



Recibido 01/04/2025
 Aceptado 15/05/2025

EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN SAN MARCOS ATEXQUILAPAN, NAOLINCO, VERACRUZ, MÉXICO, SEMBRADO CON POLICULTIVO DE PLANTAS ORNAMENTALES

EVALUATION OF A WASTEWATER TREATMENT WETLAND IN SAN MARCOS ATEXQUILAPAN, NAOLINCO, VERACRUZ, MEXICO, PLANTED WITH A POLYCULTURE OF ORNAMENTAL PLANTS

David Mejía-Escobar¹, José Luis Marín-Muñiz¹, Gonzalo Ortega-Pineda¹

¹El colegio de Veracruz, Carrillo Puerto 26, Zona Centro, Centro 91000 Xalapa-Enríquez, Veracruz, México

¹Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera Lomas del Cojolite, 93828 Misantla, Veracruz, México

Correo de autor de correspondencia: mejiaescobard@gmail.com

RESUMEN

El uso de los humedales como sistemas de tratamiento de aguas residuales es una alternativa prometedora en localidades rurales, ya que es económica y fácil de operar. Debido a su practicidad, al implementarlos es necesario analizar su funcionamiento en torno a remoción de contaminantes, pues esto ayuda a tomar consideraciones en el diseño y apoya en la replicabilidad de los mismos, por su potencial para disminuir la polución hídrica y mejorar la calidad de vida.

Por ello, el presente trabajo evaluó la remoción de contaminantes en las aguas residuales tratadas a través de un humedal construido sembrado con plantas ornamentales en la localidad de San Marcos Atexquilapan, Naolinco Ver., mediante la recopilación de 6 parámetros; Temperatura, pH, Conductividad eléctrica (CE), Solidos Disueltos Totales (TDS), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Carbono Orgánico Total (TOC). Dicho estudio tuvo una duración de 180 días (6 meses). La zona de estudio presentó una temperatura promedio de 20.73 °C. Las aguas tratadas alcanzaron remociones máximas de 47 % en DQO, 50 % en SDT, 60 % en COT, 72 % en CE, y un pH fluctuante alrededor de 6. Aunque estos resultados son relevantes, es necesario optimizar las condiciones de diseño para mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes. Además, al comparar con estudios de otros autores, se identificó que los bajos porcentajes de remoción podrían estar relacionados con las condiciones climáticas, el proceso de adaptación de las plantas debido a que el sistema tiene apenas 12 meses de operación, así como factores externos como la sobrecarga orgánica.

PALABRAS CLAVE

Humedales de tratamiento, innovaciones, aguas residuales, diseño

ABSTRACT

The use of wetlands as wastewater treatment systems is a promising alternative in rural areas, as it is economical and easy to operate. Due to their practicality, their implementation requires analyzing their performance in terms of contaminant removal. This helps to take into account design considerations and supports their replicability, given their potential to reduce water pollution and improve quality of life.

Therefore, this study evaluated contaminant removal in wastewater treated by a constructed wetland planted with ornamental plants in the town of San Marcos Atexquilapan, Naolinco, Veracruz, by collecting six parameters: temperature, pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), chemical oxygen demand (COD), and total organic carbon (TOC). The study lasted 180 days (6 months). The study area had an average temperature of 20.73°C. The treated water achieved maximum removal rates of 47% COD, 50% TDS, 60% TOC, 72% EC, and a pH level of approximately 6. Although these results are relevant, it is necessary to optimize the design conditions to improve contaminant removal efficiency. Furthermore, when compared with studies by other authors, it was identified that the low removal percentages could be related to climatic conditions, the adaptation process of the plants due to the system's relatively short operational period of 12 months, as well as external factors such as organic overload.

KEYWORDS

Treatment wetlands, innovation, wastewater, design

INTRODUCCIÓN

Los humedales construidos (HC) representan una tecnología innovadora en el ámbito de la gestión y conservación ambiental, con un impacto significativo en el desarrollo sustentable (26). Su principal objetivo es tratar aguas residuales, ofreciendo una alternativa económica y ecológicamente viable en comparación con las plantas de tratamiento convencionales. Estos sistemas emulan los procesos naturales de depuración que ocurren en los humedales naturales, utilizando una gran variedad de macrófitas, junto con microorganismos y sustratos específicos para filtrar y tratar las aguas residuales municipales (15).

La implementación de HC es especialmente valiosa en comunidades aisladas de las áreas urbanas, donde las condiciones específicas pueden limitar la implementación de sistemas de saneamiento adecuados. La falta de infraestructura, el presupuesto económico limitado y el acceso reducido a la tecnología pueden resultar en la contaminación de fuentes de agua potable, afectando la biodiversidad local y creando un ciclo pernicioso de deterioro ambiental y problemas de salud pública (2).

Aunque existen algunos estudios que comprueban su funcionalidad (29), esta depende de varios factores como la temperatura regional, tipo de agua a tratar, vegetación y sustratos a utilizar y otros factores de diseño. En el estado de Veracruz aún son pocos los sistemas instalados (18), y aún menos en zonas de montaña de allí la importancia de analizar el funcionamiento de los HC en estas regiones.

Por lo tanto, es necesario evaluar sistemas de tratamiento que sean de uso real en comunidades rurales. La información generada a partir de estas evaluaciones es más precisa, dado que los resultados obtenidos bajo condiciones controladas a escala de laboratorio no siempre representan las condiciones reales, donde las variables pueden diferir significativamente (33). En este contexto, el presente trabajo evalúa el humedal para el tratamiento de aguas residuales en la comunidad de San Marcos Atexquilapan, Naolinco, Veracruz, México, sembrado con un policultivo de plantas ornamentales. Este monitoreo busca obtener datos reales sobre el comportamiento del humedal en condiciones reales, lo que permitirá mejorar su eficiencia y aplicabilidad en comunidades con problemas similares de contaminación.





MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, en la Figura 1 se presenta el proceso metodológico llevado a cabo durante la investigación y posteriormente se describe cada paso.

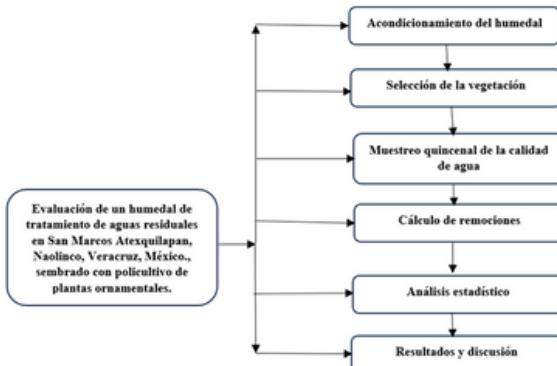


Figura 1. Diagrama metodológico. Elaboración propia

2.1. ACONDICIONAMIENTO DEL HUMEDAL

Para realizar las mediciones quincenales fue necesario eliminar malezas y sólidos de gran tamaño que se encontraban dentro del humedal. Posterior a la limpieza, fue necesario conocer la composición de la tecnología.

El sistema cuenta con una capacidad total de 100,000 L, con 5 cuadrantes (1 m de ancho, 2 m de largo y 0.80 m de profundidad) a lo largo del recorrido. El interior del sistema contenía una capa inferior de gravón de 10 cm de diámetro aproximadamente y una capa superior de grava volcánica (3 cm), las cuales cumplían una función filtrante de la materia orgánica presente en el agua residual, además de ser hábitat para el desarrollo de biopelículas bacterianas (31). A su vez, el material pétreo también fungió como soporte de distintas plantas que aportan a la remoción y embellecimiento del paisaje.

2.2. SEMBRADO DE LA VEGETACIÓN

Para la colocación de especies en el humedal fue necesario realizar una revisión bibliográfica mediante herramientas como Google académico y Dimensions mediante el método booleano TITLE-ABS, el cual permite restringir la búsqueda de palabras clave que aparecen en el título y el resumen de los documentos encontrados (35), lo que facilita obtener resultados relevantes y específicos sobre las posibles especies que se adaptaran con más facilidad a las características de la zona.

Tras la revisión bibliográfica, se procedió a la selección de las especies vegetales para su posterior siembra y adaptación en el humedal. Asimismo, el sistema fue dividido en cinco cuadrantes mediante líneas imaginarias, con el fin de distribuir adecuadamente los diferentes tipos de plantas durante el proceso de siembra

2.3. MUESTREO QUINCENAL

El muestreo de agua en los cuadrantes del humedal se realizó quincenalmente durante 6 meses (180 días) a partir del 8 de mayo del 2024 al 21 de octubre del 2024, analizando: temperatura, pH, Conductividad eléctrica (CE), Sólidos Disueltos Totales (TDS), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Carbono Orgánico Total (TOC), tanto a la entrada como a la salida de cada cuadrante del sistema. Las muestras tomadas fueron en frascos de polietileno de 250 mL.

2.4. CÁLCULO DE REMOCIONES

Para la determinación de remociones fue necesario aplicar la siguiente fórmula, considerando las muestras de agua tomadas.

$$\% \text{Remoción} = \frac{\text{Entrada} - \text{Salida}}{\text{Entrada}} \times 100 \quad (1)$$

2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Luego de la obtención de muestras fue necesario analizar los datos obtenidos para generar conclusiones acerca del tratamiento a lo largo del humedal. Para ello fue necesario utilizar Excel Microsoft para Windows y IBM SPSS Statistics 25 para windows, un programa informático-estadístico donde se realizó una prueba de normalidad (Kolmogorov Smirnov) para observar el comportamiento de los datos y posteriormente la prueba de Kruskall Wallis para determinar las diferencias significativas de cada cuadrante, dado que los datos no fueron normales. Un valor de p=0.05 fue utilizado para revelar diferencias estadísticas entre los análisis.

RESULTADOS

3.1. SELECCIÓN DE PLANTAS

Se seleccionaron diversas especies de plantas ornamentales considerando sus características fisiológicas, las cuales les permiten adaptarse al clima local (con una temperatura promedio entre 22 y 23 °C), así como su capacidad para la adsorción de nutrientes y su resistencia a altos volúmenes de agua contaminada (19).

Se ha demostrado mediante estudios que el crecimiento de plantas ornamentales en humedales construidos a gran escala no solo contribuye significativamente a la remoción de contaminantes, sino que también potencia la producción floral, lo que a su vez tiene implicaciones estéticas y económicas, por lo tanto, su implementación es tanto efectiva como beneficiosa para el tratamiento de aguas (20).

Para el presente estudio se utilizaron las plantas ornamentales: Canna indica, Xanthosoma violaceum, Lilium candidum, Chrysopogon zizanioides y Zantedeschia aethiopica, siendo distribuidas como se muestra en la figura 2.

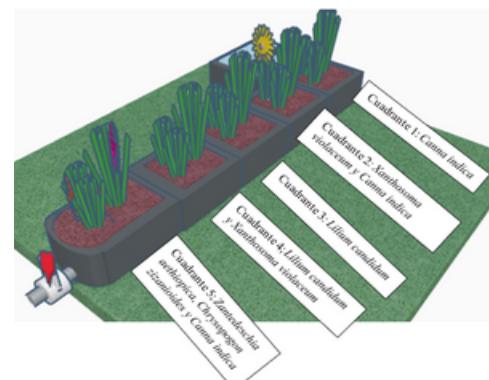


Figura 2. Distribución de especies. Elaboración propia

3.2. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES PRESENTES

La metodología para realizar la evaluación de calidad de agua, según la CONAGUA (6), es mediante el análisis de 4 indicadores: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) _5, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspensos totales (SST) y coliformes fecales, sin embargo, para fines de investigación y por disponibilidad de equipos, únicamente se analizaron los parámetros DQO y sólidos disueltos totales (SDT), los cuales están relacionados con la materia orgánica.

3.2.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La DQO es un indicador utilizado para evaluar la cantidad de oxígeno necesario en el agua para oxidar químicamente la materia orgánica (27). Este proceso también es utilizado para evaluar la carga de contaminantes en cuerpos de agua o sistemas de tratamiento de agua residual, proporcionando un estándar indirecto de la cantidad de materia orgánica presente (7).

A continuación, en la Figura 3a se puede analizar el comportamiento del parámetro a lo largo de los 5 cuadrantes durante 6 meses. La concentración de los flujos de entrada (Afluentes) osciló en 1825 mg O₂/L en promedio y en cuanto a los flujos de salida (efluentes) oscilaron en 911 mg O₂/L, por lo que el sistema de tratamiento tuvo una capacidad de remoción del 48 % durante un rango de tiempo de 180 días.

La DQO en los afluentes de este sistema es considerablemente más alta que la reportada en otros estudios, como el caso donde la DQO inicial fue de 1110 mg O₂/L (3).

Los elevados niveles de DQO observados podrían estar relacionados con las prácticas habituales de la comunidad naolinqueña, donde es común la crianza y engorde de cerdos y otros animales de corral dentro de las viviendas. Estos animales son sacrificados para consumo, lo que ocasiona la presencia frecuente de restos de carne y sangre en el humedal, debido a que los drenajes domésticos transportan estos desechos, dificultando la remoción de contaminantes. Además, al tratarse de un sistema de reciente implementación, la eficiencia aún puede ser limitada. Los efluentes provenientes de mataderos contienen sangre, grasas, tejidos orgánicos, heces y orina, lo que incrementa significativamente la carga orgánica del agua y eleva la DQO (23).

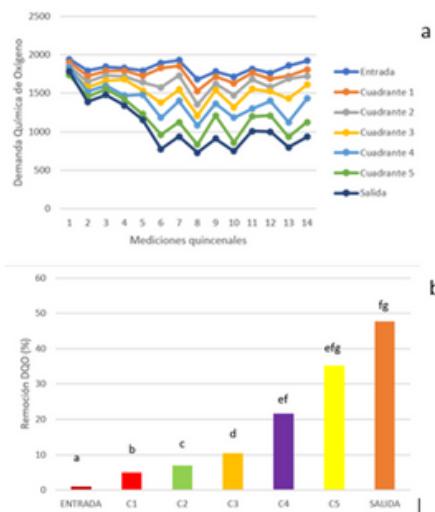


Figura 3. Comportamiento de la DQO, a) Muestreos quincenales y b) Remociones. Elaboración Propia

Al comparar los resultados obtenidos con lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (31), que fija un límite máximo permisible de 210 mg O₂/L para la DQO en descargas destinadas a riego e infiltración, se observa que las mediciones registradas en este estudio no cumplen con la norma. A pesar de que el porcentaje de remoción fue significativo (47.69 %), los valores finales de DQO permanecieron elevados, impidiendo alcanzar los niveles permitidos. En consecuencia, resulta relevante considerar la implementación de un sistema de flujo superficial complementario al sistema subsuperficial actual, configurando así un humedal híbrido que permita mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes.

De acuerdo con la Figura 3b, se presentan los porcentajes de remoción en los cinco cuadrantes del sistema, donde se observaron diferencias significativas en cada punto de muestreo en comparación con la entrada. La mayor remoción se registró en la salida, donde predominan las especies *Canna indica*, *Chrysopogon zizanioides* y *Zantedeschia aethiopica*, generándose una remoción progresiva a lo largo de todo el recorrido. Cabe destacar que los cuadrantes 4 (21.62 %) y 5 (35.17 %) no mostraron diferencias significativas respecto a la salida, dado que corresponden a la fase final del tren de tratamiento, donde la concentración de contaminantes es menor.

Diversos autores han reportado eficiencias de remoción de entre 80 % y 95 % utilizando plantas como *Pontederia cordata* y *Phragmites australis*, ambas ornamentales, en combinación con sustratos de grava volcánica para aplicaciones domiciliarias (16,3). A diferencia del sistema actual, que opera con mayores volúmenes de agua y cargas contaminantes diarias, estos estudios suelen realizarse bajo condiciones más controladas.

En el caso de esta investigación, no es posible controlar la cantidad de agua ni la carga de contaminantes que ingresan al sistema. Además, las macrófitas empleadas en este estudio no contaron con un período de adaptación previo para regular las concentraciones del agua de entrada; Desde el inicio, el agua residual fue incorporada directamente a las celdas. Por lo tanto, las especies vegetales tuvieron que adaptarse simultáneamente al sustrato, las condiciones climáticas y el tratamiento del agua, lo que pudo influir en los resultados observados durante los primeros muestreos.

3.2.2. SÓLIDOS DISUELtos TOTALES (STD)

Los STD en agua hacen referencia a la cantidad de sólidos disueltos que se encuentran presentes en el agua, los cuales incluyen sales, minerales, metales y otros compuestos orgánicos e inorgánicos (9). Un incremento en las unidades de STD puede ser perjudicial para la vida acuática, afectando la reproducción y crecimiento de peces, así como el olor y sabor del agua (12).

Por otro lado, es importante mencionar que los STD se encuentran directamente relacionados con la conductividad eléctrica (CE), un parámetro que mide la capacidad del agua para conducir electricidad y está influenciada por la presencia de iones disueltos. Los iones presentes en el agua aumentan la CE, por lo que a mayores niveles de STD, mayores serán las unidades de CE (32).

Con respecto a las mediciones del humedal, se encontraron concentraciones promedio en los afluentes de 1882.92 mg/L y en los efluentes 936.14 mg/L (Figura 4a), lo que indica que se tuvieron remociones de hasta el 50.28 %. Comparando estos resultados con la NOM-001-SEMARNAT-2021, que indica que para riego e infiltración se necesitan máximos de 140 mg/L y para descarga a ríos de 84 mg/L, se obtiene que el sistema no cumple con los límites máximos permisibles, por lo que la inclusión de sistemas de pretratamiento de mayor tamaño como sedimentadores, desarenadores o cribas, serían necesarios para disminuir dicha carga.

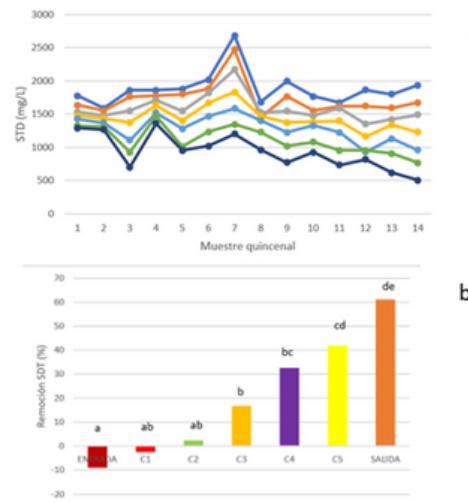


Figura 4. Comportamiento de los STD, a) Muestreos quincenales y b) Remociones. Elaboración propia

En la Figura 4b se presentan los porcentajes de remoción de STD a lo largo de los cinco cuadrantes del sistema de tratamiento, donde se identifican diferencias significativas en cada cuadrante en comparación con la entrada. Como se observa, la mayor eliminación de STD se registró en la salida, con un porcentaje de remoción del 61.08 %. Por otro lado, los cuadrantes 1 (-2.38 %) y 2 (2.48 %) no mostraron diferencias significativas respecto a la entrada, lo que confirma que los niveles de remoción de STD en el efluente son estadísticamente diferentes en comparación con el afluente, logrando una reducción de hasta el 61.08 %.

La remoción de SDT en este sistema es considerablemente superior en comparación con otros estudios, donde se reportaron eficiencias de eliminación cercanas al 20 % o, en algunos casos, hasta un 50 %, utilizando también plantas ornamentales. No obstante, es probable que la eficiencia del sistema actual pueda incrementarse al aumentar el tiempo de retención hidráulica (TRH) (11,30).

3.2.3. CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)

El papel que juegan los humedales naturales como sumideros de carbono es de gran relevancia, pues, aunque los humedales cubren solo una pequeña fracción de la superficie terrestre, su capacidad para almacenar carbono es sorprendentemente alta, sin embargo, las tasas de carbono secuestrado varían ampliamente dependiendo el tipo de humedal y su vegetación (10). Sin embargo, en humedales de tratamiento, el objetivo es disminuir todas las cargas orgánicas, para que las aguas tratadas puedan ser reutilizadas para otros usos como la irrigación de cultivos.

En el humedal de estudio se registró un promedio en el afluente que oscilaba en 1744 mg/L y 687 mg/L en el efluente, lo que implica un 60.59 % de remoción durante los 6 meses evaluados. Un punto importante a destacar es que el cuadrante con mayor desarrollo de vegetación y floración fue el 5, donde el promedio de COT ya era bajo a comparación de la entrada (687 mg/L). Pues esto quiere decir que el carbono removido en el agua es aprovechado por las plantas mediante la fotosíntesis, reflejándose en efectos positivos como una buena adaptación de las especies (2).

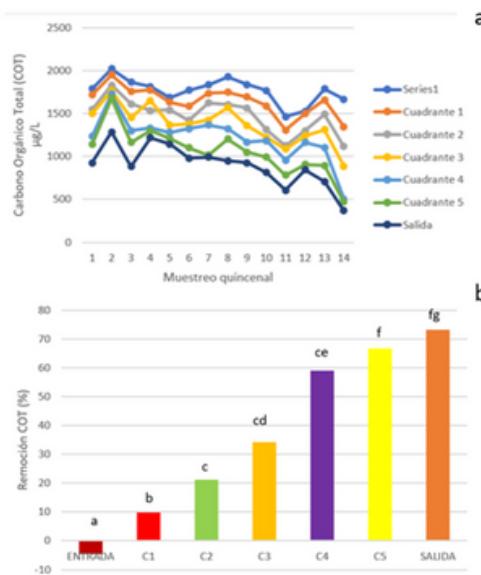


Figura 5. Comportamiento de cuadrantes, a) Muestreos quincenales y b) Remociones. Elaboración Propia

En la Figura 5b se presenta el porcentaje de remoción del COT a lo largo del tratamiento, donde se observa que desde el inicio existen diferencias significativas al comparar la entrada (~4.59 %) con el cuadrante 1 (9.79 %). Posteriormente, en los cuadrantes 2 (21.30 %), 3 (34.20 %) y 4 (58.96 %) no se registraron diferencias significativas, dado que en esta etapa se produce la mayor absorción de carbono. Finalmente, los cuadrantes 5 (66.60 %) y la salida (73.13 %) tampoco mostraron diferencias significativas entre sí. Estos resultados indican que a lo largo de todo el recorrido se lleva a cabo un adecuado de almacenamiento de carbono, con una evolución progresiva. Se identifican tres sectores principales de remoción claramente definidos, lo cual podría estar relacionado con la distribución de la vegetación en el sistema: en los primeros cuadrantes (1 y 2) la cobertura vegetal es menor, posiblemente debido al exceso de contaminantes, mientras que en los últimos cuadrantes (4 y 5) el crecimiento de la vegetación es muy buena.

Estudios demuestran que la utilización de plantas en humedales construidos ayuda al secuestro de carbono en gran medida, es por ello que se recomienda una buena elección de la misma, así como los cuidados necesarios para su sobrevivencia (36).

3.3. PARÁMETROS IMPORTANTES QUE SE RELACIONAN CON ALGUNOS CONTAMINANTES

3.3.1. EVALUACIÓN DE TEMPERATURA DEL AGUA

El agua es un medio biológico que necesita características específicas para alojar vida en los humedales construidos (HC). Una de las más importantes es la temperatura (T), ya que cuando esta es adecuada, favorece el crecimiento y metabolismo de microorganismos que ayudan en la eliminación de contaminantes, además de ayudar a la adaptación de plantas y la degradación de partículas orgánicas, por lo que una temperatura adecuada es crucial para tener un buen tratamiento de aguas residuales (8).

Cuando la T del agua se encuentra por arriba de los 23 °C, la vegetación crece exponencialmente, lo que acelera la actividad microbiana y mejora la contaminación de contaminantes como el amonio. A temperaturas más altas se favorecen procesos biológicos como la desnitrificación, que es de mucha importancia para la remoción del nitrógeno (17).

La medición de temperatura en este estudio fue llevada a cabo bajo al método de prueba NMX-AA.007-SCFI-2013 para aguas residuales, la cual arrojó un promedio oscilante en los 20.73 °C (Figura 6). Es importante señalar que esta medición se realizaba a las 9 am, sin embargo, es razonable inferir que la temperatura disminuya varios grados durante la noche. Este dato resulta relevante, ya que permite asumir que la temperatura del agua en el sistema permanece por debajo de los 20 °C durante más de 12 horas diarias.

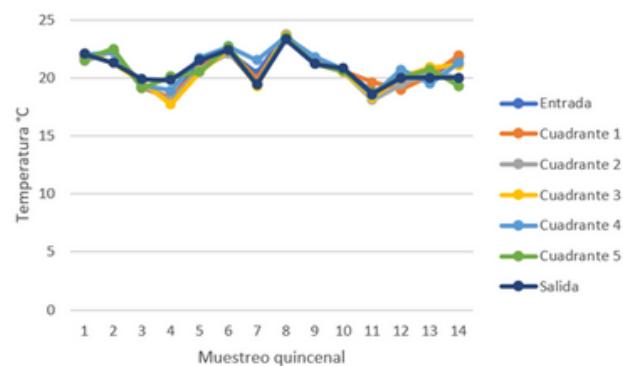


Figura 6. Evaluación de temperatura. Elaboración propia

Cuando la temperatura acuática se encuentra por debajo de 20°C, la actividad microbiana disminuye considerablemente, provocando afectaciones en la remoción de contaminantes como el nitrógeno y la materia orgánica. Esto sucede debido a que la cinética de reacción biológica es más lenta por debajo de estas temperaturas (8).

La DQO y los SDT son dos de los parámetros más sensibles a la disminución de la temperatura por debajo de 20 °C (26), ya que este descenso afecta la actividad microbiana y la dinámica de las reacciones, lo que provoca la acumulación de materia orgánica. Como consecuencia, se incrementan los niveles de sólidos flotantes en el agua, reflejándose en valores elevados de DQO y SDT (25).

3.3.2. EVALUACIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad Eléctrica (CE) refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, lo que se relaciona directamente con los iones disueltos en la misma. La medición de este parámetro es de importancia, ya que además de revelar la cantidad de iones disueltos en el agua, es una medida indirecta de la cantidad de SDT presentes. Esto significa que, a mayor CE, mayor es la carga de contaminantes en el agua (4).

La medición de este parámetro se realizó conforme a la norma NMX-AA-093-SCFI-2018, aplicable para aguas naturales, residuales tratados y no tratados. Los resultados arrojaron valores promedio de conductividad eléctrica de 2500.71 µS/cm en el afluente y 1961.35 µS/cm en el efluente, lo que representa una remoción promedio del 72 % (Figura 7). Al comparar estos datos con los reportados por otros autores (9, 24), quienes registraron concentraciones superiores a 2700 µS/cm en el afluente y por debajo de 1400 µS/cm en el efluente, se puede afirmar que el sistema evaluado logró remociones considerables en términos de conductividad eléctrica.

De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021, no se establecen límites máximos permisibles específicos para la conductividad eléctrica (CE) en aguas residuales, sin embargo, la norma indica que si la CE es inferior a 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se debe analizar la presencia de Escherichia coli, mientras que si la CE es igual o superior a 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, es necesario considerar parámetros adicionales para la evaluación del efluente. En el presente estudio no se realizó análisis para detectar la presencia de patógenos.

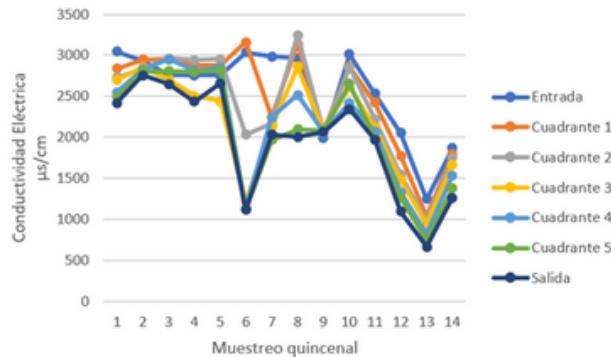


Figura 7. Evaluación de conductividad eléctrica. Elaboración propia

3.3.3. EVALUACIÓN DE PH

La evaluación del pH en humedales de tratamiento es de suma importancia ya que se encuentra relacionado con la eficiencia de procesos químico-biológicos como el crecimiento de colonias bacterianas degradadoras de materia orgánica. En general, mayoría de bacterias neutrófitas crecen en un rango óptimo cercano a 7, sin embargo, pueden sobrevivir en ambientes de 5 a 8 (23). Los valores encontrados en el pH del humedal comunitario oscilaban en 6.90 en el afluente y 6.80 en el efluente, lo que quiere decir que el agua se encontraba cercana a la neutralidad, lo que favorece la actividad microbiana y el crecimiento de plantas (32).

CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad del agua en HC es crucial para determinar su eficiencia en la remoción de contaminantes. En este estudio, se analizaron parámetros como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Disueltos Totales (SDT), obteniendo remociones del 48% para DQO y del 50.28% para SDT. Aunque estos resultados son prometedores, no cumplen con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021. Sin embargo, es relevante destacar que, a diferencia de otros estudios que también emplean plantas ornamentales y grava como sustrato, este trabajo evalúa un humedal de tratamiento diseñado para aguas residuales comunitarias, lo que implica que los afluentes contaminados no están sujetos a control alguno. En el caso de este sistema existía una gran presencia de materia orgánica y temperatura acuática por debajo de lo ideal, dificultando aún más la degradación. Posiblemente aplicando un tiempo de evaluación mayor, el humedal genere remociones más altas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de mi institución, El Colegio de Veracruz, que me brindó la oportunidad de cursar la Maestría en Desarrollo Regional Sustentable, reconocida dentro del Sistema Nacional de Posgrados. Agradezco especialmente al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento del proyecto de posgrado con el número de CVU 1324965. También quiero expresar mi gratitud a mis directores del proyecto por su confianza y apoyo constante durante el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Agudelo, R. M., Jaramillo, M. L., Peñuela, G., y Aguirre, N. J. (2010). Remoción del carbono orgánico disuelto en humedales piloto de flujos subsuperficial y superficial. Revista Facultad Nacional de Salud Pública, 28 (1), 21-28. Recuperado el 28 de marzo de 2025 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2010000100003&lng=en&tlng=es.
- Arias, C. A. (2005). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Revista Científica General José María Córdova, 3(3), 40-44. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476259066011>
- Bedoya, J. C., Ardila, A., Alba, N., y Reyes, C.J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. Revista internacional de contaminación ambiental, 30(3), 275-283. Recuperado en 28 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000300004&lng=es&tlng=es)
- Calderón, J. B., y Pulgar, A.F. (2023). Efecto de la conductividad eléctrica a partir de la salinidad y sólidos disueltos en los procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación para la remoción de compuestos nitrogenados en aguas residuales domésticas. Tesis de licenciatura. Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia. <https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/ce136f98-0ab0-41b1-9928-18e8ff08dce5/content>
- Chavarría, E. Y., Huamani, L. L., Cusiche, M. L., Humán, W., Angeles, J.M., Basurto, C. M. (2024). Sólidos totales disueltos en agua superficial para consumo humano en San Juan de Pillo, Perú. Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria, 8 (24), 870-881. Publicación electrónica del 20 de septiembre de 2024. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i24.310>
- Comisión Nacional del Agua (2020). Programa Nacional Hídrico 2020-2024: Programa Especial derivado del plan nacional de Desarrollo 2019-2024. CONAGUA. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacional-hidrico-2019-2024-190499>
- Comisión Nacional del Agua (2021). Intervalo Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. CONAGUA, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario_2021.pdf
- De La Mora-Orozco, C., Saucedo-Terán, R.A., González-Acuña, I.J., Córmez-Rosales, S. y Flores-López, H.E. (2018). Efecto de la temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 11(s2), 1-20. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4681>
- Echeverría, I., Aliaga, G., y Saavedra, O. (2024). Evaluación de calidad de agua residual tratada para riego en el valle alto de la ciudad de Cochabamba. Investigación y Desarrollo, 24(1), 35-45, DOI: 10.23881/1dupbo.024.1-3i
- García, J., Valdés-Casillas, C., Cadena-Cárdenas, L., Romero-Hernández, S., Silva-Mendizábal, S., González-Pérez, G., Leyva-García, G. N., y Aguilera-Márquez, D. (2011). Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2(spel), 97-111. Recuperado en 30 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000700008&lng=es&tlng=es
- González, D., Marín-Muñiz, J.L. y Ortega, G. (2024). Evaluación de humedales construidos sembrados con plantas ornamentales como tratamiento del nejayote (residuo del proceso de nixtamalización) y sus riesgos socio-ambientales en San José Pastorías, Actopan, México. Tesis de Maestría. El Colegio de Veracruz. Xalapa, Veracruz, México.
- Guerrero-Jiménez, G., Rico-Martínez, R., & Silva-Briano, M. (2017). Monitoreo de una planta tratadora de aguas residuales mediante pruebas de toxicidad aguda con el cladócero *Daphnia magna* y el rotífero de agua dulce *Lecane quadridentata*. Hidrobiológica, 27(1), 87-92. Recuperado en 27 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972017000100087&lng=es&tlng=es
- Hernandez-Cardona,M.A. (2019). Tratamiento de aguas residuales domesticas por medio de humedales artificiales híbridos en yucatan [tesis maestría]. Universidad Autónoma de Yucatán]. Repositorio Institucional.



14. Marín, C., Solís, R., López, G., Bautista, R. G. y Romellón, M.J. (2014). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. Revista IBEROAMERICANA DE LAS CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS, 5 (10). Recuperado a partir de <https://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/54>
15. Marín-Muñiz, J. L. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua. Agroproductividad, 10(5), 90-95.
16. Marín-Muñiz. (2016). Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 15 (2), 553-563
17. Martínez, M. D. (2016). Eficiencia en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Suspensos Totales en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Celendín. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú.
18. Martínez-Aguilar, K.E., Marín-Muñiz, J.L., Álvarez-Hernández, L.M., Delfín-Portela, E., y Zamora-Castro, S.A. (2024). Estado actual del tratamiento de aguas residuales mediante humedales de tratamiento a gran escala en el Estado de Veracruz, México. Energía renovable, biomasa y sostenibilidad, 6 (2), 32-42. <https://doi.org/10.56845/rebs.v6i2.105>
19. Mitsch, W. Y Gosselink, J. (2015). The wetland Environment. In wiley (Eds.), Wetlands fifth edition (pp.11-215). Wilery.
20. Morles, G., López, D., Vera, I. y Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia Orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. THEORIA, (22), 33-46.
21. Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M., y Reyes-Velázquez, C. (2024). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. Terra Latinoamericana, 41, <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>
22. Oluseun, O., Olorungbon, D., Olugbenga, D., Omoladun, E., Oluwasegun, E. y Adams, N. (2019) Evaluación del impacto de los efluentes de matadero en la calidad de las aguas subterráneas en una zona residencial de Omu-Aran, Nigeria. Enviromental Sciences Europe, Vol. 31, <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0201-5>
23. Ome, Ó., y Zafra, C. (2018). Factores clave en procesos de biorremediación para la depuración de aguas residuales. una revisión. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 21 (2), 573-585. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1037>
24. Pérez-Díaz, J.P., Ortega-Escobar, H.M., Ramírez-Hayala, C., Flores-Magdaleno, H., Sánchez-Bernal, H.I., Can-chulim, A., y Mancilla-Villa, O.R. (2017). Evaluación de la calidad del agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo. Acta Universitaria 29, doi. <http://doi.org/10.15174.au.2019.2117>
25. Raffo, E. y Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Industrial Data, Vol. 17, 71-80.
26. Ramos, J. D. (2019). Medición en línea de la DQO mediante correlación del coeficiente de absorción espectral de luz uv. PRODUCCIÓN+LÍMPIA, Vol. 13, 67-76, DOI: 10.22507/pml.v13n2a8
27. Rivas, B.A. (2019). Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas. Tesis de licenciatura.
28. Ruiz-Nájera, R. E., Medina-Meléndez, J. A., Carmona-de la Torre, J., Rincón-Enríquez, G., Sánchez-Yáñez, J. M., y Raj-Aryal, D. (2021). Efecto de la disposición de los residuos resultantes del beneficiado húmedo del café sobre las características físicas y química del agua de corriente natural. Terra Latinoamericana, 39, e884. Epub 13 de septiembre de 2021. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.884>
29. Sánchez, V.G., Palomino, P.A., y Malpartida, R.J. (2021). Eficiencia de humedales artificiales de totora y berros sobre efluentes de granja porcícola, Perú. ALFA Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias, 5 (14), <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.110>
30. Sandoval-Herazo, M., Nani, G., Sandoval, L. y Rivera S. (2020). Evaluación del desempeño de humedales construidos verticales parcialmente saturados para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Agrosistemas tropicales y subtropicales, 23 (28), 1-12.
31. Secretaría de Gobernación (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.
32. Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., y Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. Revista Tecnología en Marcha, 31(1), 35-46. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
33. Torres, A. X., Hernandez, N. A., Fausto, A. A., y Zurita, F. (2016). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de Nitrógeno. Revista Internacional De Contaminación Ambiental, Vol. (33). DOI:10.20937/RICA.2017.33.01.03
34. Velázquez-Vázquez, G., Ortega, E., Cobo, A., y Pérez-Armendáriz, B. (2023). Actividad antimicrobiana y antibioléptica del extracto vegetal Sambucus canadensis en bacterias patógenas transmitidas por alimentos. Biotecnia, 25(3), 176-183. 2024.<https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i3.2115>
35. Zitacuaro-Contreras, I.Z., Marín-Muñiz, J.L., Celis-Pérez, M., Vidal-Álvarez, M., León-Estrada, X. y Zamora-Castro, S. (2021). Vegetación ornamental utilizada en fitoremediación y sus potencialidades ambientales, económicas y sociales. Journal of Basic Sciences, 8 (23), 133-145. <HTTPS://doi.org/10.19136>
36. Zurita, F., Rojas, D., Álvarez, A. y Gutiérrez, M. (2015). Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos. INTERCIENCIA, 40(6), 409-415