



<https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2023.03.06>

Versión en español

Tratamiento de aguas residuales domésticas en humedal del Barrio Santiaguito, Texcoco de Mora, México

Beatriz Hernández-Alonso¹; Langen Corlay-Chee^{2*}; Erica Morales-Hernández¹; Santos Vázquez-Cervantes³; Alejandro Hernández-Tapia⁴; Angelina Chamizo-Checa⁵

¹Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación, carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco Edo. de México, C. P. 56230.

²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco Edo. de México, C. P. 56230.

³Proyecto Municipal Tratamiento de Aguas Residuales de la comunidad de Santiaguito, Texcoco de Mora, México.

⁴Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Agroecología, carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco Edo de México, C. P. 56230.

⁵Universidad Autónoma de Tlaxcala, carretera Federal San Martín-Tlaxcala, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Mariano Matamoros Periferia, C. P. 90120 Villa Mariano Matamoros, Tlaxcala.

Historial del artículo:

Recibido: 6 de julio, 2023.

Aceptado: 18 de diciembre, 2023

*Autor de correspondencia:

lcorlayc@chapingo.mx

Resumen

Para el tratamiento de las aguas residuales se pueden emplear métodos físicos, químicos o biológicos. Los humedales artificiales son sistemas construidos específicamente para el tratamiento de las aguas residuales creando un panorama similar a las funciones de los humedales naturales, optimizando los procesos que permite la remoción de los contaminantes. El objetivo de este trabajo fue determinar la eficiencia del humedal del Barrio Santiaguito, localizado en Texcoco de Mora, México y la calidad del agua tratada de acuerdo a los indicadores establecidos por las NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-003-SEMARNAT-1997, con la finalidad de proponer alternativas para mejorar los procesos de tratamiento. Se obtuvieron eficiencias en remoción de 100 % para bacterias coliformes totales (CT) y fecales (CF), 57.7 % en Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), 98.47 % en sólidos sedimentables (SS), 60.25 % en nitrógeno total y solo 22.92 % para sólidos suspendidos totales (SST). Por lo anterior, se concluye que existe restricción por SST en la descarga de las aguas residuales tratadas, por lo que se proponen como alternativas para mejorar los procesos de tratamiento, el reducir el número de especies vegetales presentes y darles mantenimiento mediante podas periódicas, así como lavado o cambio de material filtrante y dar seguimiento a la eficiencia del humedal mediante muestreos en diferentes horarios y épocas del año.

► **Palabras clave:** Coliformes fecales, humedal artificial, demanda química de oxígeno, contaminantes, calidad del agua.

Introducción

De acuerdo con la CONAGUA (2022), en 2021 se captaron 215.4 m³·s⁻¹ de aguas residuales de origen doméstico; de las cuales, solo 145.3 m³·s⁻¹ recibieron tratamiento en 2 872 plantas, lo que significa que solo 67 % recibe algún tratamiento antes de verterse a ríos, mares y suelo. A decir de Arellano-García (2022), en México se generan 312 000 L·s⁻¹ o 312 m³·s⁻¹ de agua residual, los cuales están compuestos en 99.9 % de agua y 0.1 % son sólidos; lo que representa 31.2 m³·s⁻¹ de sólidos con potencial contaminante. De ahí que el tratamiento de agua residual se fundamenta en la reducción de los materiales orgánicos y minerales, ya sea disueltos o en suspensión. Los procesos de tratamiento se clasifican en tres niveles: 1) primario, para eliminar partículas que

por su dimensión (mayor a 0.1 mm) puedan obstruir los procesos posteriores; 2) secundario, para reducir impurezas de tamaño mucho menor (materiales orgánicos coloidales y disueltos) con métodos mecánicos y biológicos combinados; 3) terciario, para remover materiales disueltos como gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus, a través de la combinación de procesos biológicos, físicos y químicos (Bucio, Pérez y Cervantes, 2018).

La mayoría de las plantas de tratamiento tienen altos costos, tanto de construcción como de operación y mantenimiento, además de requerir alto consumo de energía; por lo que, en comunidades pequeñas o rurales, las aguas residuales son descargadas a cielo abierto o en lagos, lagunas, ríos, o el mar (Vidal-Álvarez, 2018). Un humedal es un cuerpo de agua

Please cite this article as follows (APA 7): Hernández-Alonso, B., Corlay-Chee, L., Morales-Hernández, E., Vázquez-Cervantes, S., Hernández-Tapia, A., & Chamizo-Checa, A. (2023). Treatment of domestic wastewater in the wetland of Santiaguito, Texcoco de Mora, Mexico. *Current Topics in Agronomic Science*, 3(2)39-46. <https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2023.03.06>

permanente o estacional de baja profundidad (Richardson et al., 2022). Los humedales ocurren por la presencia de agua estancada o que fluye muy lentamente. La escasa profundidad posibilita el desarrollo de vegetación, ya sea hidrófita o freatofita, incluso durante periodos de sequía prolongada (Rodrigues et al., 2021). Los humedales se conocen a menudo como los riñones de la Tierra y mantienen funciones como el sostenimiento del equilibrio ecológico, el mantenimiento de la biodiversidad, la conservación del agua, la prevención de sequías, la regulación del clima y la degradación de la contaminación (Zhu et al., 2023).

Un humedal artificial es un sistema orgánico de tratamiento de aguas residuales que imita y mejora la eficacia de procesos que ayudan a purificar el agua de manera similar a los humedales naturales. El sistema utiliza plantas acuáticas, microorganismos naturales y un lecho filtrante (Hota et al., 2023; Kharwade et al., 2021). El uso de humedales artificiales puede ser amplio e incluye la remoción de cualquier residuo que es vertido en ecosistemas acuáticos (Maldonado y Balagurusamy, 2022; Zhang et al., 2023). Estos sistemas no requieren energía eléctrica, ni equipos costosos para su funcionamiento y, por ser sistemas naturales, sus costos de mantenimiento (Salah et al. 2023) son menores que los de cualquier sistema convencional, convirtiéndose en una opción para comunidades pequeñas y zonas rurales (Hota et al., 2023).

Los humedales artificiales han adquirido importancia para el tratamiento de residuos, en tanto que se diseñan para utilizar procesos naturales que involucran la vegetación, los suelos y sus conjuntos microbianos asociados para lograr la eliminación de contaminantes (Salah et al., 2023). De acuerdo con Hota et al. (2023), en un humedal artificial ocurre la combinación de sustratos, microbios y plantas para que el sistema funcione como un filtro y purificador. Para lograr la sedimentación de sólidos, se frena el agua cuando ésta ingresa al humedal. Las raíces de las plantas y el sustrato del humedal filtran las partículas de aguas residuales más grandes a medida que el agua se mueve sobre ellas. Posteriormente, las bacterias y las plantas descomponen y absorben naturalmente los contaminantes y nutrientes presentes en las aguas residuales, eliminándolos. Los patógenos presentes en las aguas residuales también son eliminados por la radiación ultravioleta, los antibióticos secretados por las plantas y la duración de la retención en el humedal, que varía según el diseño y el nivel de calidad deseado. El agua puede descargarse de manera segura en vías fluviales superficiales o usarse para una variedad de propósitos después de ser tratada. Los humedales artificiales eliminan algunos antibióticos como triclosán (100 %), enrofloxacin (99.8 %), metronidazol (99 %), tetraciclina (98.8 %), clortetraciclina (98.4 %), levofloxacin (96.69 %) y sulfametoxazol (91.9 %), entre otros, según Ohore et al. (2022).

Este trabajo estuvo enfocado al tratamiento de aguas residuales domésticas generadas por la comunidad del

Barrio Santiaguito, Texcoco de Mora, México. Las aguas residuales han sido el resultado de una combinación de diversas actividades humanas como aguas de cocina y aguas negras, con una composición muy variable. Este barrio, ubicado en el municipio de Texcoco de Mora, México, con una población de 1 200 habitantes y extensión de 139 ha, enfrentaba la problemática de la generación de aguas residuales. Lo anterior puso en evidencia la necesidad de darles tratamiento, con el objetivo de producir agua limpia reutilizable y disminuir los daños que se estaban generando en la salud de la población. La reutilización de las aguas residuales del Barrio de Santiaguito permitió la creación de áreas verdes en la comunidad, así como conducción a los canales colectores de aguas. El objetivo de este trabajo fue determinar la calidad del agua residual en la entrada y en la salida del humedal, con la finalidad de evaluar la eficiencia de remoción de los contaminantes, para generar alternativas que permitan mejorar el sistema de tratamiento.

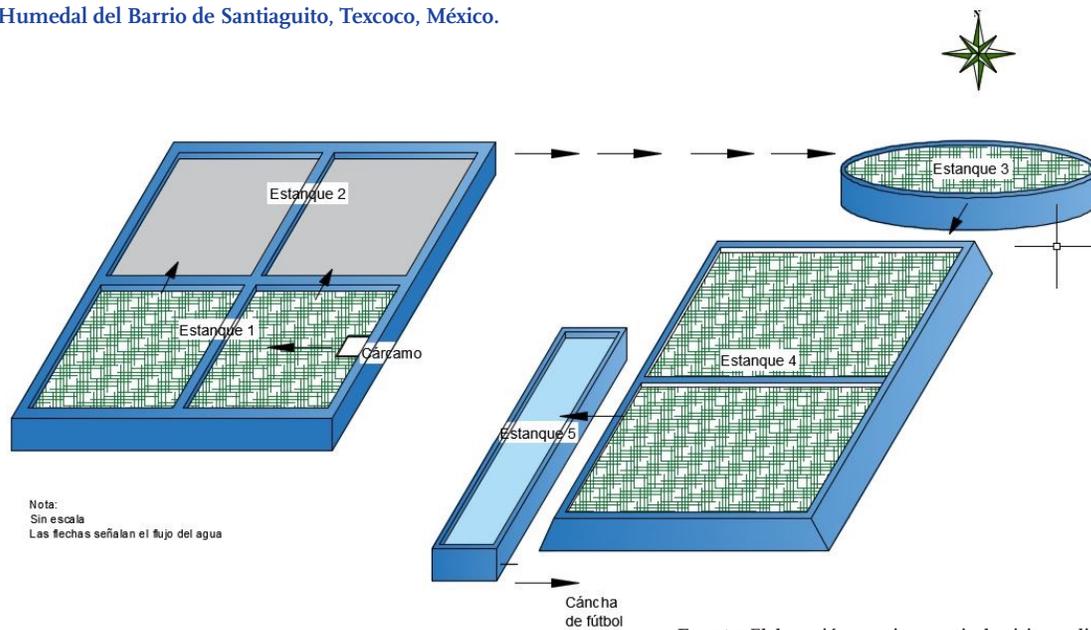
Materiales y métodos

Área de estudio

El Barrio Santiaguito está ubicado dentro del municipio de Texcoco de Mora, Estado de México, con coordenadas 19° 31' 25.88" N y 98° 52' 17.29" O. Al norte colinda con la comunidad de San Simón, al sur con la Alameda Texcoco, al poniente con la comunidad Tulantongo y al oriente con la comunidad la Resurrección, encontrándose a una altitud de 2 258 msnm.

El humedal consta de cinco estanques interconectados entre sí, para que el agua fluya por gravedad en una sola dirección (Figura 1). Cada estanque cuenta con dos compartimentos, uno con material filtrante grueso y un segundo con material filtrante de menor granulometría, por lo que el movimiento del agua, de un estanque a otro, es horizontal superficial, mientras que, de un compartimento a otro, es subsuperficial y vertical. Las aguas residuales procedentes de los hogares y negocios del Barrio Santiaguito se concentran en un cárcamo y, a través de una reja que funciona como retenedor de sólidos, pasan al Estanque 1, que funciona como un biodigestor anaeróbico con plantas acuáticas de *Eichhornia crassipes*. De ahí, fluyen al Estanque 2, cuyos dos compartimentos, rellenos con tezontle de distintas granulometrías, están separados por una pared con orificios inferiores que permiten el movimiento ascendente del agua. Posteriormente, las aguas pasan al Estanque 3, plantado con *Zantedeschia aethiopica* L., *Scirpus holoschoenus* y *Typha latifolia*. En el primer compartimento, el agua se filtra a través de tezontle grande (8-10 mm) y en el segundo compartimento, con tezontle más fino (2-4 mm). Del Estanque 3 pasa al Estanque 4 que funciona como un biofiltro, pues sus dos compartimentos cuentan con arena (8 mm) de río y plantas de *Zantedeschia aethiopica* L. Finalmente, el agua llega al Estanque 5, con capacidad de 120 000 L, donde se capta el agua tratada y se le da cloración.

Figura 1. Humedal del Barrio de Santiaguito, Texcoco, México.



Fuente: Elaboración propia a partir de visita realizada al humedal.

Toma y conservación de muestra

La recolección de muestras del humedal artificial del Barrio Santiaguito se efectuó por triplicado, en cuatro sitios. El sitio 1 se localizó en el afluente del cárcamo, es decir, en la zona receptora de las aguas residuales domésticas. El sitio 2 correspondió al Estanque 2, donde las aguas residuales habrán recibido un tratamiento previo (sin sólidos gruesos, disminución de contaminantes). El sitio 3 se ubicó en el Estanque 4, donde las aguas pasaron por todos los procesos de tratamiento con base a las funciones de las especies fitodepuradoras. El sitio 4 se ubicó en el Estanque 5 que opera como colector del agua tratada (Figura 1).

Parámetros analizados y métodos empleados

Las determinaciones realizadas a las muestras de agua residual antes y después de su tratamiento en el humedal, así como la metodología empleada se muestra en el Cuadro 1.

Calidad para uso como agua residual tratada o en descargas

Para establecer la calidad, se analizó si el valor de cada parámetro medido estaba dentro de los límites permisibles para agua residual tratada establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998).

Eficiencia en remoción de contaminantes

Para calcular la eficiencia de remoción en forma porcentual de cada uno de los parámetros evaluados, se utilizó la Ecuación (1), donde A es el valor del parámetro en el afluente y B el valor en el efluente (Singh et al., 2023):

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{A - B}{A} * 100 \quad (1)$$

Análisis estadístico

A los resultados obtenidos en las muestras colectadas en las diferentes etapas del procesamiento del agua residual, para medir la variación espacial, se les aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 0.05 y una separación de medias de Tukey, con el software InfoStat 2020e (Di Rienzo et al., 2008).

Resultados y discusión

En el Cuadro 2 se muestran las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales colectadas en el humedal del Barrio Santiaguito, Texcoco, así como la eficiencia en remoción para cada parámetro evaluado. En tanto, en el Cuadro 3 se presenta la concentración de metales pesados. Cabe mencionar que, al no encontrarlos en el afluente, no se analizó el efluente para optimizar recursos económicos.

Temperatura y pH

La temperatura promedio del agua residual se encontró alrededor de 20 °C, sin existir diferencias estadísticas significativas en los cuatro sitios de muestreo del humedal. El pH se mantuvo ligeramente alcalino, con diferencias estadísticamente significativas. Fue mayor al término del proceso de depuración en el humedal (efluente) que al inicio (afluente). El afluente presentó pH de 7.55 y el efluente de 8.06. Valores similares de pH en humedales artificiales plantados con *Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia* para el tratamiento de aguas residuales domésticas reportan

Cuadro 1. Parámetros analizados en muestras de agua residual en el humedal de barrio Santiaguito, Texcoco.

Parámetro	Método	Referencia
Temperatura (°C)	Potenciómetro	NMX-AA-007-2013
pH	Potenciómetro	NMX-AA-008-2016
Conductividad eléctrica (CE)	Potenciómetro	NMX-AA-093-2018
Bacterias coliformes totales (CT) y Fecales (CF)	Número Más Probable (NPM)	NMX-AA-042-2015
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Detección Espectrofotométrica a 600 nm	NMX-AA-030-2012
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Yodométrico	NMX-AA-028-2001
Metales (Cd, Ni, Pb, Cr, Cu y Zn)	Absorción atómica	NMX-AA-051-2016
Sólidos suspendidos totales (SST)	Gravimétrico	NMX-AA-034-2015
Nitrógeno total (N total)	Digestión con Persulfato	NMX-AA-026-2010
Fósforo total (P total)	Cloruro estañoso	NMX-AA-029-2001

Fuente: Elaboración propia con información de Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF 2022) y Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF 1998).

Gallegos-Rodríguez et al. (2018), quienes obtuvieron valores de pH de 7.7 ± 0.1 y 7.5 ± 0.1 , respectivamente. Modini et al. (2023) también encontraron similares valores de pH (7.6 a 7.8), sin diferencia estadísticamente significativa entre afluente y efluente. En cuanto a calidad, los valores encontrados en ambos parámetros están dentro de la normatividad establecida por la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF 2022), misma que establece límites de temperatura en 35 °C y de pH entre 6 y 9 unidades. A pesar de las diferencias estadísticamente significativas, la eficiencia en remoción es mínima.

Conductividad eléctrica (CE)

La NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF 2022) no establece límites máximos permisibles para este parámetro. Con excepción del Estanque 2, los valores promedio de CE en los sitios evaluados no tuvieron diferencias estadísticas significativas. Parra (2020), refiere valores de $1.8 \pm 0.9 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ en humedales artificiales con *Hydrocotyle bonariensis* Lam. y *Typha latifolia* L. construidos con fines de remoción de plomo. La eficiencia en remoción de sales es mínima (2.4 %) y con base en Teixeira et al. (2020) se atribuye a que la evapotranspiración de las plantas presentes en el humedal favorece la acumulación de sales en el agua. Pérez-Molina et al (2021) reportaron reducción de la CE de 22.4 y 15 % en humedales sin y con plantas de *Pennisetum*, respectivamente.

Sólidos suspendidos totales

La eliminación de sólidos se da por sedimentación y filtración, ya que la velocidad del agua dentro del humedal es reducida por la presencia de raíces de las macrófitas y el material filtrante. En este estudio, la eficiencia en remoción de sólidos suspendidos totales (SST) fue de 22.9 %, al reducirse de $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ en el cárcamo a $462.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ en el Estanque 5 (Cuadro 2), sin mostrar diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0.05$). El valor promedio de sólidos

suspendidos totales (SST) encontrado en el agua residual tratada por el humedal (Cuadro 2) no cumple con la normatividad establecida en las NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF 2022) y NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF 1998) para su descarga en cuerpos receptores, alcantarillado o reúso, respectivamente.

La remoción de sólidos suspendidos totales (SST) de apenas 22.9 % (Cuadro 2) puede indicar saturación del material filtrante y, por tanto, pérdida de su capacidad de retención de sólidos. Josimov-Dundjerski et al. (2015) reportaron eficiencia de 93-96 % en remoción de sólidos suspendidos, 65 % de SST, mientras que Hadad et al. (2011) obtuvieron una remoción del 30 %, lo cual fue cercano al del humedal de Santiaguito.

Demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Por su DQO, el efluente del humedal de Santiaguito en Texcoco de Mora, México, se encuentra dentro de los límites permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022) y puede ser vertido en ríos, arroyos, canales, drenes, embalses, lagos, lagunas, zonas marinas mexicanas; o bien, usarse en riego de áreas verdes y cualquier tipo de suelo. Sin embargo, por su DBO₅, superior a $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, no se le puede dar uso para llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines, incluso de camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad o panteones, de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998).

En el Cuadro 2 se muestra que el humedal de Santiaguito presenta una eficiencia de 57.7 % en remoción de la de-

Cuadro 2. Composición físico-química de las aguas residuales muestreadas en cuatro sitios o estanques de tratamiento en el humedal del barrio Santiaguito, Texcoco y eficiencia en remoción

Parámetro	Unidades	Cárcamo	Estanque 2	Estanque 4	Estanque 5	Eficiencia en remoción (%)
Temp.	°C	20.20 ± 0.08 a	20.27 ± 0.08 a	20.23 ± 0.08 a	20.23 ± 0.08 a	-
pH		7.55 ± 0.04 b	7.07 ± 0.04 c	7.49 ± 0.04 ba	8.06 ± 0.04 a	-
CE ¹	mS·cm ⁻¹	0.82 ± 0.01 a	0.75 ± 0.01 b	0.80 ± 0.01 a	0.80 ± 0.01 a	2.4
SST	mg·L ⁻¹	600.00 ± 41.58 a	415.00 ± 41.58 ab	410.83 ± 41.58 b	462.50 ± 41.58 ab	22.9
DQO	mg·L ⁻¹	169.08 ± 11.50 a	153.90 ± 11.50 a	92.73 ± 11.50 b	71.51 ± 11.50 b	57.7
DBO ₅	mg·L ⁻¹	84.54 ± 5.51 a	76.95 ± 5.51 a	46.36 ± 5.51 b	35.76 ± 5.51 b	57.7
N total	mgv·L ⁻¹	48.80 ± 1.14 a	36.40 ± 1.14 b	25.00 ± 1.14 c	19.40 ± 1.14 d	60.2
P total	mg·L ⁻¹	5.60 ± 0.23 ab	5.07 ± 0.23 b	5.93 ± 0.23 a	6.20 ± 0.23 a	-
CT	NPM 100 m·L ⁻¹	2'330,766 ± 160,116 a	1'235,622 ± 160,116 b	519,803 ± 160,116 bc	0 ± 0 c	100.0
CF	NPM100 m·L ⁻¹	357,496 ± 164,963 a	310,274 ± 164,963 a	312,469 ± 164,963 a	0 ± 0 b	100.0

CE (conductividad eléctrica), Coliformes Totales (CT), Coliformes Fecales (CF), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Sólidos Suspendidos Totales (SST), NMP: Número más probable. Valores indican medias ± Error Estándar. Letras diferentes en las líneas indican diferencias estadísticas significativas con un $\alpha=0.05$. n = 3).

¹Se eliminaron los valores negativos, indicativos de que el parámetro se incrementó, en vez de reducirse.

manda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO₅). Auguet et al. (2017), en humedales de flujo libre utilizando *T. domingensis* reportaron remoción de 97.1 % en DQO y 83.4 % en DBO₅, mientras que Grinberga et al. (2021) señalaron reducción de 74 y 80 % para DQO y DBO, respectivamente, aún cuando en el humedal estudiado, por las condiciones climáticas imperantes del invierno en Polonia, de octubre a marzo, carece de vegetación.

Nitrógeno total

La NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF 2022) establece que no hay restricción alguna si el uso es para riego de áreas verdes y suelo, excepto el cárstico. Sin embargo, define a 35, 30, 35 y 30 mg de N total·L⁻¹ como límites máximos permisibles para poderse descargar en ríos, arroyos, canales, drenes, embalses, lagos, lagunas, zonas marinas mexicanas y suelo cárstico. Por lo anterior, el agua residual del Barrio de Santiaguito debe recibir tratamiento al menos hasta el Estanque 4. Por otra parte, la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF 1998), no establece límites máximos de N total en aguas residuales tratadas a usarse en actividades de contacto directo e indirecto. En cuanto a eficiencia de remoción de nitrógeno total, el humedal presenta una baja eficiencia (60.2 %), ya que otros autores refieren eficiencias de 80-90 % (Yaragal y Mutnuri, 2023; Pérez-Molina et al, 2021).

Fósforo total

De forma similar al nitrógeno total, la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF 2022) establece que no hay restricción alguna si el uso es para riego de áreas verdes y suelo, excepto el cárstico. Sin embargo, define a 21, 15, 21 y 15 mg de P total·L⁻¹ como límites máximos permisibles para su descarga en ríos, arroyos, canales, drenes, embalses, lagos, lagunas, zonas marinas mexicanas y suelo cárstico. Por ello, el agua residual del Barrio Santiaguito, Texcoco, no cuenta con restricción alguna. Cabe mencionar que se observó incremento de P total al término del tratamiento, en el Estanque 5, a pesar de las plantas de lirio, alcatraz, junco, espadaña y ombligo de venus, con que está plantado el humedal. Masharqa et al. (2023) y Tatoulis et al. (2017) refieren eficiencia en remoción de 60 y 90 % de P total, respectivamente.

Coliformes totales y fecales

La NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022) especifica que si la conductividad eléctrica es menor a 3 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ se analiza y reporta *E. coli*; pero si es mayor o igual a 3 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ se analizan y reportan *Enterococos fecales*. En este trabajo, el valor de CE no superó los 3.5 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, por lo que se analizaron coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF) como indicadores de *Enterococos fecales*. Con diferencias estadísticamente significativas, ambos pará-

metros se reducen a medida que pasan de un estanque a otro, hasta ser completamente eliminados con la cloración aplicada en el Estanque 5 y su ausencia en el efluente, revela una remoción del 100 % (Cuadro 2). Al respecto, Gallegos-Rodríguez et al. (2018) obtuvieron remoción de 99.8 % para ambos grupos de bacterias en humedales plantados con *Sagittaria latifolia* y *Sagittaria lancifolia*. Sandoval-Herazo et al. (2020) refieren remoción de CT en humedales plantados con *Canna hybrids* e *Iris germanica* para tratamiento de efluentes de industria porcina de 94 y 93 %, respectivamente. Waly et al. (2022) en revisión de humedales construidos mencionan porcentajes de remoción de 93 % y 99 % para CT y CF, respectivamente. Otros valores reportados son de 99 % para CT (Singh et al., 2023). Cabe mencionar que el tratamiento en el humedal de Santiaguito, Texcoco, genera un efluente que cumple con los límites permisibles establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF 1998); de 1 000 NMP·100 mL⁻¹ para uso agrícola; o bien, de 240 NMP·100 mL⁻¹ para servicio al público con contacto directo e indirecto.

Metales pesados

En el Cuadro 3 se observa que el contenido de metales en el cárcamo del humedal, receptor de las aguas residuales domésticas producidos por el Barrio Santiaguito, Texcoco, se encuentra dentro de los límites permisibles por la NOM-001- SEMARNAT-2021 (DOF 2022).

Cuadro 3. Concentración de metales pesados en las aguas residuales del Barrio de Santiaguito, Texcoco, antes de ser tratadas en el humedal de la localidad.

Metales	Cd	Ni	Pb	Cr	Cu	Zn
mg·L ⁻¹	0.00	0.00	0.00	0.08	0.20	0.16

Considerando los parámetros analizados, la calidad del agua residual tratada por el humedal del Barrio Santiaguito solo tiene limitaciones en cuanto a SST y DBO₅. La baja eficiencia en remoción de contaminantes puede atribuirse a la obstrucción de tuberías por crecimiento del sistema radical de las macrofitas instaladas (Masharqa et al., 2023), así como de otras especies transportadas por viento y lluvia torrenciales, además de saturación del material filtrante con el paso del tiempo (Tatoulis et al., 2017) y deficiente pretratamiento de sedimentación (Pérez-Molina et al, 2021; Singh et al, 2023).

Conclusiones

Por su DQO y concentración de metales potencialmente tóxicos, el efluente del humedal de Santiaguito en Texcoco de Mora, México, se encuentra dentro de los límites permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022) y puede ser vertido en ríos, arroyos, canales, drenes, embalses, lagos, lagunas, zonas marinas mexicanas; o bien, usarse en riego de áreas verdes y cualquier

tipo de suelo. Sin embargo, por su DBO₅, superior a 20 mg·L⁻¹ y SST, no se le puede dar uso para llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines, incluso de camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad o panteones, de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1998). El humedal del Barrio Santiaguito, Texcoco, México, presenta eficiencia para remover contaminantes, como bacterias coliformes fecales, DQO, DBO₅ y N total, en 100, 57.7, 57.7 % y 60.2 %, respectivamente, pero no para sólidos suspendidos totales (22.9 %). Se propone como alternativas para mejorar su eficiencia el cambio o limpieza del material filtrante y poda periódica del sistema radical de las macrofitas, con la finalidad de estimular la fitodepuración, disminuir el atascamiento y deterioro de las instalaciones por donde circula el efluente.

Referencias

- Arellano-García, L. A. (2022). Tratamiento de aguas residuales en México ¿Cómo vamos en 2022? Conferencia en línea Disponible en: <https://www.facebook.com/watch/?v=363059349029471> 22 de marzo de 2022 14:02 h. México: CIATEJ, A.C. CONACYT
- Auguet, S., Arreghini, S., Serafini, R. J. M., Arambarri, A., y de Iorio, A. F. (2017). Efecto del stress por plomo en *Ludwigia peploides* e *Hydrocotyle ranunculoides*. *Biología Acuática*, 32, 1–15.
- Bucio Pacheco, E., Pérez González, D. G., y Cervantes Rebolledo, V. (2018). Reporte de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Ciudad de México 2015. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. México. CDMX.
- CONAGUA. (2022). Numeragua 2022. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: [Numeragua_2022.pdf](https://www.conagua.gob.mx/numeragua_2022.pdf) (conagua.gob.mx).
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. (2008). InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- DOF. (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. México: Diario Oficial. Secretaría del Trabajo y Previsión Social.
- DOF. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. México: Diario Oficial. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Gallegos-Rodríguez, J., López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. G., y Torres-Balcázar, C. A. (2018). Evaluation of free

- flow constructed wetlands with *Sagittaria latifolia* and *Sagittaria lancifolia* in domestic wastewater treatment. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 10(2), 49-65. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.03.005>
- Grinberga, L., Grabuža, D., Grīnfelde, L., Lauva, D., Celms, A., Sas, W., Głuchowski, A., y Dziecioł, J. (2021). Analysis of the removal of BOD5, COD and suspended solids in subsurface flow constructed wetland in Latvia. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 20(4), 21–28. <https://doi.org/10.22630/ASPA.2021.20.4.31>
- Hadad, H. R., Maine, M. A., Mufarrege, M. M., Del Sastre, M. V., y Di Luca, G. A. (2011). Bioaccumulation kinetics and toxic effects of Cr, Ni and Zn on *Eichhornia crassipes*. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1–3), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.044>
- Hota, A., Gopal Krishna Patro, S., Obaid, A. J., Khatak, S., y Kumar, R. (2023). Constructed wetland challenges for the treatment of industrial wastewater in smart cities: A sensitive solution. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102967. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102967>
- Josimov-Dundjerski J., Savić R., Belić A., Salvai A., y Grabić J. (2015). Sustainability of the constructed wetland based on the characteristics in effluent., *Soil & Water Research*, 10(2), 114–120. <https://doi.org/10.17221/133/2014-SWR>
- Kharwade, A., Rathod, V. K., Makde, A. P., Badodekar, K. A., Raut, C. M., Meshram, S. D., y Sakhare, N. B. (2021). Constructed wetland for domestic waste water treatment. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 10(6), 7569–7575. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2021.1006284>
- Maldonado, L., y Balagurusamy, N. (2022). Biotransformación de antibióticos en humedales artificiales: Rol de la interacción entre microorganismos y macrófitas. *Ecología Austral*, 32(3), 1054–1069. <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.3.0.1792>
- Masharqa A., Al-Tardeh S., Mlih R., y Bol R. (2023). Vertical and hybrid constructed wetlands as a sustainable technique to improve domestic wastewater quality. *Water*, 15(19), 3348. <https://doi.org/10.3390/w15193348>
- Modini, L., Pizarro, A., y Zerbato, M. (2023). Sustainable treatment of urban wastewater using a constructed wetland coupled with a microbial fuel cell. *Ingeniería del Agua*, 27(4), 283-293. <https://doi.org/10.4995/Ia.2023.20318>
- NMX-AA-007-SCFI-2013 Análisis de agua – medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166766/nmx-aa-007-scfi-2013.pdf>
- NMX-AA-008-SCFI-2016 Análisis de agua - medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba- <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- NMX-AA-026-SCFI-2010 Análisis de agua - medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba -<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-2010.pdf>
- NMX-AA-028-2001 Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas - método de prueba <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>
- NMX-AA-029-SCFI-2001 Análisis de aguas - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba
- NMX-AA-030/1-SCFI-2012 Análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - método de prueba - parte 1 - método de refluo abierto - <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166774/NMX-AA-030-1-SCFI-2012.pdf>
- NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- NMX-AA-042-SCFI-2015 Análisis de agua - enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* – método del número más probable en tubos múltiples <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>
- NMX-AA-051-SCFI-2016 Análisis de agua - medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas método de prueba <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-051-scfi-2016.pdf>
- NMX-AA-093-SCFI-2000 Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166800/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>
- Ohore OE, Qin Z, Sanganyado E, Wang Y, Jiao X, Liu W., y Wang Z. (2022). Ecological impact of antibiotics on bioremediation performance of constructed wetlands: Microbial and plant dynamics, and potential antibiotic resistance genes hotspots. *Journal of Hazardous Materials*, 424(Pt B),127495. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127495>.
- Parra, L. R. J. (2020). Evaluación de la eficiencia de la remoción de plomo en aguas residuales del río Tarma usando *Hydrocotyle bonariensis* Lam. y *Typha latifolia* L. en humedales artificiales. Perú: Universidad Católica Sedes Sapientiae.
- Pérez-Molina, J. P., Scholz, C., Pérez-Salazar, R., Alfaro-Chinchilla, C., Abarca Méndez, A., Araya Leitón, L., Carranza Chaves, J., Echevarría Figueroa, A., Elizondo Blanco, M., Ardón Rivera, R., Flores Aguilar, S., y Solís Calderón, C. (2021). Spatial variation of physicochemical parameters in a constructed wetland for wastewater treatment: An example of the use of the R programming language. *Cuadernos*

- de Investigación UNED, 13 (1), e3294. <https://doi.org/10.22458/urj.v13i1.3294>
- Richardson, D. C., Holgerson, M. A., Farragher, M. J., Hoffman, K. K., King, K. B. S., Alfonso, M. B., Andersen, M. R., Cheruveil, K. S., Coleman, K. A., Farruggia, M. J., Fernandez, R. L., Hondula, K. L., Moreira Mazacotte, G. A. L., Paul, K., Peierls, B. L., Rabaey, J. S., Sadro, S., Sánchez, M. L., Smyth, R. L., Sweetman, J. N. (2022). A functional definition to distinguish ponds from lakes and wetlands. *Scientific Reports*, 12(1), 10472. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14569-0>
- Rodrigues, C. L., Laurencena, P., García, J. M., Gómez, N., y Kruse, E. E. (2021). Aplicación de nuevas técnicas en la caracterización de humedales relacionados con el agua subterránea. *Boletín Geológico y Minero*, 132(1-2), 7-14. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.001>
- Salah, M., Zheng, Y., Wang, Q., Li, C., Li, Y., y Li, F. (2023). Insight into pharmaceutical and personal care products removal using constructed wetlands: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 885, 163721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163721>
- Sandoval-Herazo, M., Nani, G., Sandoval-Herazo L., Rivera, S., Fernández-Lambert, G., y Alvarado-Lassman, A. (2020). Evaluation of the performance of vertical partially saturated constructed wetlands for sewage treatment swine. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23, 2, <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3138>.
- Singh, S., Upadhyay, S., Rani, A. Sharma P. K., Rawat J. M., Rawat B., Prashant., y Bhattacharya P. (2023). Assessment of pathogen removal efficiency of vertical flow constructed wetland treating septage. *Scientific Report*, 13, 18703. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45257-2>
- Tatoulis, T., Akrotos, C. S., Tekerlekopoulou, A.G., Vayenas, D. V., y Stefanakis, A. I. (2017). A novel horizontal subsurface flow constructed wetland: Reducing area requirements and clogging risk. *Chemosphere*, 186, 257-268. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.151>.
- Teixeira, D. L., Matos, A. T., Matos, M. P., Hamakawa, P. J., y Teixeira, D. (2020). Evapotranspiration of the Vetiver and Tifton 85 grasses grown in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 55(6), 661-668. DOI: 10.1080/10934529.2020.1727703
- Vidal-Álvarez, M. (2018). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 3(1-2), 41-58. <https://www.researchgate.net/publication/343485996>
- Waly, M. M., Ahmed, T., Abunada, Z., Mickovski, S. B., y Thomson, C. (2022). Constructed wetland for sustainable and low-cost wastewater treatment: Review article. *Land*, 11, 1388. <https://doi.org/10.3390/land11091388>
- Yaragal, R. R., y Mutnuri, S. (2023). Diversity and functional annotation of microorganisms in anaerobic chamber treating nitrate-rich wastewater. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(11): 311. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03750-w>. PMID: 37725182
- Zhang, W., Guan, A., Peng, Q., Qi, W., y Qu, J. (2023). Microbe-mediated simultaneous nitrogen reduction and sulfamethoxazole/N-acetylsulfamethoxazole removal in lab-scale constructed wetlands. *Water Research*, 242, 120233. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120233>
- Zhu, X., Jiao, L., Wu, X., Du, D., Wu, J., y Zhang, P. (2023). Ecosystem health assessment and comparison of natural and constructed wetlands in the arid zone of northwest China. *Ecological Indicators*, 154, 110576. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110576>