Reducción de contaminantes en sistemas para tratamiento y reúso de aguas residuales mediante humedales construidos

Aldo Antonio Castañeda-Villanueva[1*] Amalia Nayeli López-Cerpa[2], Roberto Huerta-Orozco[2]

[1]*Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Los Altos. Departamento de Ingenierías,* [2]*Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Departamento de Ingeniería Industrial*

Artículo recibido 30 de septiembre de 2024 y aceptado el 15 de mayo de 2025

Reducing pollutants in wastewater treatment and reuse systems through constructed wetlands

Abstract

In the present study, the capacity for reducing contaminants in two systems for the sanitation and reuse of domestic wastewater that include constructed wetlands (CW) was evaluated, in a municipality of Los Altos-Norte in the state of Jalisco, determining parameters such as: chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and specific conductivity (SC), both at the inlet and outlet of each system. The treatment systems are of the subsurface type, with horizontal flow, consisting of: pre-treatment for the separation of light substances (fats, oils, plastics, etc.) by flotation, and heavy materials (metals, sand, etc.) by sedimentation, CW with red volcanic stone as a substrate and Tule reed specimens and post-treatment that includes devices for chlorination and a stabilization reservoir, with a treatment capacity of 1.5 and 7 liters per second, observing significant reductions in the quantified parameters. Considering both the installation costs and the operational requirements of the systems for the sanitation of domestic wastewater with CW, these present an economically viable and environmentally sustainable alternative, mainly for rural populations that have adequate land and favorable weather conditions. Although the maintenance of these systems is considerably less than that of conventional treatments, it must be carried out regularly, mainly by removing sediment and floating materials in the pre-treatments, as well as periodically removing excessive biomass and vegetation in the wetland cells, to avoid short circuits in the water flow and guaranteeing adequate contact periods, including the less hot seasons.

Key words: Artificial wetland, reduction of pollutants, wastewater treatment.

Resumen

En el presente estudio se evaluó la capacidad para la disminución de contaminantes en dos sistemas para el saneamiento y reúso de aguas residuales domésticas que incluyen Humedales Construidos (HC), en un municipio de Los Altos-Norte del estado de Jalisco, determinando parámetros como: demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (Nt), fósforo total (Pt) y conductividad específica (CE), tanto a la entrada como a la salida de cada sistema. Los sistemas de tratamiento son de tipo sub-superficial, de flujo horizontal conformados por: pre-tratamiento para la separación de sustancias ligeras (grasas, aceites, plásticos, etc.), por flotación, y de materiales pesados (metales, arenas, etc.), por sedimentación, el HC con tezontle rojo como sustrato y especímenes de Tule y el post-tratamiento que incluye dispositivos para cloración y un embalse de estabilización, con capacidad de tratamiento para 1.5 y 7 litros por segundo, observando reducciones importantes en los parámetros cuantificados. Considerando tanto los costos de instalación, como los requerimientos operativos de los sistemas para el saneamiento de aguas residuales domésticas con HC, estos presentan una alternativa económicamente viable y ambientalmente sustentable, principalmente para poblaciones rurales que dispongan de terrenos adecuados y condiciones climatológicas favorables. Aunque el mantenimiento de estos sistemas es considerablemente menor al de tratamientos convencionales, se debe

*Autor de correspondencia
Email: acasteneda@cualtos.udg.mx
ISSN 2594-0384 (Electrónica)

realizarlo regularmente, principalmente extrayendo los sedimentos y materiales flotantes en los pre-tratamientos, así como retirando periódicamente la biomasa y vegetación excesiva en las celdas de los humedales, para evitar cortos circuitos en el flujo del agua y garantizando los periodos de contacto adecuados, incluyendo las temporadas menos cálidas.

Palabras claves: Humedal artificial, reducción de contaminantes, tratamiento de aguas residuales.

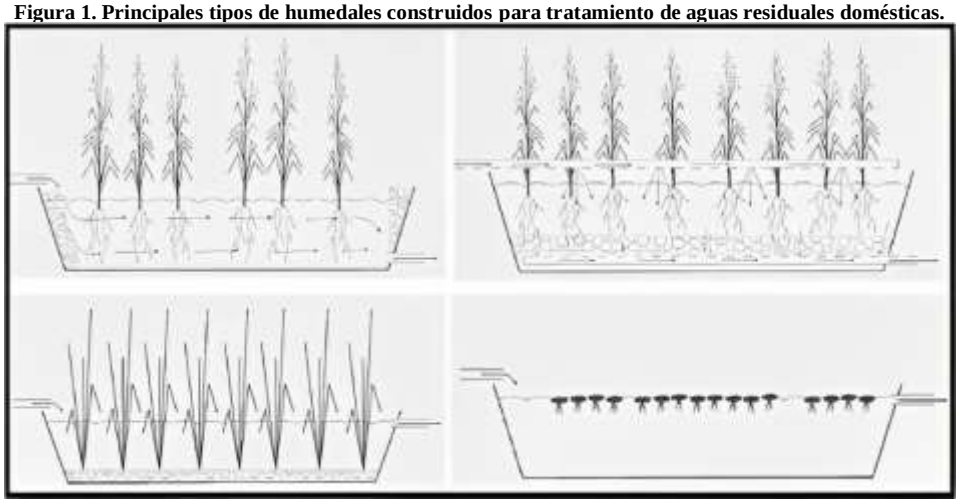
Introducción

Los humedales construidos (HC), son diseños hidráulicos que simulan los procesos que tienen lugar de manera espontánea en los humedales naturales (Martínez *et al*., 2018), generando aguas tratadas de calidad aceptable, con menores costos de operación y mantenimiento (Kumar *et al*., 2022), referencialmente el costo en un HC es de $ 2.74 pesos/m³ (promedio de $100 pesos/habitante año), mientras que una planta de tratamiento convencional asciende a $12.78 pesos/m³ (promedio de $500 pesos/habitante año) (CONAGUA, 2015; IMTA, 2014). La guía técnica para humedales construidos establece que estos sistemas de tratamiento, simulan y potencian los procesos que tienen lugar de manera espontánea en los humedales naturales (fito-depuración), mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Delgadillo *et al*., 2010), utilizando especímenes de plantas como las macrófitas (Vymazal, 2008); es decir aquellas que viven y se desarrollan en ambientes con saturación de agua (Toledo, 2002). Su principal aplicación es en el saneamiento de aguas residuales de origen doméstico y como tratamientos secundarios para otro tipo de aguas residuales (comerciales e industriales), y se instalan en terrenos impermeables (suelos con alta densidad, estructura compacta y baja permeabilidad), para evitar las infiltraciones y posibles contaminaciones de acuíferos subterráneos (Fernández *et al*., 2014).

Los principales tipos de HC utilizados para el tratamiento de aguas residuales son: con flujo sub-superficial horizontal, con flujo sub-superficial vertical, de flujo superficial con vegetación emergente y de flujo superficial con vegetación flotante (Figura 1).

En general, los HC de flujo superficial (HCS), se caracterizan por el hecho de que el agua está en contacto directo con la atmósfera como en los humedales naturales, en esencia son una variación de los sistemas de lagunas convencionales (USEPA, 2000). Estos deben ser instalados sobre superficies de terrenos con alto grado de impermeabilidad, para evitar infiltraciones de contaminantes a los mantos freáticos. El grado de impermeabilidad se puede medir mediante el coeficiente de permeabilidad (K). El método Porchet es frecuentemente utilizando en campo para cuantificar la tasa de descenso de un nivel de agua dentro de una perforación con dimensiones estandarizadas, así mismo, existen suelos con distintos grados de permeabilidad, según la velocidad con la que el agua puede moverse a través de ellos. La permeabilidad se mide generalmente en cm/s y se asocia con el coeficiente de permeabilidad (K), por tanto, los terrenos

Figura 1. Principales tipos de humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas.



Fuente: Sánchez *et al*. (2021)

naturales adecuados para la instalación de HC son los que presentan baja permeabilidad (K igual o menor a 0.00001 cm/s), como arcillas arenosas, limos arcillosos y suelos altamente compactos.

Por otra parte, en los HC de flujo sub-superficial (HCSS), el agua no está en contacto con la atmósfera, sino que se encuentra en el sustrato, donde se realizan las reacciones biológicas debido a la actividad de los microorganismos. Estos pueden requerir menos terreno que los HCS para tratar la misma cantidad de aguas residuales, y básicamente consisten en canales de poca profundidad, con un sustrato para las raíces de las plantas macrófitas emergentes; tales plantas proporcionan sombra que evita el crecimiento de algas (Martínez, 2014).

Las principales ventajas y desventajas entre los sistemas de tratamiento mediante HC y las plantas de tratamiento para aguas residuales convencionales son las siguientes:

1) Sus requerimientos de electricidad, equipos mecánicos y personal capacitado son mínimos.

2) Los costos de construcción, operación y mantenimiento son considerablemente menores; al rededor del 65% (De Anda y López, 2015).

3) Pueden ser utilizados como tratamientos complementarios para aguas residuales de origen diferente al doméstico, cuando las condiciones climatológicas como la temperatura sean adecuadas; entre 20 y 30°C (Conagua, 2016).

4) La producción de biosólidos (lodos orgánicos), es mínima, en referencia a tratamientos convencionales como biofiltros y lodos activados (Hoffmann *et al*., 2011).

5) Presentan alta taza para la remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), metales y compuestos orgánicos, del orden de entre el 50 al 80% (Castañeda, 2021). Sin embargo, para la disminución del contenido de nitrógeno y fósforo se requieren mayores periodos de retención (Mander *et al*., 2021).

6) En general, no producen problemas de mosquitos u otros insectos, ya que el agua no se encuentra directamente en contacto con la atmósfera.

Algunas de sus desventajas son: a) requieren grandes extensiones de terrenos principalmente para remover nitrógeno y fósforo, b) tanto los fosfatos, los metales como algunos compuestos orgánicos persistentes se acumulan con el tiempo en los sedimentos, c) las bajas temperaturas ocasionan una disminución en la remoción de la DBO (Kadlec *et al*., 2009).

El principal objetivo del presente estudio consistió en evaluar la capacidad para la disminución de contaminantes en dos sistemas para el saneamiento y reúso de aguas residuales que incluyen HC, uno con capacidad de 1.5 y otro de 7 litros por segundo (LPS), de reciente instalación en un municipio de Los Altos-Norte del estado de Jalisco, México, mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida de cada sistema de tratamiento.

Materiales y métodos

En el presente estudio se evaluaron dos sistemas para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico que incluyen HC, de reciente instalación (Agosto/2023), localizados en la región Altos-Norte, del estado de Jalisco. Estos sistemas estan conformados por las siguientes etapas: pretratamiento, HC con flujo sub-superficial (HCSS), y post tratamiento, con capacidad para 1.5 y 7 LPS respectivamente, instalados en la cabecera municipal de San Diego de Alejandría (SDA), la cual se encuentra en las coordenadas 20°59′29.76″ latitud norte y 101°59′24.00″ de longitud oeste, a una altura de 1,939 metros sobre el nivel del mar (msnm). Este municipio colinda al norte con el municipio de Unión de San Antonio, al sur con el municipio de Arandas, al este con el estado de Guanajuato y al oeste con el municipio de San Julián. La mayor parte del municipio tiene un clima semicálido/semihúmedo, la temperatura media anual es de 17.1°C, y su temperatura mínima y máxima promedio oscila entre los 6.1°C y 29.37°C; la precipitación media anual es de 718 milímetros (mm), mientras que la precipitación promedio acumulada es de 605.54 mm (IIEG, 2023). Según el censo de población en 2020, la población en la cabecera municipal era de 6,025 habitantes (INEGI, 2023).

Las principales fuentes de agua en el municipio son subterráneas y superficiales, su territorio se encuentra ubicado dentro de 3 acuíferos, de los cuales el 100 % no tienen disponibilidad, ya que están sobreexplotados, así mismo el 83.4 % de los ríos y embalses presentan déficit de disponibilidad (CONAGUA, 2021).

Las aguas residuales colectadas en la cabecera municipal de SDA, ascienden en promedio a más de 8.5 LPS, divididos en dos colectores principales (con capacidades de 1.5 y 7 LPS), por lo general los caudales generados son mayores durante el día; ambos colectores descargan por gravedad en dos predios diferentes localizados en la periferia de la zona urbana de la población de SDA (Figuras 2 y 3).

En estos predios se instalaron los dos sistemas de tratamiento mediante HCFSS de flujo horizontal (Tabla 1), iniciando operación en agosto del 2023, los cuales se encuentran conformados por:

I) Pre-tratamiento: para la separación y retención de sustancias ligeras por flotación, (grasas, aceites, plásticos, entre otros), y de materiales pesados por sedimentación (metales, arenas, etc.).
II) Celda con geomembrana para el HCFSS: con tezontle rojo como sustrato y especímenes de plantas endémica de la región como el Tule (Typha latifolia).
III) Post-tratamiento: conformado por la etapa de cloración y un embalse con geomembrana para estabilización microbiológica.

Figura 2. Laguna de captación para las aguas residuales en la población de San Diego de Alejandría (HC1).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Laguna de captación para las aguas residuales en la población de San Diego de Alejandría (HC2).



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Descripción de los sistemas de tratamiento mediante humedales construidos con flujo sub-superficial evaluados.

Localización	**Clave**	**Capacidad** (LPS)
Municipio de San Diego de Alejandría	HC1	1.5
Municipio de San Diego de Alejandría	HC2	7.0

LPS = litros por segundo

Los principales parámetros cuantificados fueron: demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (Nt), fósforo total (Pt), y conductividad específica (CE), tanto a la entrada como a la salida de cada sistema, para determinar los porcentajes de reducción de cada contaminante; los periodos de tiempo que el agua cruda permaneció en los dos HC (tiempo de retención hidráulica), fue de 2.5 a 4 días.
Tanto para la toma de muestras de agua, como para las determinaciones analíticas en el laboratorio, se consideraron las técnicas y procedimientos contenidas en la normatividad oficial vigente en México, así como en las recomendaciones técnicas establecidas por el manual de métodos estándar para análisis de aguas y aguas residuales (APHA, 2017), utilizando los siguientes equipos marca HACH: medidor portátil modelo SensION+ EC5 con sonda 5060, reactor digital modelo DRB200 y fotómetro modelo DR 2800

Resultados

Los tiempos de retención hidráulica en ambos sistemas de tratamiento fueron de 2.5 a 4 días, la temperatura promedio en el periodo de muestreo fue de 22°C, con humedades relativas promedio del 45%, los muestreos y análisis de laboratorio se realizaron de mayo y junio del 2024.
Los resultados de los análisis realizados corresponden tanto a la entrada (agua cruda), como a la salida (agua tratada), de cada sistema de tratamiento, y el porcentaje de reducción correspondiente para cada parámetro (Tabla 2). Estos resultados al ser puntuales, y carecer de un número de repeticiones mínimas estadísticas, son referenciales.

Discusión

Los rendimientos observados en los sistemas de tratamiento HC1 (Figura 4: Sistema de tratamiento para 1.5 LPS ubicado a 2.5 Km de SDA), y HC2 (Figura 5: Sistema de tratamiento para 7 LPS localizado a 4.5 Km de SDA), concuerdan con otros estudios realizados en la región; por ejemplo, con los HC de las poblaciones de Ojo Zarco (municipio de Jesús María), y el de Martínez Valadez (municipio de Arandas), los cuales también utilizan

Tabla 2. Resultados de las evaluaciones paramétricas y porcentajes de reducción en los humedales construidos con flujo sub-superficial evaluados.

Parámetro (unidad)	DQO (mg/L)			Nt (mg/L)			Pt (mg/L)			CE (µS/cm)		
	E	S	%R	E	S	%R	E	S	%R	E	S	%R
HC1	464	22	95.26	47	13	72.34	4.1	1.1	73.17	1148	110	90.42
HC2	917	175	80.92	68	28	58.82	10.65	5.18	51.36	1188	236	80.13
Referencia		**120**			**15**			**5**			**250**	

Nota: E=Entrada, S=Salida, %R=Porcentaje de reducción.

Figura 4. Sistema de tratamiento HC1 en San Diego de Alejandría.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Sistema de tratamiento HC2 en San Diego de Alejandría.



Fuente: Elaboración propia

macrófitas y tezontle como sustrato en sus HC, reportando periodos de contacto promedio de 4.4 días y en un rango de temperaturas de 12 a 25°C, con reducciones de contaminantes en las aguas tratadas del orden de 50 al 86% en la DQO, del 72 al 88% en Nt, del 63 al 82% de Pt y del 75 al 92% en CE (Castañeda, 2021).

Así mismo, en experiencias tratando aguas residuales domésticas mediante macrófitas acuáticas (*Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia*), en HC de flujo libre, se reportan eficiencias de remoción del 96% para la DQO, de 97% para el Nt y del 93% para el Pt. Resultados que superan las remociones observadas en el presente estudio, lo que sugiere que tanto el tipo de flujo en el HC, como los especímenes vegetales empleados influyen significativamente en la eficiencia del tratamiento (Estrada *et al*., 2025). Por otra parte, en la evaluación de un HCSS piloto de flujo horizontal, construido con carbón mineral y utilizando vegetación macrófita ornamental (*Zantedeschia aethiopica*), operado con cargas hidráulicas de 480 m^3/ha día y TRH de 4 días, generó remociones promedio superiores al 85% en turbiedad, sólidos suspendidos, coliformes fecales y totales; remoción de: Nt de 56%, Pt de 27%, DQO del 70% y DBO del 82% (Romero y Díaz, 2013).

Escalante y Fajardo (2022), afirman que "Los humedales artificiales permiten crear nuevas dinámicas económicas, culturales y ambientales que favorecen los campos de investigación en torno al uso de la fitorremediación como tratamiento complementario para las plantas tratadoras de aguas residuales (PTAR), además de transformar la materia residual en energía que pueda utilizarse en otros ámbitos económicos, con el fin de crear nuevos mercados en zonas de bajos recursos, como son las zonas rurales de muchos países, incluyendo a Latinoamérica".

Conclusiones

Al observar reducciones importantes en todos los parámetros evaluados, resaltando el sistema de tratamiento HC1, y ser además resultados compatibles con otras investigaciones, indica que los tratamientos de aguas residuales domesticas mediante HC son altamente eficientes en la remoción de contaminantes. Asimismo, se observó que existen factores como el tipo de planta utilizada, el diseño del humedal y las condiciones operativas que pueden influir significativamente en la eficiencia del tratamiento.

Considerando tanto los costos de instalación, como los requerimientos operativos de los sistemas para el saneamiento de aguas residuales domésticas con HC, estos sistemas presentan una alternativa económicamente viable y ambientalmente sustentable, principalmente para poblaciones rurales que dispongan de terrenos adecuados y condiciones climatológicas favorables. Cabe hacer mención que, aunque el mantenimiento de estos sistemas alternativos es considerablemente menor al de tratamientos convencionales, es necesario realizarlo de manera regular, principalmente extrayendo los sedimentos y materiales flotantes en los pre-

tratamientos, así como retirar periódicamente la biomasa y vegetación excesiva en las celdas de los humedales para evitar cortos circuitos en el flujo del agua, asegurando los periodos de contacto adecuados, principalmente en temporadas de menor temperatura ambiental.

En síntesis, estos sistemas de tratamiento alternativo son modelos reproducibles ya que son viables, tanto económica como ambientalmente, principalmente para poblaciones con disponibilidad de terrenos y condiciones climatológicas adecuadas.

Agradecimientos

Manifestamos nuestro reconocimiento para: el Centro de Estudios para la Agricultura, la Alimentación y el Cambio Climático (CEAACC-CUAltos), al Cuerpo Académico UDG-561 "Gestión Integral del Agua", al Laboratorio para Análisis de Aguas (CUAltos), a la Junta Intermunicipal de Medio Ambiente de Altos-Norte (JIAN), al municipio de San Diego de Alejandría (Jalisco) y en especial a Diageo México por el apoyo financiero para la instalación de los dos sistemas de tratamiento en SDA.

Referencias

APHA. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC: American Public Health Association.

Castañeda, A. 2022. Experiencias en la utilización de humedales artificiales para el saneamiento de aguas residuales domesticas en poblaciones rurales. En *Ambiens Techné Et Scientia México*, 10(2), 207-220 Disponible en: https://atsmexico.org/atsm/article/view/125/94 [Consultado: 11 de mayo, 2024].

Castañeda, A. 2021. Evaluación de Humedales Construidos en Los Altos de Jalisco: Los casos de Jesús María (Ojo Zarco) y Arandas (Martínez Valadez). En *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, BUAP. México. Disponible en: https://rlac.baup.mx/sites/default/fi2012%2830%29-6pdf [Consultado: 15 de mayo, 2024].

CONAGUA. 2021. *Estadísticas del Agua en México*. Disponible en: ttps://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf [Consultado: 28 de mayo, 2024].

CONAGUA. 2016. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, México. Disponible en: https://agua.org.mx/biblioteca/manual-de-agua-potable-alcantarillado-y-saneamiento-diseno-de-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales-humedales-artificiales/ [Consultado: 15 de agosto, 2024].

CONAGUA. 2015. Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Edición 2015. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/108998/DSAPAS_2015.pdf [Consultado: 9 de mayo, 2025].

De Anda, J., López, A. 2015. Humedales artificiales como una alternativa costo-efectiva para disminuir la huella hídrica gris en los países con economías emergentes. Comisión Estatal del Agua del estado de Jalisco, México. Disponible en: https://www.ceajalisco.gob.mx/sites/MicrositioCAA/docs/2015/05_humedales_artificiales.pdf [Consultado: 15 de agosto, 2024].

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, F., Andrade, M. 2010. *Depuración de Aguas Residuales por medio de Humedales Artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Bolivia.

Escalante, S., Fajardo, J. 2022. Evaluación de la descontaminación de la cuenca media del río Bogotá y alternativas de solución con humedales artificiales. *Inventum*, vol. 17, n.º 33, pp. 27-43. Disponible en: doi: 10.26620/uniminuto.inventum.17.33.2022.27-43

Estrada, N., López, G., Solís, R., Bautista, R., Torres, C. 2025. Remoción de nutrientes de aguas residuales domésticas con Sagittaria latifolia y Sagittaria lancifolia en humedales artificiales de flujo libre. CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 14(27). Disponible en: https://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/128 [Consultado: 9 de mayo, 2025].

Fernández, J., De Miguel, E., De Miguel, J., Curt, M. 2014. Manual de Fitodepuración. *Filtros de macrófitas en flotación*. Proyecto LIFE. Universidad politécnica de Madrid. Disponible en: https://fundacionglobalnature.org/wp-ontent/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf [Consultado: 15 de junio, 2024].

HACH. 2018. *Catálogo de productos y accesorios*. Disponible en: https://latam.hach.com/quick.search-download.search.jsa?keywords=DR2800 [Consultado: 28 de mayo, 2024].

Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., Von Muench, E. 2011. Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. Agencia de Cooperación Internacional de Alemania (GIZ), Programa de Saneamiento Sostenible (ECOSAN). Disponible en: https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Revision-T--cnica-de-Humedales-Artificiales.pdf [Consultado: 14 agosto, 2024].

IIEG. 2023. *Municipios de Jalisco*: San Diego de Alejandría. Disponible en: https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2023/08/San-Diego-de-Alejandr%C3%ADa-1.pdf. [Consultado: 12 de mayo, 2024].

IMTA. 2014. Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Disponible en: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/common/downloads/publication.pdf [Consultado: 9 de mayo, 2025].

INEGI. 2023. *Censo de Población y Vivienda 2010 y 2020*. Fuente IIEG en base a INEGI. Disponible en: https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/jal/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=14 [Consultado: 12 de junio, 2024].

Kadlec, R. 2019. Treatment marshes for runoff and polishing. First edition. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group.

Kadlec, R. Wallace, S. 2009. *Treatment Wetlands*. 2da ed. CRC Press. USA.

Mander, U., Tournebize, J., Espenberg, M., Chaumont, C., Torga, R. 2021. High denitrification potential but low nitrous oxide emission in a constructed wetland treating nitrate-polluted agricultural run-off. Science of the Total Environment, 779, pp.146-614. Disponible en: https://hal.inrae.fr/hal-03196988v1/file/Mander_etal_high_denitrificstion_potential_AAM.pdf [Consultado: 20 de agosto, 2024].

Martínez, P. 2014. Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas. Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología, p 495. Universidad de Murcia, España.

Martínez, Y., Villalejo, V. 2018. La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, *39*(1), 58-72. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311363/NOM_003_SEMARNAT.pdf [Consultado: 12 de mayo, 2024].

Kumar, R., Ivy, N., Bhattacharya, S., Dey, A., Sharma, P. 2022. Coupled effects of microplastics and heavy metals on plants: Uptake, bioaccumulation, and environmental health perspectives. Science of the Total Environment, 836. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722027152 [Consultado: 12 de mayo, 2024].

Romero, J., Díaz, C. 2013. Evaluación de la remoción de DBO, DQO, SST, NTK, PT y CF en un humedal de flujo subsuperficial construido con carbón mineral y cultivado con Zantedeschia aethiopica. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, vol. 23, p. 29-37. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Disponible en: https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2273 [Consultado: 9 de mayo, 2025].

Toledo, A. 2002. El agua en México y el mundo. Gaceta bilógica 64: p.10., INE-Semarnat México. Disponible en:https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/gacetas/GE64.pdf [Consultado: 12 de mayo, 2024].

USEPA. 2000. Humedales de flujo libre superficial. Folleto informativo de sistemas descentralizados: tecnología de aguas residuales. Environmental Protection Agency. USA. p. 10.

Vymazal, Jan. 2008. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. Proceedings of Taal 2007. 965-980. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228407635_Constructed_Wetlands_for_Wastewater_Treatment_A_Review [Consultado: 28 de mayo, 2024].