

REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE HUMEDALES BIOINGENIERILES DOMICILIARIOS CON DIFERENTE TIPO DE SUSTRATO Y SEMBRADOS CON *Strelitzia reginae*

REMOVAL OF POLLUTANTS IN WASTEWATER THROUGH HOUSEHOLD BIOENGINEERING WETLANDS WITH DIFFERENT TYPES OF SUBSTRATE AND PLANTED WITH *Strelitzia reginae*

González-Rivadeneira D.¹ Marín-Muñiz J.L.¹ Hernández-Alarcón M.H.²

¹ Maestría en Desarrollo Regional Sustentable. El colegio de Veracruz

* Carillo Puerto #26 Col Centro C.P 91000. Xalapa, Veracruz. México,
dgonzalezr.mdrs22@colver.info, jmarin@colver.info

² Red de Manejo Biotecnológico de Recursos. Carretera antigua a Coatepec 351,
El Haya, C.P 91070, Xalapa, Veracruz, México
elizabeth.hernandez@inecol.mx

Artículo Científico

Publicado: 30 abril 2024

RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales es una necesidad global y de gran interés, ya que la demanda de agua es cada vez mayor, además hay un volumen creciente de residuos biológicos y químicos que son arrojados directamente a los cuerpos de agua, lo que lleva a optar por una alternativa sustentable que remueva contaminantes del agua sin un control de operación complejo. El presente estudio tuvo como objetivo proponer y validar el uso de humedales construidos (HC) domiciliarios sembrados con *Strelitzia reginae*, una planta exótica con forma de ave para tratar aguas residuales. La etapa experimental se realizó en la localidad de Pastorías, Actopan (Veracruz) y consistió en 8 mesocosmos: 2 HC sembrados con *Strelitzia reginae* en piedra poroso de río como sustrato, 2 HC con la misma especie, pero sembrados en tezontle (piedra volcánica) y 2 HC solo

con piedras, más 2 HC solo con tezontle, como controles. Las unidades operaron de manera continua durante 6 meses (marzo-agosto). La vegetación ornamental se adaptó a las condiciones de HC, en ambos sustratos el crecimiento fue similar.

Los sustratos utilizados funcionaron similarmente en las remociones de los contaminantes, mejores resultados de remoción fueron observadas en presencia de la planta ornamental, en los mesocosmos con presencia de vegetación, tanto para sólidos totales (SST), amonio (N-NH₄), fosfatos (P-PO₄) y sulfatos (SO₄) las remociones fueron hasta de 37%, 45%, 63% y 80%, respectivamente. Los HC con plantas ornamentales pueden realizar un tratamiento eficiente en las aguas residuales domésticas. Cabe mencionar que los sustratos son de bajo costo y fácil obtención.

Palabras clave: Aguas residuales; Contaminantes; Humedales Construidos; Ornamentales; Remociones; Sustratos Locales.

ABSTRACT

Wastewater treatment is a global need and of great interest, as the demand for water is increasing, and there is an increasing volume of biological and chemical waste that is thrown directly into water bodies, this leads to a sustainable alternative that removes contaminants from water without complex operation control. The present study aimed to propose and validate the use of constructed wetlands (HC) planted with bird of paradise (*Strelitzia reginae*) to treat wastewater. The experimental stage was carried out in the locality of Pastorias, Actopan (Veracruz) and consisted of 8 mesocosms: 2 HC planted with *Strelitzia reginae* in porous river stone as substrate, 2 HC with the same species, but planted in tezontle (volcanic stone) and 2 HC with stones only, plus 2 HC with tezontle alone, as controls. The units operated continuously for 6 months (March-August). The ornamental vegetation adapted to the HC conditions; in both substrates the growth was similar. The substrates used worked similarly in the removal of pollutants, better removal results were observed in the presence of the ornamental plant, in the mesocosms with presence of vegetation, both for total solids (SST), ammonium (N-NH₄), phosphates (P-PO₄) and sulphates (SO₄), removals were up to 37%, 45%, 63% and 80%, respectively. HC with ornamental plants can perform efficient

treatment in domestic wastewater. It is worth mentioning that substrates are low cost and easy to obtain.

Keywords: Wastewater; Pollutants; Constructed Wetlands; Ornamental; Removals; Local substrates.

INTRODUCCION

Las distintas actividades humanas ejercen una presión directa e indirecta, sobre el ciclo hidrológico, lo que ha tenido consecuencias negativas en muchas regiones, no solo en la calidad de vida de la población, sino también en los ecosistemas naturales y su biodiversidad. La producción y consumo de bienes y servicios no solo han traído consigo una mayor demanda del líquido, sino también una mayor generación de aguas residuales. Se estima que a nivel mundial entre 85 y 95% del agua residual se descarga directamente a los ríos, lagos y océanos sin recibir tratamiento previo [1]. En 2020, las entidades que generaron los mayores caudales de aguas residuales municipales fueron Hidalgo (29.2 m³/s), Nuevo León (12.15 m³/s) y Jalisco (10.66 m³/s) [2]. Como resultado de su contaminación, muchos ecosistemas dulceacuícolas y marinos muestran signos evidentes de degradación, con lo cual se han reducido en cantidad y calidad sus servicios ambientales, de igual forma se han perdido en algunos casos de manera irremediable la biodiversidad, requiriéndose procesos e inversiones económicas cuantiosas para el tratamiento de las aguas residuales. Ante este escenario el manejo de agua en el mundo y en México representa uno

de los más importantes retos ambientales para el futuro [1].

La comisión Nacional del Agua, en su Programa Nacional Hidráulico 2020-2024 mencionó que a nivel nacional en el 2018 había 819 plantas abandonadas y sin operar, las cuales representaban el 24% de las plantas de tratamiento de aguas residuales [3]. Las aguas residuales municipales producidas en el 2018 presentaban hasta 2 millones de toneladas de DBO₅ anua, siendo las industrias las que aportaron más contaminantes orgánicos, que la generada por los municipios, por ejemplo, la industria del petróleo, acero y minería representan el mayor riesgo de la liberación de metales pesados y compuestos tóxicos. Sumado a lo anterior, el 30% de las aguas municipales que se colectan en los drenajes, no reciben ningún tipo de tratamiento [2] y contienen contaminantes tales como nitrógeno, fosforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales y materia orgánica [4]. La actividad agraria es la principal fuente de contaminación difusa del agua y de contaminación por nitrógeno y fosforo. El incremento en el consumo de agua en los distintos sectores genera como resultado un mayor volumen de aguas residuales. Los efectos negativos de la contaminación del agua no solo afectan a los cuerpos de agua y a los ecosistemas, sino también representan un riesgo para la salud humana [1].

En general las plantas de aguas residuales son ineficientes y están

deteriorándose, son grandes consumidoras de electricidad y no cuentan con el mantenimiento adecuado para dar cumplimiento a las normativas, por lo que es necesario trabajar en conjunto con la población local para identificar las necesidades [2] y generar las posibles respuestas de atención, con el fin de fomentar el desarrollo local sostenible.

Actualmente han surgido una serie de tecnologías, una de ellas son las denominadas alternativas o soluciones basadas en la naturaleza, como los HC cuyas características son adecuadas para el tratamiento de aguas residuales, las cuales ofrecen soluciones adaptables a varios contextos, urbanos, peri-urbanos y rurales, así como ecosistemas costeros, de montaña, tropicales, áridos, etc. [5], estos se pueden emplear en el tratamiento de las aguas residuales no solo de pequeñas y medianas comunidades, sino también en aguas residuales de tipo agroindustrial con buenas eficiencias de remoción, así como bajos costos de operación y mantenimiento [6].

En el estado de Veracruz solo se tiene una planta de tratamiento por proceso biológico PTAR II ubicada en Xalapa, Veracruz con un caudal tratado de 125 Ls⁻¹, por el momento no existe alguna planta con tratamiento mediante HC, publicada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y mucho menos donde se involucren plantas ornamentales.

Los HC en la actualidad demuestran la depuración de contaminantes y

evidencian la importancia a las distintas especies de plantas ornamentales regionales, sin embargo, estas no han sido ampliamente analizadas en la remoción de contaminantes y aún menos los sustratos regionales de relleno que serían más económicos que los convencionales como la zeolita. Por ello en este estudio se evaluó el uso de piedra y tezontle como relleno y sembrados con ave de paraíso. Además, con el uso de HC eficientes para limpiar el agua se aporta a los ODS 6 y 11, y de ahí la importancia de la evaluación de funcionalidad de HC con plantas ornamentales.

El objetivo general de estudio fue evaluar un sistema de tratamiento ecológico y económicamente viable que permitan abordar dicha problemática ambiental, donde se utilicen materiales de fácil

obtención y bajo costo, así como evaluar el efecto de diferentes tipos de sustratos en la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas mediante humedales construidos, sembrados con *Strelitzia reginae* a nivel domiciliario. Los objetivos específicos son medir el crecimiento de *Strelitzia reginae* en humedales domiciliarios con dos diferentes tipos de sustratos (piedra porosa y tezontle) tratando aguas residuales domésticas, evaluar las condiciones de potencial REDOX en los sistemas con diferente tipo de sustrato, comparar la remoción de contaminantes en los HC con diferente tipo de sustrato y en presencia o ausencia de vegetación.

METODOLOGÍA

Material y Métodos. El estudio se realizó de marzo a agosto de 2016. Los HC fueron de flujo subsuperficial horizontal ubicados en el traspatio domiciliario en la localidad de San José de Pastorías, Actopan Veracruz. La mitad de las celdas fue rellena de piedra porosa y la otra de tezontle. En ambos casos se sembró con la planta ornamental y se dejaron 2 controles sin plantas. El análisis de agua se realizó mediante técnicas colorimétricas con espectrofotómetro. El análisis estadístico fue con SPSS para Windows. A continuación, en la (Figura 1) se muestran el proceso metodológico que se llevó a cabo a lo largo del proyecto y posteriormente se describe cada uno.

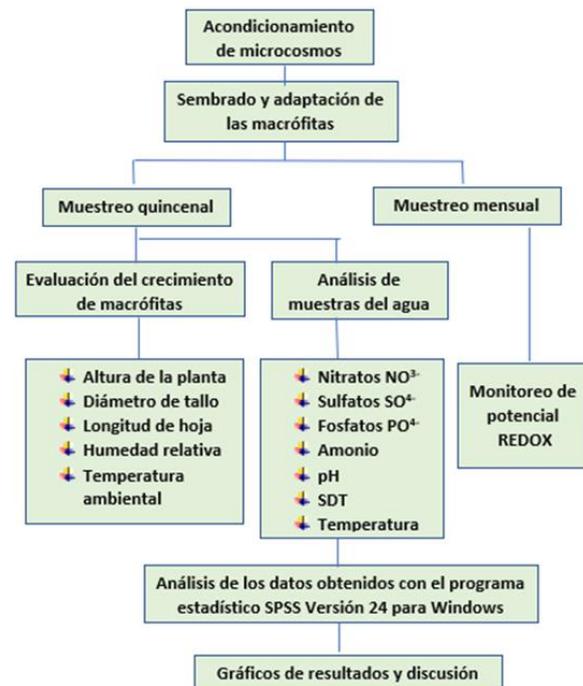


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología
Fuente: Elaboración propia

Acondicionamiento de los HC de flujo subsuperficial horizontal. Se recolectó piedra de río y piedra volcánica utilizadas como sustrato para empacar 6 celdas de concreto con medidas 1.5 x 0.5 x 0.23 m (**Figura 2a, b**), 2 celdas contenían piedra porosa de río y otras 2 celdas contenían piedra volcánica con 3 plantas por celda respectivamente (**Figura 2c**), se consideró evaluar 2 controles empacados con cada uno de los sustratos. (**Figura 2d**), El sustrato fue colocado aproximadamente a 20 cm de alto; el nivel de agua se mantuvo 15 cm por debajo de este. Se construyó un sistema de tuberías con tubos de PVC para alimentar el agua residual de origen doméstico al HC y para recolectar el agua tratada.



Figura 2. a y b) Colecta de piedras en el río Pinoltepec, Pastorias c) Celdas empacadas con diferente sustrato (piedra de río y piedra volcánica) y vegetación d) celdas control con diferente sustrato (piedra de río y piedra volcánica). Fuente: Elaboración propia

Sembrado y adaptación de macrófitas. Se plantaron en 4 celdas la especie *Strelitzia reginae* con diferente sustrato (piedra de río, piedra volcánica y réplicas), los 2 restantes no contenían vegetación, ya que se utilizaron como controles, se estableció un tiempo de adaptación de 1 mes para comenzar a evaluar parámetros de crecimiento.

Alimentación del agua residual a los HC. El agua se obtuvo directamente del sistema de drenaje donde fue bombeada hacia un tanque de almacenamiento con capacidad de 1,100 L, el contenedor distribuyó el agua a cada uno de los 6 HC por medio de un tubo PVC de 2" con reguladores de flujo adaptados para alimentar por goteo de flujo constante y en la salida del humedal se conectó un tubo de PVC de ½" tipo ganso para facilitar la toma de muestra del efluente (**Figura 3**). Se consideró un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 3 días para todos los mesocosmos de humedales.

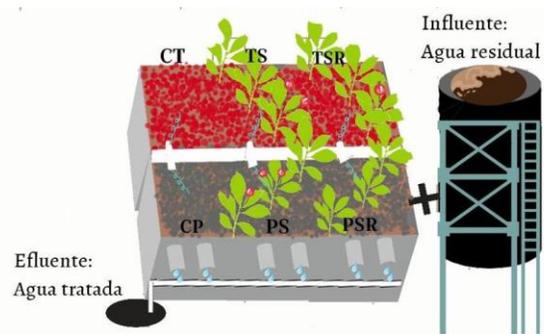


Figura 3. Esquema del sistema de tratamiento Fuente: Elaboración propia

Cálculo de volúmenes. Es necesario obtener el volumen de las celdas construidas y el volumen real de la celda tomando en cuenta la porosidad de la piedra de río y la porosidad de la piedra volcánica, para posteriormente determinar el caudal en cada mesocosmo con un TRH de 3 días.

Volumen de celda

$$V = L \times A \times H \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:
V= Volumen de celda
L= largo
A= ancho
H= Altura

Obteniendo el volumen de la celda:

$$V = 1.5 \times 0.23 \times 0.5 \text{ m} = 0.1725 \text{ m}^3 = 1 \text{ Ec. (2)}$$

Volumen real. Para el cálculo de este volumen se incluyó la porosidad del sustrato de acuerdo con [7], quienes indican que la piedra de río tiene 50% de porosidad y la piedra volcánica 40%.

$$Vr = V * \text{Porosidad}$$

$$Vrp = 172.5 \text{ L} (0.5) = 86.25 \text{ L}$$

$$Vrt = 172.5 \text{ L} (0.4) = 69 \text{ L}$$

Cálculo de caudales. Obtenidos los datos de volumen de cada humedal, se calculó el caudal haciendo un despeje de la siguiente ecuación 3 y se obtu Ec. (3) ecuación 4

$$Vr = TRH * Q$$

Donde:

Vr = Volumen real (L)

TRH = Tiempo de retención hidráulica (Días)

Qp = Flujo volumétrico con piedra de río (L/D)

Qt = Flujo volumétrico con piedra volcánica (L/D)

Obteniendo un flujo para los mesocosmos de:

$$Qp = \frac{Vrp}{THR} = \frac{86.25 \text{ L}}{3 \text{ Días}} = 27.41 \text{ L}$$

Ec. (4)

$$Qt = \frac{Vrt}{THR} = \frac{69}{3 \text{ Días}} = 23 \text{ L}$$

Monitoreo de crecimiento de *Strelitzia reginae*. La evaluación del crecimiento de la planta ornamental se realizó en el periodo de marzo a agosto del 2016, cada 2 semanas, tomando en cuenta la altura máxima medida por tallo desde el

sedimento hasta la punta de la hoja con cinta métrica, el largo de la hoja, número de hojas, número de tallos y el diámetro de cada tallo con un vernier, así como los retoños, estas mediciones se efectuaron en las 4 celdas correspondientes a 12 macrófitas (3 en cada celda).

Monitoreo de parámetros. Para conocer la remoción de contaminantes en el agua, se tomó muestra del influente y efluentes (250 ml) semanalmente.

Medición del potencial REDOX. El potencial redox o potencial de reducción-oxidación es una medida de la presión (o disponibilidad) de electrones en una solución. Esta medida es usada para cuantificar el grado de reducción u oxidación electroquímica del suelo/sustrato [8].

La medición se realizó cada 2 semanas durante la mañana, medio día y en la tarde a diferentes profundidades (de 0cm a 35cm) con una varilla de cobre aislada y con punta de platino (Figura 4b) construidas de acuerdo con [9], un voltímetro y un electrodo de referencia. La varilla fue calibrada con una solución de quinhidrona al 97% antes de cada medición. El potenciómetro se estandarizó con una solución de biftalato de potasio pH 4.01 +/- 0.01 (**Figura 4a**)

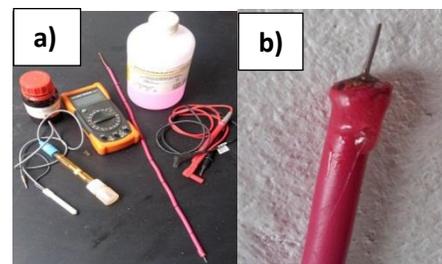


Figura 4. a) kit para medición de REDOX
b) varilla de cobre aislada con punta de platino
Fuente: Elaboración propia

Mediciones de Sólidos Disueltos Totales (SDT). Los sólidos disueltos totales (SDT) comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua [10]. Con base a la NMX-AA-034-SCFI-2015 es posible la medición con un dispositivo, en este caso se determinó mediante un multiparamétrico YSI Environmental modelo 556 (**Figura 5**) colocándolo en la muestra de agua y tomando la lectura [11].



Figura.5 Medición de SDT

Mediciones de potencial de hidrógeno. La medida del pH por sí misma no indica si el agua posee impurezas, ya que un agua residual puede estar muy cargada de materia orgánica y tener un pH neutro, es muy importante para determinar la tratabilidad biológica del agua, ya que los microorganismos presentan una tolerancia muy pequeña para los cambios de pH. Normalmente, el margen de pH adecuado para el tratamiento biológico es de 6-9. Por encima y por debajo de estos límites hay dificultades para la adaptación de los microorganismos [12]. Se midió el potencial de hidrógeno con un

potenciómetro Jenway modelo 3510 (**Figura 6**), introduciendo el electrodo en la muestra de agua y determinando el pH de acuerdo con la NMX-AA-008-SCFI-2011 [13].



Figura 6. Medición de PH

Técnicas analíticas empleadas. A continuación, se describe la metodología utilizada para los análisis efectuados en el laboratorio del Instituto de Ecología A.C. (INECOL A.C.).

Preparación de las muestras. Se desinfectaron los recipientes donde se adicionaron las muestras filtradas. El lavado se realizó con extracción una vez finalizada la limpieza, los frascos se remojaron en HCl, se enjuagaron con agua de grifo y posteriormente con agua destilada.

Se filtraron 44 muestras correspondientes a la colecta quincenal del periodo marzo-agosto 2016 (**Figura 7 a, b**).

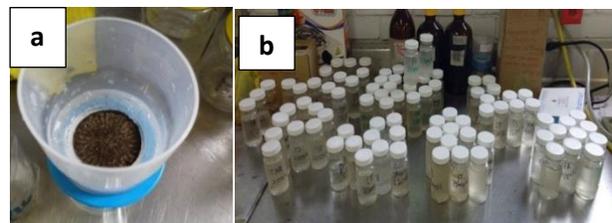


Figura 7. a) Filtración de muestras b) Muestras filtradas. Fuente: Elaboración propia

Determinación de iones (PO_4^- y SO_4^{2-}).

Para la determinación de los iones mencionados anteriormente se realizaron disoluciones ocupando las muestras filtradas 2/10 para entradas y 5/10 para salidas, aforando con agua des ionizada y vertiendo en los viales rotulados. Una vez rotulados los viales las muestras fueron analizadas mediante cromatografía iónica en base a las, NMX-AA-079-SCFI-2001, NMX-AA-074-SCFI-2001 y NMX-AA-029-SCFI-2001 [14,15,16]

Determinación de amonio (N-NH_4^+).

Utilizando las muestras filtradas en matraces de 50mL se hicieron diluciones 2/50 para muestras de entrada y 10/50 para muestras de salida aforando con agua destilada y decantando en frascos rotulados con su respectiva disolución.

De acuerdo con el método NACH del reactivo de Nessler y a la NMX-AA-026-SCFI-2010 para la determinación de nitrógeno amoniacal en solución acuosa, se ocupó un matraz de 25ml adicionando una solución patrón NH_4NO_3 a 1000 ppm (N-NH_4^+), aforando con agua destilada y se efectuaron disoluciones a diferentes concentraciones (1ppm, 2ppm, 3ppm y 4 ppm) (**Figura 8**) [17].



Figura 8. Disoluciones con la solución patrón a diferentes concentraciones. Fuente: Elaboración propia

En el espectrofotómetro uv/vis (**Figura 9b**) se calibró a 0 con un blanco en la porta celdas que contenía 1ml de reactivo de Nessler, posteriormente en 10ml de muestra se adicionaron 3 gotas de mineral estabilizador, se agitó, después se agregaron 3 gotas de un agente dispersante (**Figura 9c**), se agitó, generando una coloración amarillenta, se obtuvo la lectura de resultados de absorbancia al transcurrir 1min en cada muestra, repitiendo el procedimiento (**Figura 9d**). Esto aplicable a las disoluciones de las muestras de entrada y salida para generar la curva de calibración.



Figura 9. a) Reactivo Nessler para preparación del blanco b) Espectrofotómetro uv/vis c) Mineral estabilizador y agente dispersante d) Detección de color por presencia de amonios.

Análisis estadísticos. Los análisis estadísticos se realizaron en el programa SPSS Versión 24 (Soluciones estadísticas de productos y servicios) para Windows, para verificar los resultados provenientes de una distribución normal aplicando la prueba de Sminorv-Kolmogorov. Se hizo un análisis exploratorio de los resultados calculando sus estadígrafos básicos mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA) y se comprobó la existencia de diferencias significativas.

RESULTADOS

Eficiencia de remoción de SDT. El porcentaje de remoción fue de 37%, esto es mayor a lo obtenido por [18], que obtuvo un porcentaje de remoción de 35% en un humedal utilizando grava como sustrato. Al comparar estos resultados se aprecia que los porcentajes de remoción aquí obtenidos pueden considerarse aceptables y se infiere que la adsorción de sólidos se incrementa al combinar un sustrato con arena, ya que este material granular es capaz de retener partículas de hasta veinte micras de tamaño [19].

Monitoreo de potencial REDOX. En la **Figura 10** se representan los valores promedio del potencial redox en los HC medido a los 10 cm y 35 cm de profundidad.

El promedio mensual de los valores del potencial redox en este trabajo fueron positivos y no presentan diferencias significativas entre las profundidades de los tratamientos a lo largo del monitoreo. Lo que sí se puede diferenciar, es que en los sistemas con vegetación los valores de oxidación-reducción tendieron a ser ligeramente más oxidados que en los sistemas en ausencia de la vegetación, esto indicando posibilidades de remoción de contaminantes mayores bajo presencia de plantas.

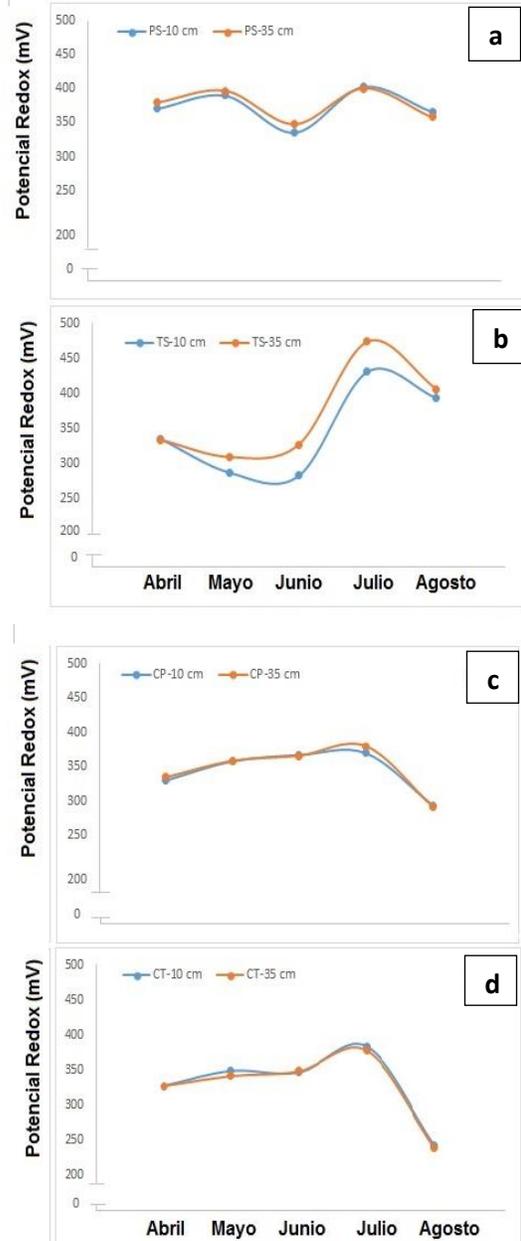


Figura 10. Monitoreo de la dinámica del potencial redox

Evaluación de pH. El pH se midió con el objetivo de observar si se presentaban cambios al pasar el agua residual por el sistema, los valores oscilaron entre neutros a básicos en un rango de 7-8, esto coincide con [20], siendo adecuado

para la acción de las bacterias nitrificantes. La NOM-001SEMARNAT-1996 exige un valor de pH mayor a 5.5 y menor a 10 para el vertido de las aguas residuales [21]. Durante este estudio los resultados que se obtuvieron en el humedal están dentro de lo establecido por la norma.

Crecimiento de *Strelitzia reginae*. Durante un periodo de 6 meses se evaluó el crecimiento de *Strelitzia reginae* midiendo la altura y el diámetro del tallo en los HC con diferente tipo de sustratos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada parámetro.

Alturas y diámetros de tallos. La medición de la altura de los tallos es el parámetro más conveniente para evaluar el crecimiento de las plantas. En la altura máxima medida para los HC con piedra volcánica fue de 91cm y para los HC con piedra de rio fue de 95cm (**Figura 11**). Es decir, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) con respecto al crecimiento entre los dos tipos de sustrato.

Sin embargo, físicamente se observó que la mejor estabilidad en el desarrollo de la planta se encuentra principalmente en condiciones de piedra volcánica, esto puede ser debido a la porosidad en la piedra lo que hace que se reproduzcan con mayor facilidad los microorganismos y desarrollen sus habilidades de remoción.

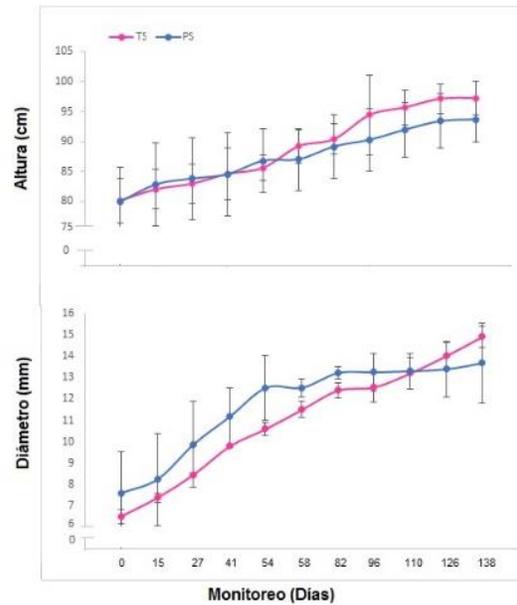


Figura 11. Monitoreo de crecimiento de *Strelitzia reginae* en diferente sustrato, evaluando alturas y diámetros de tallos

Los resultados indican que las plantas ornamentales lograron sobrevivir a las condiciones de humedal con agua residual doméstica, ninguna presentó signos de enfermedad o plagas, pero no logró su máximo crecimiento en el periodo de monitoreo, que de acuerdo con la literatura es de 150 cm, probablemente se requiere un lapso mayor de evaluación del crecimiento.

Eficiencia de remoción en contaminantes SO_4 , PO_4 Y $N-NH_4$. Los porcentajes promedio de remoción de sulfatos (**Figura 12**) para cada sistema fueron de 72.8% para CP (control piedra), 71.2% para CT (control tezontle), 90.8% para TS (tezontle *Strelitzia*) y 92.8% para PS (piedra *Strelitzia*).

Los valores de remoción de los sistemas con presencia de vegetación fueron 21% mayores en comparación con los sistemas sin planta.

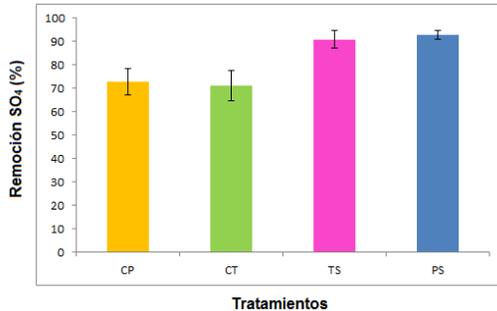


Figura 12. Remoción de sulfatos en los humedales en estudio.

Los porcentajes de remoción obtenidos durante el proceso de remoción de fosfatos (**Figura 13**) por los sistemas de HC fueron de $52.05 \pm 7.0\%$ en CP, $57.81 \pm 6.9\%$ en CT, $86.62 \pm 4.8\%$ en TS y $90.5 \pm 1.8\%$ en PS, las remociones de este ión en el estudio fueron superiores a las reportadas en otros estudios [22].

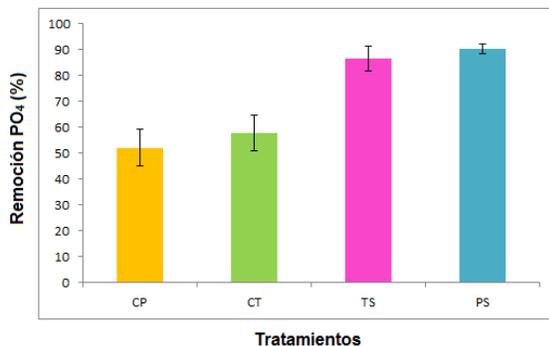


Figura 13. Remoción de fosfatos en los humedales en estudio.

En cuanto a las remociones del amonio, se observó una remoción similar (40 a 43%) en los controles (**Figura 14**), sin importar el tipo de sustrato, mientras que,

en las celdas con presencia de vegetación, la remoción fue de 75% y 78% en los sistemas rellenos con tezontle y piedra, respectivamente. La diferencia de remoción entre los sistemas en presencia de vegetación y los controles fue aproximadamente del 45%. Lo anterior indica que hubo un proceso de fitorremediación, demostrando que la concentración de nitrógeno amoniacal disminuyó a más de la mitad al pasar por el humedal. Lo detectado también indica que, para cualquiera de los parámetros medidos en las aguas residuales domiciliarias, la vegetación fue un componente clave para mejorar la calidad del agua.

Cabe resaltar que el sistema de humedal construido es de bajo costo, fácil operación y amigable con el medio ambiente, además se demuestra la utilidad de la especie *Strelitzia reginae* como fitorremediadora en el estudio, así mismo se destaca que se han agrupado más de 250 especies de heliconias en el mundo, donde el 98% de estas se encuentran en el centro y sur de América [23], por ende, es susceptible a que esta especie sea cultivable en estas regiones y sería de gran apreciación encontrar dichas plantas para la construcción de humedales.

Los resultados de remoción con respecto al tipo de sustrato utilizado fueron muy similares estadísticamente en cada tipo de contaminante y en los dos tipos de sustratos con presencia de *Strelitzia reginae*, por lo tanto, no hay diferencias significativas en emplear cualquier tipo de sustrato, la elección dependerá de la

facilidad de obtención del sustrato, en ese sentido, en áreas con presencia de ríos sería más factible.

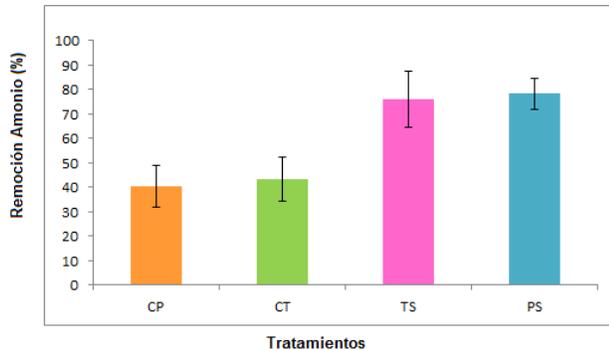


Figura 14. Remoción de amonio en los humedales en estudio.

CONCLUSIONES

El trabajo de investigación es aplicado a un problema persistente como lo es el tratamiento de aguas residuales. La planta exótica ornamental *Strelitzia reginae* es una planta terrestre que logró sobrevivir en un ambiente de humedal revelando su uso en sistemas de HC como fitorremediadora, capaz de remover amonio, fosfatos y sulfatos alrededor de un 50% y 93%. Asimismo, en cuanto al sustrato, se comprobó que resulta ventajoso el utilizar piedra de río como relleno de los HC considerando su bajo costo y la disponibilidad en la zona rural, pero también el tezontle es una buena opción, ya que, evaluando el parámetro de crecimiento y remociones, no se encontraron diferencias estadísticas.

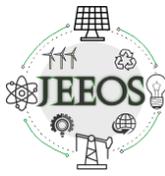
Las concentraciones en los efluentes estuvieron debajo de los límites recomendados por las Normas Oficiales Mexicanas, siendo mayores las remociones de sulfatos y fosfatos

(>90%), por lo que se recomienda el uso de HC con *Strelitzia reginae* en sitios con necesidad de tratamiento. Así como también se recomienda explorar otras especies de la misma familia que aportan fitorremediación y mejoran la apariencia estética de la ecotecnología.

REFERENCIAS

- [1] SEMARNAT. (13 de Octubre de 2022). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Obtenido de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap6.html>
- [2] CONAGUA. (2020). Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Comisión Nacional del Agua. Programa Especial derivado del plan nacional de desarrollo 2019-2024. México: Diario oficial de la federación.
- [3] CONAGUA. (2021). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de tratamiento de aguas residuales en tratamiento y en operación.
- [4] Jiménez B; Torregrosa M; Aboites L. (2010). El Agua en México: Cauces y encauces. México: Academia Mexicana de Ciencias y Conagua.
- [5] Altafin. (2020). Innovaciones en el Desarrollo e Implementación de Humedales Construidos para el tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Latinoamérica y el Caribe. Banco Interamericano de desarrollo. División de Agua y Saneamiento III IDB-TN-01911.
- [6] Díaz E; Alvarado-Granados A; Camacho Calzada K.(2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del

- sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Quivera, 78-97.
- [7] Londoño L. y Marín C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial. alimentados con agua residual sintética. Tesis Licenciatura, Escuela de Tecnología Química, Pereira, Colombia.
- [8] Mitsch, W.J. y Gosselink J. (2000). Wetlands. Tercera edición. Jonh Wiley and Sons Inc. Nueva York 918p.
- [9] López et al. (2009). Medición del potencial redox del suelo y construcción de electrodos de platino. Breviario poara describir, observar y manejar humedales., 132-136.
- [10] OMS. (2013). Total dissolved solids in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable.
- [11] NMX-AA-034-SCFI-2015; Secretaria de Economía. DGN. Medición de sólidos y sales disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.
- [12] CIDTA. (2005). Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua. Universidad de Salamanca. MOPT.
- [13] NMX-AA-008-SCFI-2011; Secretaría de Economía. DGN. Análisis de Agua. Determinación del pH en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.
- [14] NMX-AA-029-SCFI-2001; Secretaria de Economía. DGN. Análisis de Agua. Determinación de Fósforo Total en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.
- [15] NMX-AA-074-SCFI-2001; Secretaria de Economía. DGN. Análisis de Agua. Determinación del Ión Sulfato en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.
- [16] NMX-AA-079-SCFI-2001; Secretaria de Economía. DGN. Análisis de Agua.
- [17] NMX-AA-026-SCFI-2010 ; Secretaria de Economía. DGN. Análisis de Agua. Medición de nitrógeno total kjeldahl en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.
- [18] Hernández A. (2016). Procesos de transporte y separación en. Universidad de Murcia. Volumen 4. Membranas Microfiltración, Ultrafiltración y ósmosis inversa., 111.
- [19] Cawst. (2009). Manual para el filtro de bioarena diseño, contrucción, instalación, operación y mantenimiento. Canadá: Cawst.
- [20] Metcalf y Eddy. (1995). Ingenieria de las Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. Madrid: McGraw-Hill.
- [21] NOM-001-SEMARNAT-1996; Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- [22] Rivas, A., Barcel´o-Quintal, I. y Moeller, G. E. (2011). Pollutant removal in a multistage municipal wastewater treatment system comprised of constructed wetlands and a maturation pond, in a



temperate climate. *Water, Science and Technology* 64, 980-987.

- [23] Sosa F.M (2013) Cultivo del género heliconia. *Cultivos tropicales*, vol. 34, no. 1 pp. 24-32.