i>E. crassipes</i>	NH ₄ =99%, N _{total} =99%
Hbrido (Rouso et al. 2019)	3,5 días	<i>T. domingensis</i>	DQO = 98%, SST = 99%, NH ₄ = 91%, N _{total} =69%, P _{total} = 50%, Coliformes fecales = 94-96%, Coliformes totales =94-96%, P _{total} = 96%

*FSSH: humedal de flujo sub-superficial horizontal; FSSV: humedal de flujo sub-superficial vertical; **DQO: Demanda química de oxígeno; DBO: Demanda bioquímica de oxígeno; SST: Sólidos suspendidos totales.

*FSSH: horizontal subsurface flow wetland; FSSV: vertical subsurface flow wetland; ** COD: Chemical oxygen demand; BOD: Biochemical oxygen demand; SST: Total suspended solids.

Los HCs de flotación libre se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales y escorrentías pluviales (Rigotti et al. 2020). La **Figura 2** muestra una representación gráfica de los dos tipos de humedales construidos más comunes.

Sustratos utilizados en humedales construidos urbanos

Los materiales del sustrato influyen en el movimiento del agua en los HCs y en el crecimiento de las plantas. Proporcionan el área superficial para que los microorganismos se adhieran y actúen como medio de filtración y/o adsorción de contaminantes formando una biopelícula (Ji et al. 2022). Además, brindan apoyo a las raíces de las plantas. Por tanto, los sustratos juegan un papel importante en la eliminación de contaminantes ya que la mayoría de las reacciones físicas, químicas y biológicas ocurren en los lechos de los HC (Almuktar et al. 2018). Los procesos involucrados en el tratamiento de aguas residuales a través de sustratos incluyen la sedimentación física y la filtración, la adsorción, la formación de complejos, la precipitación, el intercambio iónico, la biodegradación y el metabolismo por la raíz de la planta en el sustrato (Almuktar et al. 2018; Hdidou et al. 2022; Wang et al. 2020; Wu et al. 2015; Yang et al. 2018b).

El sustrato incide significativamente en el rendimiento del tratamiento y la estabilidad de la operación de los HC (Yang et al. 2018b). Por otra parte, la capacidad de adsorción de los materiales por los contaminantes varía, resultando en diferentes eficiencias de remoción. En consecuencia, una adecuada selección del sustrato puede mejorar la eficiencia de la purificación de las aguas en tratamiento (Wu et al. 2015; Yang et al. 2018b). Para la selección de los materiales del sustrato se debe tener en cuenta, principalmente, su disponibilidad local y costo; las propiedades físicas que definen la viabilidad hidráulica y la probabilidad de colmatación, específicamente el tamaño de partícula, la porosidad, la superficie específica, la conductividad hidráulica y la resistencia mecánica; y las propiedades químicas que controlan la seguridad de los sustratos y su capacidad para eliminar contaminantes (la carga superficial, la toxicidad y la estabilidad química) (Wang et al. 2020; Yang et al. 2018b). Por último, tanto la composición química del suelo como los parámetros físicos son criterios claves que influyen en el rendimiento del tratamiento (Wu et al. 2015). Por ello, la selección del sustrato se determina en términos de la permeabilidad hidráulica y la capacidad de adsorber contaminantes (Wu et al. 2015).

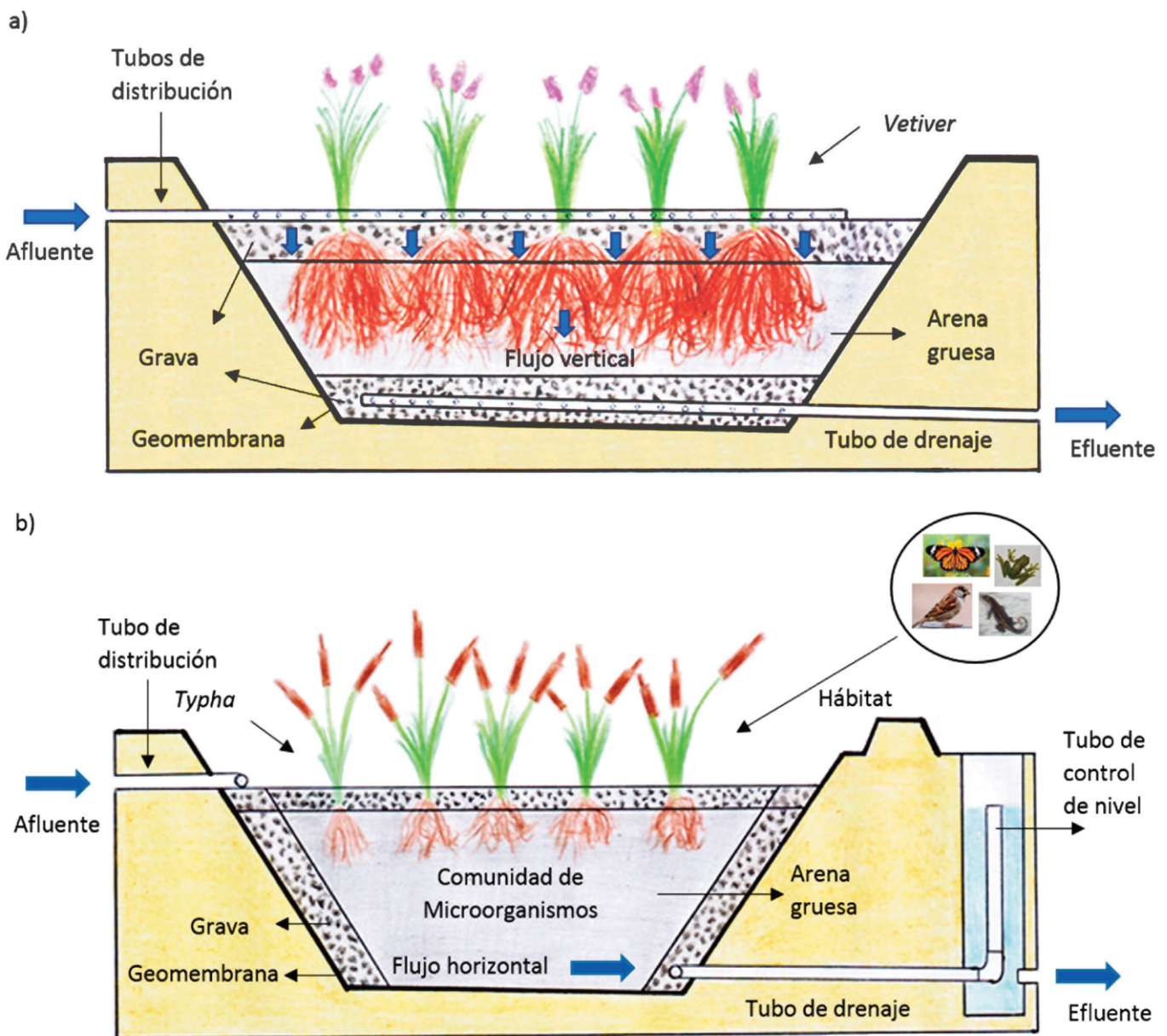


Figura 2. Humedales construidos más comunes: a)- humedal de flujo sub-superficial vertical; b)- humedal de flujo sub-superficial horizontal.
Figure 2. Most common constructed wetlands: a)- vertical subsurface flow wetland; b)- horizontal subsurface flow wetland.

Numerosos estudios evalúan el impacto de diferentes sustratos. Saeed y Sun (2013) estudiaron la cáscara de arroz, mantillo orgánico y otros no convencionales en la eficiencia de HCs. Según estos autores, estos sustratos mejoran la eliminación de nitrógeno. En cuanto al uso de carbón activado, resalta la eficiencia del uso de carbón activado de bambú para eliminar disruptores endocrinos en aguas residuales (Campos et al. 2019).

La baja eficiencia en la depuración y la obstrucción son problemas causados por sustratos convencionales, siendo importante identificar sustratos rentables y eficientes para aumentar la capacidad depuradora y minimizar la obstrucción (Khalifa et al. 2020). La concha de ostras (*Ostrea edulis*), las virutas de neumáticos, los desechos de construcción y los agregados de arcilla expansiva son algunos de los materiales utilizados como sustratos (Khalifa et al. 2020). La grava y la escoria volcánica se utilizan con frecuencia también (Ji et al. 2022). Se conoce que la segunda permite la reducción de la DQO y una mayor remoción de fósforo, aunque su capacidad de adsorción se satura rápidamente (Ji et al. 2022). Otros materiales para eliminar el fósforo en los humedales son: zeolita, dolomita, grava, arena, caliza, apatita, lodo rojo y ceniza (Gao et al. 2018).

El biocarbón es un material popular por el bajo costo de producción, su estabilidad ambiental y los efectos en varias funciones del ecosistema (Gao et al. 2018). El uso combinado de HCs y biocarbón garantiza la eliminación de sólidos en suspensión, nitrógeno, fósforo, la DBO y la DQO (Ji et al. 2022). No obstante, pocos estudios se han planteado como objetivo integrar el biocarbón a los HCs, demostrando que los humedales con biocarbón son más eficientes que los de grava (Ji et al. 2022).

Procesos combinados de humedales construidos con otras tecnologías

Para garantizar una mayor eficiencia y eficacia en el tratamiento de aguas residuales, varios estudios evalúan el uso combinado de los HCs con otras tecnologías (Shan et al. 2020) como los depuradores verticales de turba de algas (de Souza Celente et al. 2019), los filtros de suelos de retención (Ruppelt et al. 2020), la fotocatalisis (Nguyen et al. 2019) y la combinación de una capa de lodo anaeróbico de flujo ascendente con un medio granular de carbón (Vidanage et al. 2020).

Algunos trabajos abordan el estudio de HCs-FV combinados con material adsorbente para la retención de microcontaminantes (Ruppelt et al. 2020). Nguyen et al. (2019) estudiaron la capacidad de un humedal artificial simulado a escala de banco acoplado a un reactor fotocatalítico para el tratamiento de agua contaminada con tetraciclina, con una eficiencia de eliminación de materia orgánica entre 28.1–80.8% en menos de un día. Vidanage et al. (2020) estudiaron un sistema de humedal integrado con un filtro de carbón vegetal a escala doméstica alimentado con agua gris sintética. La eliminación de la DBO fue superior al 66% y la concentración de nitrato se redujo en un 15.3%. Además, el sistema descompone las sustancias complejas de fósforo en fósforo soluble. Los resultados mostraron que el efluente tratado alcanzó el estándar de calidad de agua para riego.

Especies fitorremediadoras y su papel en los humedales construidos

Las plantas utilizadas en los HCs son las que encontramos en los humedales naturales: *C. papyrus*, *P. australis*, *T. latifolia* y el *Scirpus sylvaticus*, evaluadas en diferentes zonas geográficas por sus efectos positivos en la eliminación de nutrientes y compuestos orgánicos. Varios autores estudiaron el uso de plantas locales como *Chrysopogon zizanioides*, *Myscanthus giganteus*, *Arundo donax*, *Phragmites australis* (Milani et al. 2019), *Lactuca sativa*, *Medicago sativa*, *Alpinia purpurata* y *Hedychium coronarium* (Marín-Muñiz et al. 2020), demostrando su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Las macrófitas que se usan con frecuencia en HCs incluyen plantas emergentes, plantas sumergidas, plantas con hojas flotantes y plantas libres flotantes. Las especies más utilizadas como emergentes son *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Senecio sylvaticus*, *Iris pseudacorus*, *Juncus acutus* y *Eleocharis palustris*; entre las sumergidas *Hydrilla verticillata*, *Ceratophyllum demersum*, *Vallisneria spiralis*, *Myriophyllum verticillatum* y *Potamogeton crispus*; entre las plantas con hojas *Nymphaea tetragona*, *Nymphoides peltata*, *Trapa bispinosa* y *Marsilea quadrifolia*; y entre las flotantes *Eichhornia crassipes*, *Salvinia natans* y *Hydrocharis dubia*. Las plantas emergentes constituyen la vegetación principal en los humedales construidos de flujo superficial (HCs-FS) y en los de flujo subsuperficial (HCs-FSS) diseñados para el tratamiento de aguas residuales (Campos et al. 2019). Como resultado de nuestra revisión, se identificó que en los HCs-FS la especie *P. australis* es la más utilizada en Europa y Asia; la *T. latifolia* en América del Norte; la *C. papyrus* en África; la *P. australis* y la *T. domingensis* en América Central y Sudamérica y el *Scirpus validus* en Oceanía. Sin embargo, la planta más utilizada en todo el mundo es el *P. australis*. La *T. latifolia*, *T. domingensis*, *Typha orientalis* y *Typha glauca* son las segundas más utilizadas para HCs-FSS. Por su parte, los *Scirpus lacustris*, *S. validus*, *S. californicus* y *S. acutus* son especies empleadas principalmente en América del Norte, Australia y Nueva Zelanda.

Algunas plantas ornamentales con flores (POF) se utilizan en los HCs. Las más utilizadas son *Canna indica*, *Iris pseudacorus*, *Heliconia rostrata* y *Zantedeschia aethiopica*. Su uso permite eliminar casi el 80% de los contaminantes y dar colorido a los sistemas de tratamiento. Machado et al. (2017) evaluaron el uso de POF en HCs en Brasil y concluyeron que las temperaturas cálidas, las extensas horas de luz solar y la tierra disponible son importantes para estimular la proliferación de estos sistemas.

No existe un patrón claro en el uso de ciertas especies de plantas ornamentales para ciertos tipos de aguas residuales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los HCs que usan plantas ornamentales generalmente se utilizan como tratamientos secundarios o terciarios, debido a los efectos tóxicos reportados que tiene sobre las plantas la carga orgánica/inorgánica en sistemas que las usan en tratamiento primario (Sandoval et al. 2019). También se ha estudiado la capacidad de extracción de contaminantes de diferentes tipos de pastos cultivados en HCs-FSS horizontal, con diferentes sustratos (Saraiva et al. 2019).

En los HCs, las plantas tienen roles relacionados con efectos físicos, la fijación de microorganismos, el consumo, el acondicionamiento de microclimas, la evapotranspiración, el aislamiento térmico y aspecto estéticos del sistema (Burgos et al. 2017). La vegetación participa en la biodegradación, la filtración y la absorción de los compuestos que se encuentran en el agua residual (Castañeda Villanueva y Flores López 2013; Sandoval et al. 2019). Las macrófitas son la fuente principal de oxígeno en los HCs a través de la pérdida de oxígeno radicular. Este proceso crea un ambiente aerobio alrededor de la raíz y acelera la eliminación de contaminantes, a diferencia de las condiciones anaeróbicas características del resto de los microambientes en los HCs, donde su eliminación es menor (Aminsharei et al. 2019). Las raíces son un sitio propicio para la fijación de los microorganismos que actúan en la eliminación de la contaminación y liberan exudados que contribuyen a la desnitrificación, aumentando la eliminación de contaminantes en condiciones anóxicas (Martínez et al. 2018).

Los efectos físicos de las plantas en los HCs se dividen en los provocados por las partes de la planta expuestas directamente al flujo del agua residual, y los que se encuentran en contacto con los sedimentos. Las primeras reducen la velocidad del flujo de agua, inducen la sedimentación, disminuyen la resuspensión y absorben nutrientes, mientras que las segundas estabilizan la superficie de los sedimentos, dificultan los procesos de erosión, participan en la absorción de nutrientes, en la prevención de la obstrucción del medio y en la mejoría de la conductividad hidráulica (Carrasco-Acosta et al. 2019). La parte aérea de la planta dis-

minuye la cantidad de luz que llega a la superficie, participa en el almacenamiento de nutrientes, favorece la apariencia estética del sistema y reduce la velocidad del viento (Mitsch y Gosselink 2015; Sandoval et al. 2019).

Las plantas juegan un papel importante en la eliminación de los contaminantes orgánicos e inorgánicos, al tolerar altas concentraciones de nutrientes y metales pesados, y, en algunos casos, acumularlos en sus tejidos (Sandoval et al. 2019). A partir de mediciones realizadas en la biomasa aérea de las plantas en los HCs se conoce que eliminan entre 15-32 mg de nitrógeno total y entre 2-6 mg de fósforo total por gramos de masa seca (Sandoval et al. 2019). Igualmente, son responsables de la eliminación de compuestos xenobióticos a través de su metabolismo (Sandoval et al. 2019).

La diversidad de vegetación es un factor importante respecto a la capacidad de eliminación de contaminantes en humedales (Alarcón et al. 2018). La rizosfera de las macrófitas estimula el crecimiento de las comunidades microbianas, por lo tanto, cualquier modificación de la diversidad de las plantas y su hábitat lleva a cambios en la comunidad microbiana, y a la eficiencia de la remoción de contaminantes (Sandoval et al. 2019). La mayoría de los HCs se diseñan como monocultivo de la especie seleccionada. Sin embargo, se conoce que los sistemas de policultivo mejoran la resistencia de los HCs al estrés ambiental, son menos susceptibles a plagas y a enfermedades, permiten alcanzar una distribución eficaz de la biomasa de raíces y proporcionan hábitat para una población microbiana más diversa (Calheiros et al. 2015; Sandoval et al. 2019).

Servicios ecosistémicos de los HCs

Los servicios ecosistémicos son aquellos beneficios que un ecosistema aporta a la sociedad y que mejoran la salud, la economía y la calidad de vida de las personas (Costanza et al. 1997). Se clasifican en servicios de provisión, de regulación, culturales y de soporte (Costanza et al. 1997; Millennium Ecosystem Assessment (MA) 2003). Al igual que los humedales naturales, los HCs brindan un grupo importante de servicios al ecosistema y al hombre, entre los que se encuentran: mejora de la calidad del agua, suministro de biomasa, recreación, regulación de gases (secuestro de carbono), regulación del microclima, regulación de los flujos de agua (recarga de aguas subterráneas), hábitat para diversas especies (microorganismos, plantas y animales), estética, conservación de la biodiversidad ecológica y genética, producción de energía, y valores científicos y educativos (Dumax y Rozan 2021; Masi et al. 2018; Mitsch et al. 2014; Yang et al. 2018a). Sin embargo, se plantea que los HCs mejoran ciertos servicios ecosistémicos respecto a los naturales, pero no otros (Foley et al. 2005; Jiang y Chui 2022). Al igual que los servicios de los ecosistemas dominados por el hombre y, a diferencia de los servicios de los ecosistemas naturales, ciertos servicios de los ecosistemas construidos se diseñan intencionalmente. Por otro lado, los valores de uso directo más altos (como la producción de alimentos y la recreación) respecto a los indirectos, generalmente, se estiman a través de los servicios ecosistémicos construidos en comparación con los servicios ecosistémicos naturales. Por último, la escala de evaluación de los servicios ecosistémicos de los HCs es más explícita que la de los servicios naturales, ya que los límites del ecosistema construido suelen ser menores y bien definidos al compararlos con un ecosistema natural (Yang et al. 2008). Algunos autores consideran que para que un HC provea los mismos servicios ecosistémicos que los naturales pueden pasar de 5 a 15 años (Jiang y Chui 2022).

Si bien varios autores han evaluado los servicios ecosistémicos de los HCs (Mitsch et al. 2014; Yang et al. 2008, consideramos que en esta línea queda aún mucho por hacer. Yang et al. (2008) estudiaron el valor económico ecológico de un humedal construido para el tratamiento de aguas eutróficas en el Jardín Botánico de Hangzhou, China, para lo que aplicaron el método de valoración contingente y el enfoque de proyecto sombra para estimar los valores económicos de los servicios ecosistémicos del HC. El estudio mostró las ventajas de bajo costo, fácil mantenimiento, altos efectos

de purificación y beneficios ambientales de esta tecnología de tratamiento de aguas residuales, adecuada para aguas subterráneas y superficiales.

Por otra parte, un estudio del equipo de Mitsch et al. (2014) que evaluó los servicios ecosistémicos de dos HCs por veinte años, demostró que estos tienen tasas de secuestro de carbono más altas que las tasas de los humedales naturales de referencia de hidrología similar. Estos HCs han brindado servicios ecosistémicos de retención de nutrientes, secuestro de carbono y soporte de hábitat durante 20 años. Según los autores, el bajo nivel de emisiones de metano de estos humedales no debe ser motivo para desalentar la creación y restauración de humedales similares en zonas húmedas y templadas. Otros estudios de caso para la evaluación de los servicios ecosistémicos de los humedales construidos se han realizado en diversos países (Geber y Björklund 2001; Rizzo et al. 2021; Semeraro et al. 2015; Snyder 2019; Yang et al. 2018a).

Sostenibilidad económica y ambiental de los humedales construidos

La sostenibilidad de los HCs depende de factores como la vegetación, los tipos de sustratos y la hidráulica/hidrología (Gorgoglione y Torretta 2018). De ellos, las especies de plantas y el material del sustrato son factores críticos que influyen en la capacidad de eliminación de los contaminantes, por lo que constituyen los componentes primarios de los HCs y modifican directa o indirectamente los procesos de eliminación de contaminantes en el transcurso del tiempo (Gorgoglione y Torretta 2018; Wu et al. 2015). Igualmente, hay que tener en cuenta que las condiciones ambientales, tanto dentro (disponibilidad de oxígeno disuelto, de una fuente de carbono orgánico, pH y las condiciones de oxidación/reducción) como fuera (temperatura) de los HCs influyen en los procesos de descontaminación (Gorgoglione y Torretta 2018).

Al hablar de sostenibilidad, tanto económica como ambiental, de los HCs hay que tener en cuenta su durabilidad y eficiencia en el tiempo. Vymazal (2019) evaluó el rendimiento de 114 HCs en Chequia con especial atención a sistemas con al menos 20 años. El estudio reveló que, si los humedales se cargan correctamente, su rendimiento con respecto al tratamiento es muy estable, con concentraciones de salida de menos de 15 mg/L de DBO5 y menos de 50 mg/L de DQO. La eficiencia de tratamiento aumenta con los años de operación.

Desde el punto de vista económico-social, se han estudiado las potencialidades que brindan otros servicios ecosistémicos como la producción de biomasa para bioenergía (Laitinen et al. 2017) y de POF (Sandoval et al. 2019), lo que se relaciona con su sostenibilidad económica. Recientemente, Snyder (2019) modeló el costo económico-ecológico de un HC que simultáneamente realiza el tratamiento de aguas residuales y produce biomasa de *Salvinia molesta*, hasta 200 toneladas de biomasa seca por ha, por año.

Por otra parte, el uso de especies de POF en HCs es una opción para traer beneficios económicos produciendo flores sin reducir la eficiencia de los sistemas (Alarcón Herrera et al. 2018). Al usarse plantas con valor comercial, los recursos invertidos pueden recuperarse con las ganancias de las ventas, sin entorpecer la eliminación de los contaminantes, lo que implica un beneficio económico y social adicional. Por tanto, las áreas urbanas también pueden usar sistemas de HCs con hermosos paisajes en supermercados, calles, universidades, hospitales, zonas ribereñas y como humedales flotantes en ríos, lagos o lagunas (Rigotti et al. 2020).

Ciclo de vida de los HCs

Un gran número de estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se han enfocado hacia la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Stefanakis 2020; Su et al. 2019). Su et al. (2019) compararon seis sistemas de tratamiento de aguas residuales, incluyendo los HCs en cuanto a su desempeño ambiental, resultando estos últimos los mejores desde el punto de vista de sos-

tenibilidad económica por su largo tiempo de funcionamiento a bajos costos de operación y mantenimiento. [Garfi et al. \(2017\)](#) compararon una planta convencional de tratamiento de residuales, un HC y un sistema de estanque con algas de alta tasa; para identificar qué etapa del ciclo de vida es responsable de los impactos más significativos y establecer una línea base. Si bien el primero de estos sistemas garantizó la mejor eficacia en el tratamiento de aguas residuales, los segundos fueron superiores en los aspectos relacionados con el manejo y su explotación. [Resende et al. \(2019\)](#) utilizaron el ACV para comparar un sistema híbrido de HC con otro HC con aeración artificial, demostrando la superioridad de los HCs híbridos sobre los que funcionan con aeración superficial. [Corbella et al. \(2017\)](#) para valorar el impacto ambiental por el acoplamiento de una celda de combustible microbiana a un HC; y para comparar materiales de construcción para los sistemas de tratamiento. Para los HCs, donde la demanda de energía es baja, la fase de construcción podría ser responsable del 80% de los impactos ambientales potenciales ([Lopsik 2013](#); [Lutterbeck et al. 2017](#)). Los materiales de construcción alternativos incluyen: hormigón armado, tierra cubierta con una geomembrana de polietileno de alta densidad o con una capa de arcilla compactada. Por tanto, es importante seleccionar materiales de construcción que minimicen el impacto ambiental, tratando de tener un sistema de tratamiento de aguas residuales con HCs, que no sólo proporcione un tratamiento adecuado y sea económicamente ventajoso, sino también respetuoso con el medio ambiente. La importancia de tener en cuenta los aspectos relacionados con la construcción de HCs en los estudios de ciclo de vida han sido bien abordados en los estudios de [Corbella y colaboradores \(2017\)](#).

[Su et al. \(2019\)](#) realizaron un ACV para comparar diferentes tecnologías de tratamiento de residuales, entre ellas lagunas de estabilización, HCs y sistemas de baja velocidad. Estimaron un consumo de energía para los HCs entre 0.04–0.09 kWh/m³. Por su parte, [Resende et al. \(2019\)](#) demostraron que las emisiones al entorno, tales como la liberación de gases de efecto invernadero a partir de los tanques sépticos y de nutrientes en los efluentes, son las que definen los impactos ambientales potenciales relacionados con el cambio climático, los oxidantes fotoquímicos y la eutrofización de las aguas terrestres en los HCs.

Análisis de riesgo en humedales construidos

Los HCs pueden plantear diferentes tipos de riesgo a la salud humana, fundamentalmente en los HCs de FS y raramente en HCs-FV, cuando no están diseñados adecuadamente, al convertirse en un foco de vectores de enfermedades y emisión de malos olores ([Pérez-Salazar et al. 2019](#)). Los HCs son capaces de reducir de 2-4 órdenes de magnitud la población de bacterias fecales utilizadas como indicadores de los microorganismos patógenos, pero estos niveles todavía son superiores a los límites exigidos por las regulaciones ambientales para el reúso ([Grinberga 2020](#); [Khan et al. 2020](#)). Sin embargo, la problemática fundamental que plantea el diseño de los HCs-FV está relacionada con el hecho de que las aguas residuales pretratadas se alimentan directamente sobre la superficie, con poco aislamiento respecto a las áreas circundantes y al ambiente ([Bydalek y Myszograj 2019](#)). Este problema ha sido abordado en pocos estudios. No obstante, los aerosoles diseminados por el aire no son la única fuente de propagación potencial de enfermedades, ya que también puede ocurrir el contacto físico directo con la superficie del humedal de mascotas, usuarios imprudentes e incluso niños, si no se toman las medidas adecuadas para evitarlo. Para disminuir la probabilidad de infección con cualquier costo adicional, [Bydalek y Myszograj \(2019\)](#) estudiaron el uso de materiales no porosos como la grava y la escoria en la capa superficial de los HCs-FV, inhibiendo estrictamente el crecimiento de bacterias y reduciendo su población hasta en un 99% en las primeras 3 horas de tiempo de contacto, lo que no se logró al utilizar materiales como el carbón vegetal y la corteza de pino. Por último, otro problema a abordar en zonas urbanas densamente pobladas es el riesgo de contaminación bacteriana con las aguas residuales tratadas ([Bydalek y Myszograj 2019](#); [Rajan et al. 2019](#)).

Perspectivas en investigaciones y desarrollo de humedales construidos futuros

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en HCs seguirán ganando espacio por ser una tecnología verde; de bajo costo; fáciles de diseñar, construir y explotar; que brindan varios servicios ecosistémicos y que son amigables con el entorno. Los HCs seguirán utilizándose al garantizar la calidad del agua con altos estándares para su reutilización para riego en jardinería y agricultura, así como otros posibles usos que no requieran agua potable ([Grinberga 2020](#)). El uso de HCs para tratar las aguas residuales municipales reduce el consumo de energía y los costos, así como la contaminación ambiental ([Almuktar et al. 2018](#); [Choi et al. 2018](#); [Gorgoglione y Torretta 2018](#)). Desde nuestro punto de vista, las investigaciones y las aplicaciones de los HCs en los próximos años se deberían dirigir a:

- Potenciar los humedales híbridos como sistemas de tratamiento de agua por la mayor eficiencia en su funcionamiento.
- La evaluación y búsqueda de nuevas especies bioacumuladoras y biorremediadoras que garanticen un tratamiento eficiente y eficaz del agua, priorizando las especies propias de cada zona climática, las especies con valor comercial y aquellas con potencial bioenergético. Sin embargo, en el caso de las especies bioacumuladoras se deberá prestar atención a la disposición final o tratamiento de las mismas, con el fin de no traspasar de una zona a otra los problemas de acumulación de contaminantes tóxicos como los metales pesados.
- La integración de los HCs con sistemas de tratamiento de agua convencionales, y con otras tecnologías como la adsorción o los procesos avanzados de oxidación, para garantizar la eliminación de contaminantes emergentes como pesticidas, fármacos, y productos de cuidado personal.
- Profundizar en las ventajas de los HCs a partir de los servicios ecosistémicos que ofrecen, tratando de convertirlos en fuentes de ingresos económicos para los propietarios de estos.
- Aunque ya se conocen resultados sobre la emisión de gases de efecto invernadero en los HCs, será necesario seguir estudiando el impacto ambiental de los mismos a través del cálculo de la huella hídrica y de carbono. Igualmente, será pertinente realizar los análisis de estos sistemas como procesos tecnológicos desde el punto de vista de su riesgo y ciclo de vida.
- Evaluar las vías para aumentar la eficacia en la eliminación de la contaminación microbiológica. Se valorará la integración con procesos con membranas, prestando atención a no complejizar la tecnología ni elevar de manera significativa los costos de inversión y explotación. Otra línea será la selección de especies nativas cuyo contenido de compuestos antimicrobianos puedan ser útiles para reducir el contenido de microorganismos patógenos en los HCs.
- Pocos estudios han evaluado el impacto social de los HC como tecnología de tratamiento de agua, a lo que se deberá dedicar un espacio en el futuro inmediato.

Conclusiones

El tratamiento de las aguas residuales en zonas urbanas utilizando HCs es una línea activa de investigación, con un número creciente de publicaciones. Se deben considerar las condiciones climáticas sobre el desempeño de los HCs, además de los elementos asociados a la biodiversidad, lo que representa un nicho de investigación por el papel que juegan las plantas y los microorganismos en los HCs. Otro aspecto importante es la sostenibilidad de esta tecnología, no solamente en su dimensión ambiental, sino también en sus dimensiones económica y social, por la necesidad imperiosa de reducir la contaminación ambiental de las aguas terrestres, fomentando la reutilización del agua residual tratada sin riesgo para la población y el ecosistema. Por último, se comprobó que existen pocos estudios de análisis de confiabilidad y riesgos de esta tecnología, por lo que se deberá continuar trabajando en esta dirección en el futuro próximo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del proyecto de fondos propios INTEC “Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas basados en humedales construidos en zonas urbanas de Jarabacoa, República Dominicana.”

Contribución de los autores

Yvelisse Antonia Pérez: Conceptualización, Curaduría de datos, Investigación, Redacción - borrador original.

Daniel Garcia-Cortes: Conceptualización, Redacción - revisión y edición, Supervisión, Validación.

Ulises Javier Jauregui-Haza: Administración del proyecto, Adquisición de fondos, Conceptualización, Investigación, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición, Supervisión.

Referencias

- Alarcón Herrera, M.T., Zurita Martínez, F., Lara-Borrero, J.A., Sáez, V., Gladys, C. 2018. *Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Almuktar, S.A., Abed, S.N., Scholz, M. 2018. Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 25(24):23595-23623.
- Aminsharei, F., Borghei, S.M., Arjomandi, R., Nouri, J., Pendashteh, A. 2019. Effects of various plants on treatment efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands based on the hydraulic retention time. *Environmental Engineering and Management Journal* 18(6):1201-1206.
- Avellán, T., Gremillion, P. 2019. Constructed wetlands for resource recovery in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 99:42-57.
- Bergier, T., Wlodyka-Bergier, A. 2016. Semi-technical scale research on constructed wetland removal of aliphatic hydrocarbons C7-C40 from wastewater from a car service station. *Desalination and Water Treatment* 57(3):1534-1542.
- Burgos, V., Araya, F., Reyes-Contreras, C., Vera, I., Vidal, G. 2017. Performance of ornamental plants in mesocosm subsurface constructed wetlands under different organic sewage loading. *Ecological Engineering* 99:246-255.
- Button, M., Cosway, K., Sui, J., Weber, K. 2019. Impacts and fate of triclosan and sulfamethoxazole in intensified re-circulating vertical flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment* 649:1017-1028.
- Bydalek, F., Myszograj, S. 2019. Safe surface concept in vertical flow constructed wetland design to mitigate infection hazard. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 54(3):246-255.
- Calheiros, C.S., Bessa, V.S., Mesquita, R.B., Brix, H., Rangel, A.O., Castro, P.M. 2015. Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering* 79:1-7.
- Campos, J.M., Queiroz, S.C., Roston, D.M. 2019. Removal of the endocrine disruptors ethinyl estradiol, bisphenol A, and levonorgestrel by subsurface constructed wetlands. *Science of The Total Environment* 693:133514.
- Carrasco-Acosta, M., Garcia-Jimenez, P., Herrera-Melián, J.A., Peñate-Castellano, N., Rivero-Rosales, A. 2019. The Effects of Plants on Pollutant Removal, Clogging, and Bacterial Community Structure in Palm Mulch-Based Vertical Flow Constructed Wetlands. *Sustainability* 11(3):632.
- Castañeda Villanueva, A.A., Flores López, H.E. 2013. Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad* 3(5).
- Choi, J., Geronimo, F.K.F., Park, B., Hong, J., Kim, L.-H. 2018. Formulation of design guidelines for the cost-effectiveness of constructed wetlands in improving water quality. *Desalination and Water Treatment* 101:108-115.
- Corbella, C., Puigagut, J., Garfi, M. 2017. Life cycle assessment of constructed wetland systems for wastewater treatment coupled with microbial fuel cells. *Science of the Total Environment* 584:355-362.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387(6630):253-260.
- de Oliveira, M., Atalla, A.A., Frihling, B.E.F., Cavalheri, P.S., Migliolo, L., Magalhães Filho, J.F. 2019. Ibuprofen and caffeine removal in vertical flow and free-floating macrophyte constructed wetlands with *Heliconia rostrata* and *Eichornia crassipes*. *Chemical Engineering Journal* 373:458-467.
- de Souza Celente, G., Colares, S.,G., Machado, Ê.L., Lobo, E. A. 2019. Algae turf scrubber and vertical constructed wetlands combined system for decentralized secondary wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research* 26(10):9931-9937.
- Dumax, N., Rozan, A. 2021. Valuation of the environmental benefits induced by a constructed wetland. *Wetlands Ecology Management* 1-14.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., et al. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309(5734):570-574.
- Gao, Y., Zhang, W., Gao, B., Jia, W., Yang, L. 2018. Highly efficient removal of nitrogen and phosphorus in an electrolysis-integrated horizontal subsurface-flow constructed wetland amended with biochar. *Water Research* 139:301-310.
- García-Ávila, F., Patiño-Chávez, J., Zhinin-Chimbo, F., Donoso-Moscoso, S., Del Pino, F.L., Avilés-Añazco, A. 2019. Performance of *Phragmites Australis* and *Cyperus Papyrus* in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. *International Soil and Water Conservation Research* 7(3):286-296.
- Garfi, M., Flores, L., Ferrer, I. 2017. Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *Journal of Cleaner Production* 161:211-219.
- Geber, U., Björklund, J. 2001. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems—a case study. *Ecological Engineering* 18(1):39-59.
- Gorgoglione, A., Torretta, V. 2018. Sustainable management and successful application of constructed wetlands: A critical review. *Sustainability* 10(11):3910.
- Grinberga, L. 2020. Water Quality Assurance with Constructed Wetlands in Latvia. En: *Water Resources Quality and Management in Baltic Sea Countries* pp. 87-103. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Suiza.
- Guittonny-Philippe, A., Petit, M.E., Masotti, V., Monnier, Y., Malleret, L., Coulomb, B., et al. 2015. Selection of wild macrophytes for use in constructed wetlands for phytoremediation of contaminant mixtures. *Journal of Environmental Management* 147:108-123.
- Hdidou, M., Necibi, M.C., Labille, J., El Hajjaji, S., Dhiba, D., Chehbouni, A., et al. 2022. Potential Use of Constructed Wetland Systems for Rural Sanitation and Wastewater Reuse in Agriculture in the Moroccan Context. *Energies* 15(1):156.
- Ji, Z., Tang, W., Pei, Y. 2022. Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere* 286:131564.
- Jiang, L., Chui, T.F.M. 2022. A review of the application of constructed wetlands (CWs) and their hydraulic, water quality and biological responses to changing hydrological conditions. *Ecological Engineering* 174:106459.
- Khalifa, M.E., El-Reash, Y.G.A., Ahmed, M.I., Rizk, F.W. 2020. Effect of media variation on the removal efficiency of pollutants from domestic wastewater in constructed wetland systems. *Ecological Engineering* 143:105668.
- Khan, S., Nawab, J., Waqas, M. 2020. Constructed Wetlands: A Clean-Green Technology for Degradation and Detoxification of Industrial Wastewaters. En: *Bharagava, R.N., Saxena, G. (eds.), Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety*, pp. 127-163. Springer, Singapore.
- Laitinen, J., Moliis, K., Surakka, M. 2017. Resource efficient wastewater treatment in a developing area—Climate change impacts and economic feasibility. *Ecological Engineering* 103:217-225.
- Lopsik, K. 2013. Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. *International Journal of Environmental Science and Technology* 10(6):1295-1308.
- Lutterbeck, C.A., Kist, L.T., Lopez, D.R., Zerwes, F.V., Machado, E.L. 2017. Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. *Journal of Cleaner Production* 148:527-536.
- Ma, Y., Zhai, Y., Zheng, X., He, S., Zhao, M. 2019. Rural domestic wastewater treatment in constructed ditch wetlands: Effects of influent flow ratio distribution. *Journal of Cleaner Production* 225:350-358.

- Machado, A.I., Beretta, M., Fragoso, R., Duarte, E. 2017. Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management* 187:560-570.
- Magwaza, S.T., Magwaza, L.S., Odindo, A.O., Mditshwa, A. 2020. Hydroponic technology as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture : A review. *Science of the Total Environment* 698:134154.
- Marín-Muñiz, J.L., Hernández, M.E., Gallegos-Pérez, M.P., Amaya-Tejeda, S.I. 2020. Plant growth and pollutant removal from wastewater in domiciliary constructed wetland microcosms with monoculture and polyculture of tropical ornamental plants. *Ecological Engineering* 147:105658.
- Martínez, N.B., Tejeda, A., Del Toro, A., Sánchez, M.P., Zurita, F. 2018. Nitrogen removal in pilot-scale partially saturated vertical wetlands with and without an internal source of carbon. *Science of the Total Environment* 645:524-532.
- Masi, F., Rizzo, A., Regelsberger, M. 2018. The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm. *Journal of Environmental Management* 216:275-284.
- Mello, D., Carvalho, K.Q., Passig, F.H., Freire, F.B., Borges, A.C., Lima, M.X., et al. 2019. Nutrient and organic matter removal from low strength sewage treated with constructed wetlands. *Environmental Technology* 40(1):11-18.
- Milani, M., Marzo, A., Toscano, A., Consoli, S., Cirelli, G. L., Ventura, D., et al. 2019. Evapotranspiration from Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands Planted with Different Perennial Plant Species. *Water* 11(10):2159.
- Millennium Ecosystem Assessment (MA) 2003. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Island Press, Washington DC, Estados Unidos.
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G. 2015. *Wetlands*. (5th ed.). John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, Estados Unidos.
- Mitsch, W.J., Zhang, L., Waletzko, E., Bernal, B. 2014. Validation of the ecosystem services of created wetlands: two decades of plant succession, nutrient retention, and carbon sequestration in experimental riverine marshes. *Ecological Engineering* 72:11-24.
- Nguyen, H.T.T., Chao, H.R., Chen, K.C. 2019. Treatment of organic matter and tetracycline in water by using constructed wetlands and photocatalysis. *Applied Sciences* 9(13):2680.
- Pérez-Salazar, R., Mora-Aparicio, C., Alfaro-Chinchilla, C., Sasa-Marín, J., Scholz, C., Rodríguez-Corrales, J.Á. 2019. Biogardens as constructed wetlands in tropical climate: A case study in the Central Pacific Coast of Costa Rica. *Science of the Total Environment* 658:1023-1028.
- Rajan, R.J., Sudarsan, J.S., Nithyanantham, S. 2019. Efficiency of constructed wetlands in treating E. coli bacteria present in livestock wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology* 17(4):2153-2162.
- Ramprasad, C., Bharathwaj, R.R., Poddar, D. 2019. Design and performance evaluation of decentralized wastewater treatment and reuse system for urban and rural places. *International Journal of Applied Engineering Research* 14(5):1135-1144.
- Resende, J.D., Nolasco, M.A., Pacca, S.A. 2019. Life cycle assessment and costing of wastewater treatment systems coupled to constructed wetlands. *Resources Conservation and Recycling* 148:170-177.
- Rigotti, J.A., Pasqualini, J.P., Rodrigues, L.R. 2020. Nature-based solutions for managing the urban surface runoff: an application of a constructed floating wetland. *Limnetica* 39(1):441-454.
- Rizzo, A., Conte, G., Masi, F. 2021. Adjusted Unit Value Transfer as a Tool for Raising Awareness on Ecosystem Services Provided by Constructed Wetlands for Water Pollution Control: An Italian Case Study. *International Journal of Environmental Research Public Health* 18(4):1531.
- Rouso, B.Z., Pelissari, C., Santos, M.O.D., Sezerino, P.H. 2019. Hybrid constructed wetlands system with intermittent feeding applied for urban wastewater treatment in South Brazil. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 9(3):559-570.
- Ruppelt, J.P., Pinnekamp, J., Tondera, K. 2020. Elimination of micropollutants in four test-scale constructed wetlands treating combined sewer over flow : Influence of filtration layer height and feeding regime. *Water Research* 169:115214.
- Saeed, T., Sun, G. 2013. A lab-scale study of constructed wetlands with sugarcane bagasse and sand media for the treatment of textile wastewater. *Bioresource Technology* 128:438-447.
- Sandoval, L., Zamora-Castro, S.A., Vidal-Álvarez, M., Marín-Muñiz, J.L. 2019. Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences* 9(4):685-701.
- Saraiva, C.B., Matos, A.T., Matos, M.P.D. 2019. Extraction capacity of grasses grown in constructed wetland systems using different arrangements and substrates. *Engenharia Agrícola* 39(5):668-675.
- Saxena, G., Bharagava, R.N. 2020. *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety*. (Vol. I: Industrial Waste and its Management). Springer, Singapur.
- Semeraro, T., Giannuzzi, C., Beccarisi, L., Aretano, R., De Marco, A., Pasiomeni, M.R., et al. 2015. A constructed treatment wetland as an opportunity to enhance biodiversity and ecosystem services. *Ecological Engineering* 82:517-526.
- Shan, A., Wang, W., Kang, K.J., Hou, D., Luo, J., Wang, G., et al. 2020. The removal of antibiotics in relation to a microbial community in an integrated constructed wetland for tail water decontamination. *Wetlands* 40(5):993-1004.
- Snyder, B.F. 2019. The inclusion of ecosystem service valuations in bioenergy cost analysis: a case study of constructed wetlands in the neotropics. *Ecological Economics* 156:196-201.
- Stefanakis, A.I. 2018. *Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment*. (A. I. Stefanakis Ed.). John Wiley and Sons Ltd, West Sussex, Reino Unido.
- Stefanakis, A.I. 2020. Constructed Wetlands: description and benefits of an eco-tech water treatment system. En: *Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, pp. 503-525. IGI Global, Pennsylvania, Estados Unidos.
- Stefanakis, A.I., Akrotos, C.S., Tsihrintzis, V.A. 2014. *Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment*. (1st ed.). Elsevier, Amsterdam, Países Bajos.
- Su, X., Chiang, P., Pan, S., Chen, G., Tao, Y., Wu, G., et al. 2019. Systematic approach to evaluating environmental and ecological technologies for wastewater treatment. *Chemosphere*, 218:778-792.
- Torres Bojorges, Á.X., Hernández Razo, N.A., Urquieta, F., Aseret, A., Zurita Martínez, F. 2017. Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 33(1):37-47.
- Vidanage, V.V.D.N.G., Karunarathna, A.K., Alahakoon, A.M.Y.W., Jayawardene, S.M.N. 2020. Development of an Effective and Efficient Integrated Charcoal Filter Constructed Wetland System for Wastewater Treatment. En: Ghosh S., Saha P., Francesco Di M. (eds.), *Recent Trends in Waste Water Treatment and Water Resource Management*, pp. 47-56. Springer, Singapur.
- Volkan, H., Carvalho, P., Gajewska, M., Ursino, N., Masi, F., Hullebusch, E.D.V., et al. 2020. A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature. *Blue-Green Systems* 2(1):111-135.
- Vymazal, J. 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering* 73:724-751.
- Vymazal, J. 2018. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. En: Fath, B. (ed.), *Encyclopedia of Ecology*, 2nd ed., Vol. 1, pp. 1-9. Elsevier Amsterdam, Países Bajos.
- Vymazal, J. 2019. Is removal of organics and suspended solids in horizontal sub-surface flow constructed wetlands sustainable for twenty and more years? *Chemical Engineering Journal* 378:122117.
- Vymazal, J., Březinová, T. 2015. The use of constructed wetlands for removal of pesticides from agricultural runoff and drainage: a review. *Environment International* 75:11-20.
- Wang, Y., Cai, Z., Sheng, S., Pan, F., Chen, F., Fu, J. 2020. Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 701:134736.
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H.H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., et al. 2015. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology* 175:594-601.
- Wu, S., Kusch, P., Brix, H., Vymazal, J., Dong, R. 2014. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review. *Water Research* 57:40-55.
- Yang, W., Chang, J., Xu, B., Peng, C., Ge, Y. 2008. Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: A case study in Hangzhou, China. *Ecological Economics* 68(1-2):116-125.
- Yang, Y., Guan, Q., Wang, M., Su, X., Wu, G., Chiang, P., et al. 2018a. Assessment of nitrogen reduction by constructed wetland based on IN-VEST: A case study of the Jiulong River Watershed, China. *Marine Pollution Bulletin* 133:349-356.
- Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R., Morgan, D. 2018b. Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresource technology* 261:441-452.