



Humedales con plantas ornamentales y relleno de plástico reutilizado como tratamiento sustentable de aguas residuales

José Luis Marín-Muñiz^{1*}, Luis Carlos Sandoval Herazo², Sergio A. Zamora-Castro³,
María del Carmen Celis-Pérez¹

¹El Colegio de Veracruz, Academia de Desarrollo Regional Sustentable, Carrillo Puerto 26,
Centro, C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

²Instituto Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Misantla,
CP. 93821, Misantla, Veracruz México.

³Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería, Construcción y Hábitat, Bvd. Adolfo Ruiz Cortinez 455,
Costa Verde, CP. 94294, Boca del Río, Veracruz, México.

*Email del Autor de Correspondencia: soydraw@hotmail.com

Resumen

La contaminación hídrica es un problema mundial, el uso de sistemas convencionales para limpiarla es mínimo por su alto costo, y aún peor en áreas rurales, donde los humedales construidos (HC) son una opción sustentable. En este estudio evaluamos la remoción de contaminantes de aguas residuales comunitarias por HC (50m²), durante 6 meses. El HC constó de celdas rellenas de material rugoso de plástico reciclado y sembrado con plantas ornamentales (*Canna hybrids/Typha spp.*), así como celdas control sin vegetación. Se obtuvieron remociones de materia orgánica (DQO, SST) entre 50-90%, así como compuestos nitrogenados y de fósforo entre 60-80% en presencia de vegetación, mientras que en ausencia de plantas las remociones fueron hasta 60% menores, indicando fitorremediación y demostrando la funcionalidad del plástico utilizado como sustrato y como medio de anclaje de las plantas, las cuales se adaptaron con facilidad. Se concluye que el HC con material de plástico reciclado como sustrato es una opción eficiente y económica para remover contaminantes y como anclaje de vegetación.

Palabras claves: Tratamiento sustentable, vegetación ornamental, humedal construido, aguas comunitarias.

Abstract

Water pollution is a common problem worldwide, the use of conventional systems to treat wastewater is minimal due to the high costs, and even worse in rural areas, for which constructed wetlands (HC) are a sustainable option. We evaluated the pollutant removal from community wastewater by HC (50m²), during 6 months. The HC consisted of cells filled with rough recycled plastic material and planted with ornamental plants (*Canna hybrids/Typha spp.*), as well as control cells without vegetation were used. The study showed removals of organic matter (COD, TSS) between 50-90%, as well as nitrogen and phosphorus compounds between 60-80% in the presence of vegetation, while in the absence of plants the removals were up to 60% less, indicating phytoremediation and also demonstrating the functionality of the plastic material used as a substrate and as a means of anchoring the plants, which adapted easily. We concluded that HC with recycled plastic material as a substrate is an efficient and economical option to remove pollutants and anchor vegetation.

Keywords: Sustainable treatment, ornamental plants, constructed wetland, community waters.



1. Introducción

La contaminación del agua es una situación que ha avanzado a lo largo del tiempo, derivado en gran parte por el crecimiento poblacional, el uso desmedido del recurso, deforestación, y falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales [1]. Aunque existen varias opciones tecnológicas para limpiar el agua como sistemas de lodos activados, reactores anaerobios o lagunas de oxidación [2], estos suelen ser muy costosos, por lo que su implementación comúnmente se da y de forma escasa en áreas urbanas. En áreas rurales aún son menos los casos de tratamiento de agua, donde comúnmente las descargas de aguas residuales son vertidas a cielo abierto o a los ríos, incrementando con ello el problema de contaminación.

Una opción que contempla ventajas económicas en su construcción y operación son los humedales construidos (HC), así como ventajas sociales al ser sistemas fáciles de adoptar, instalar y que proveen de vegetación y al mejorar la calidad del agua esta se pueda reutilizar. Sumado a lo anterior también proveen ventajas ambientales al mitigar impactos de contaminación y ser nuevos ecosistemas para otras especies tanto de plantas como de animales. Las ventajas descritas demuestran ser estrategias sustentables [3, 4]. Sin embargo, su uso en México atendiendo problemas reales y no solo a nivel laboratorio, ha sido mínimo derivado del desconocimiento de su uso y de construcción [5].

En áreas rurales (<2500 habitantes), de las cuales hay más de 185 000 en México [6], es común que el ingreso económico sea inferior al de áreas urbanas por la escasez de oportunidades laborales y empleos menos remunerados, lo cual en conjunto genera menores condiciones de desarrollo, y menores oportunidades gubernamentales atendiendo problemáticas comunales como la contaminación del agua, derivado también del bajo número de población comparado con áreas urbanas y por la enorme dispersión de las áreas rurales.

Considerando lo anterior, es común que los pobladores de sitios rurales no cuenten con recursos propios para la instalación de sistemas de tratamiento de agua, por los altos costos que estas requieren para construcción, operación y mantenimiento. Ante tal situación los HC al ser celdas rellenas de un medio granular por donde se pasa el agua y donde se hace crecer vegetación que en conjunto favorecen la limpieza del agua, un gasto alto lo podría tener el medio o sustrato, que comúnmente es grava volcánica o piedra porosa de río o zeolita (costo por metro cúbico de 200-500 pesos mexicanos) [7], por lo que usar materiales reciclados como tapa roscas, o partes rugosas de botellas, sería una opción que disminuiría la basura y generaría cero gasto en material de relleno, por lo que investigar su funcionalidad como medio de sustrato para la remoción de contaminantes en HC es el objetivo principal de esta investigación.

2. Antecedentes o marco teórico

Los HC son una ecotecnología para el tratamiento de aguas residuales, estos se clasifican en humedales de flujo superficial (HC-S) o subsuperficial (HC-SS) (Figura 1). En los segundos, de acuerdo a la dirección del flujo, este puede ser de flujo vertical u horizontal. Los HC-S son celdas donde existe una base del sustrato o suelo y sobre el cual fluye el agua, la cual está en contacto con la atmósfera. En estos mismos puede haber plantas que emergen del sustrato y salen de la columna de agua (emergentes), enraizadas al sustrato pero no salen de la columna de agua (sumergidas) o aquellas que flotan sobre la columna de agua (flotantes). Por otro lado, los HC-SS son celdas rellenas de un medio granular (grava, zeolita, piedra porosa, tezontle), donde el agua no se observa y al estar la celda rellena solo puede haber plantas emergentes [3, 4]. Para mejorar las remociones de contaminantes del agua, los HC-S y los HC-SS pueden combinarse y entonces se les llaman humedales híbridos.

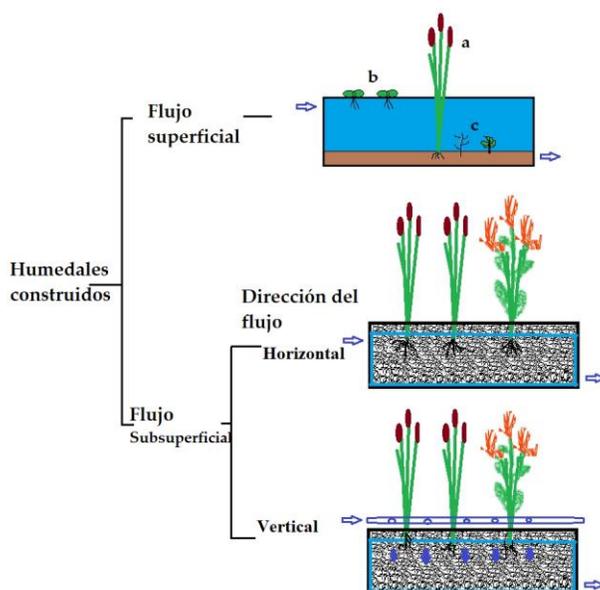


Fig. 1. Tipos de humedales construidos.

La funcionalidad de los HC ha sido estudiada para remover contaminantes de aguas residuales e industriales en algunos países de Estados Unidos [3], Europa [8], y Latinoamérica [9], corroborando remociones superiores al 50% de diversos contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos. La mayoría de HC estudiados han empleado como plantas, especies de humedales naturales por su fácil adaptación. Sin embargo en este estudio se sugiere el uso de plantas ornamentales también de la región, pero que proveen flores y tejido que posteriormente pueda tener un uso artesanal y de mayor estética a la ecotecnología. Por todo lo anterior, resultan pertinentes estudios de HC que evalúen la funcionalidad de nuevos sustratos, como los plásticos y con uso de plantas ornamentales, para con ello, propiciar espacios más económicos, funcionales y estéticos y por ende, más fáciles de apropiar y adoptar por la sociedad.

3. Metodología experimental

El estudio se realizó en la comunidad de San José Pastorías, municipio de Actopan, Veracruz, ubicado en la zona central del estado de Veracruz a los 19°33' 53" N, 96° 34' 16" O, a una altitud de 260 msnm. La población es de 620 personas, 49.8% son hombres y 50.2% mujeres. Tal población se consideró como caso de estudio porque es una población que antes de la intervención carecía de sistema de tratamiento y el agua residual era descargada a cielo abierto y otra parte dirigida al río comunitario "Topiltepec", que se conecta con la cuenca Actopan a aproximadamente 3km.

El humedal estudiado se basó en 6 celdas (5x0.8x0.7m) de HC-SS de flujo horizontal, las cuales se hicieron excavando estas en el suelo, para favorecer la llegada de agua por gravedad (Figura 2). Los muros de las celdas fueron construidos con ladrillo y cemento, mientras que la base de estas fue hecha con concreto, todo ello para hacerlas impermeables. Todas las celdas fueron rellenas de residuos de plástico reutilizado como tapa roscas, cuellos de botellas y bases con dobleces de botella, estas partes fueron seleccionadas para facilitar la creación de hábitats de películas microbianas que favorecieran la remoción de contaminantes. Sobre el relleno de plástico una capa de 15cm de grava volcánica fue colocada para evitar flotación del plástico. 2 celdas fueron sembradas con *Canna hybrids*, 2 celdas con *Typha sp.* Ambas plantas ornamentales fueron colectadas de las zonas ribereñas de la región, para su fácil adaptación a condiciones de humedal y de clima. Las 2 últimas celdas fueron sin vegetación como controles. El agua residual llegaba del drenaje comunitario a una fosa de almacenamiento que funcionó como estanque de sedimentación (tratamiento primario) y después pasaba por una malla o criba

(tratamiento secundario) para separación de sólidos y posteriormente se hacía llevar por gravedad mediante tuberías a las celdas de HC como tratamiento terciario, manteniendo un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 4 días.

El tratamiento de las aguas residuales es llevado a cabo por procesos físicos, químicos y biológicos. El sistema al incluir plantas, también se le conoce como sistema de fitorremediación. Con la intención de medir la funcionalidad del HC en la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, mensualmente y durante 6 meses, se midieron los elementos más comunes de medición en aguas residuales comunitarias, incluyendo la concentración de demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), amonio ($N-NH_4$) y fósforo total (PT) tanto a la entrada como a la salida de los HC, y así comparando la concentración de estos en el agua antes de entrar a los HC (Q1) y su concentración en el agua una vez saliendo de las celdas (Q2) de tratamiento se observó si hubo remoción del contaminante con la siguiente fórmula: $((Q1-Q2)/Q1)*100$. Las muestras fueron analizadas mediante técnicas colorimétricas y comparadas con los límites máximos permitidos (LMP) de acuerdo a la norma oficial mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996).



Fig. 2. Construcción y acondicionamiento del humedal en estudio.

4. Resultados experimentales

La remoción de contaminantes mediante HC es una estrategia utilizada ya hace algunas décadas principalmente en países desarrollados, sin embargo en México su utilidad se ha dado mayormente a nivel laboratorio o a escala de microcosmos como parte de proyectos de investigación de tesis [8], desafortunadamente aún son pocos los proyectos con HC atendiendo problemas reales y aún menos los que exploren nuevos sustratos reutilizados y económicos como los residuos de plástico que se probaron como sustratos de HC en este estudio, para tal caso durante 6 meses de operación del sistema, se observaron concentraciones de DQO que oscilaron entre 200 y 350 mg/L en la entrada del sistema, mientras que a la salida las concentraciones variaron entre 20 y 60 mg/L, siendo hasta 10 veces menor la concentración al pasar por el HC, indicando su funcionalidad para eliminación de materia orgánica (Figura 3). Con las concentraciones dadas se logró remover entre 80% y 90% en los controles, y entre 90% y 95% para los sistemas con presencia de plantas. De acuerdo a la NOM-001 SEMARNAT, el LMP que reporta es para DBO de 30mg/L, considerando que el DQO incluye DBO, lo sistemas con vegetación presentaron concentraciones de este hasta en 20mg/L, indicando la funcionalidad del sistema y el cumplimiento de la norma para este parámetro. Lo anterior demuestra cerca de un 10% de mayores remociones efecto de la fitorremediación, sin notarse altos cambios entre el tipo de plantas. Remociones similares en otros HC han sido reportadas, a pesar de que en tales casos, el sustrato utilizado ha sido material pétreo [9]. Las remociones observadas son asociadas a procesos de sedimentación y filtración, más que a procesos biológicos, además el TRH manejado se encuentra dentro de los reportados como óptimos para la degradación de materia orgánica [10].

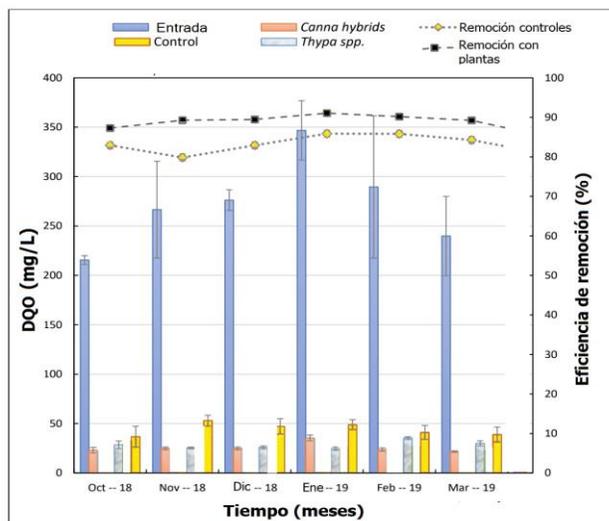


Fig. 3. Concentración y remoción de DQO en los humedales en estudio.

Para el caso de SST las concentraciones fueron entre 100 y 250 mg/L en la entrada de los humedales, mientras que en la salida variaron solo entre 40 y 80 mg/L en las celdas con plantas, y en los controles tales concentraciones fueron entre 120 y 250 mg/L (figura 4), con lo cual se muestra una reducción de los SST como efecto de la presencia de plantas hasta de 3 veces mayor, indicando con ello la importancia de la presencia de las plantas. Las concentraciones observadas a la salida indican de acuerdo a la norma estar en el límite permitido, ya que para tal parámetro la norma establece un máximo de 40mg/L. Cabe mencionar que entre las remociones con *Typha* y *Canna* las variaciones no son mayores a 20%. La eliminación de los SST pudo haberse llevado principalmente por sedimentación y filtración, dado que la operación del humedal es nueva, solo los 6 meses de estudio. En períodos más largos de uso de humedales o de TRH, descomposición de los SST por bacterias especializadas pueden darse en el lecho del material sustrato [11].

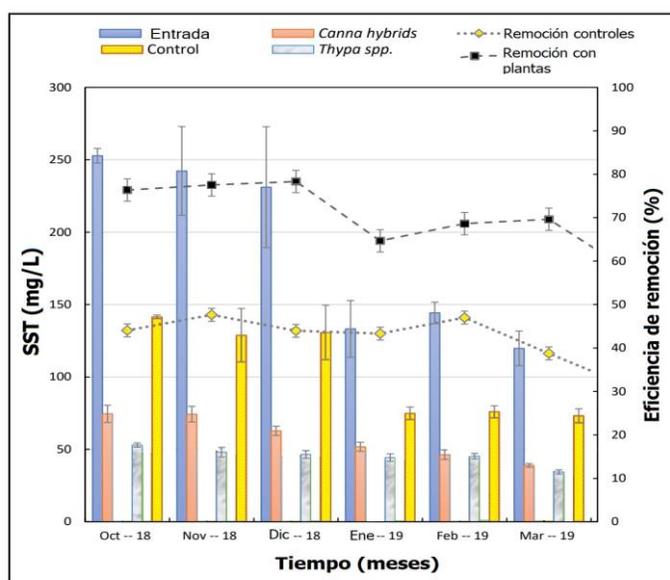


Fig. 4. Concentración y remoción de SST en los humedales en estudio.

Respecto a las remociones de nitrógeno en forma de amonio, estas se mantuvieron entre 12 y 20 mg/L en las entradas de las celdas durante el estudio. En las celdas control el amonio osciló entre 7 y 18 mg/L, mientras que en presencia de plantas solo hubo concentraciones entre 2 y 5 mg/L (figura 5). Con los datos anteriores se detectaron remociones del nutriente entre 35 y 45% en las celdas control. Con plantas, las remociones fueron entre 70 y 90%, lo cual demuestra la alta capacidad de los HC para remoción de contaminantes como compuestos nitrogenados. Cabe mencionar que gran parte del nitrógeno consumido pudo haberse dado por la absorción del nutriente por las plantas para su crecimiento y por ello la alta diferencia de remociones promedio entre controles sin plantas (39.5%) contra celdas con presencia de vegetación (80.5%). Otro caso también común en HC como resultado del ciclo del nitrógeno puede ser debido a que el amonio es convertido a nitratos en condiciones aerobias (nitrificación), en los HC esto se da en el área de rizósfera [3, 11]. Aunque en este estudio no se midieron los nitratos, la medición de amonio y las remociones observadas entre controles y celdas con plantas demuestran el proceso de biorremediación mediante fitorremediación.

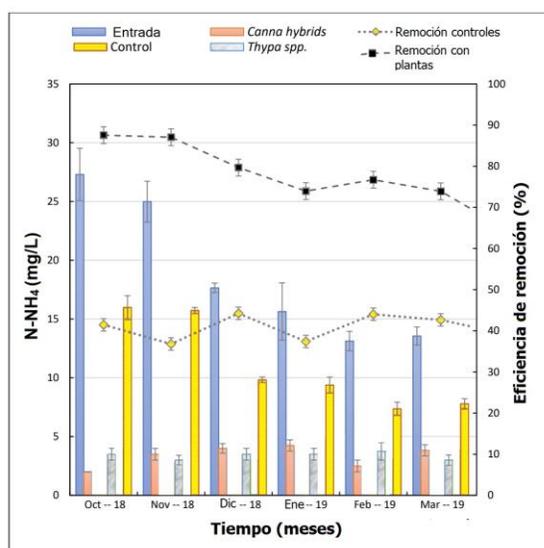


Fig. 5. Concentraciones y remoción de amonio en los humedales en estudio.

Otro de los parámetros medido fue la concentración de fósforo como fósforo total, el cual osciló en la entrada de las celdas de 13 a 20 mg/L, mientras que en los controles las concentraciones variaron de 13 a 18 mg/L, notándose con ello muy pocos cambios para tal parámetro. Para el caso de las celdas con presencia de plantas si se observaron concentraciones menores que se mantuvieron entre 2 y 3 mg/L. El LMP es de 5 mg/L, por lo que se cumple con la norma. Con lo anterior las remociones resultantes fueron apenas menores al 5% para celdas control, mientras que para celdas con plantas estas fueron entre 80 y 90%. Las altas remociones pudieron ser dadas principalmente por dos casos, uno por adsorción en el sustrato plástico y segundo por absorción de las plantas, el cual es un nutriente primario para el crecimiento de las especies, ambos casos conllevaron a tales altas remociones detectadas, lo cual demuestra que este tipo de especies de plantas con el sustrato utilizado favorecen tales procesos de biorremediación del fósforo total. Otras precipitaciones con aluminio, hierro o calcio pueden darse con el elemento fósforo en los humedales [3, 11], sin embargo, en este caso no los podemos atribuir a eso porque en este estudio no se midieron concentraciones de tales elementos.

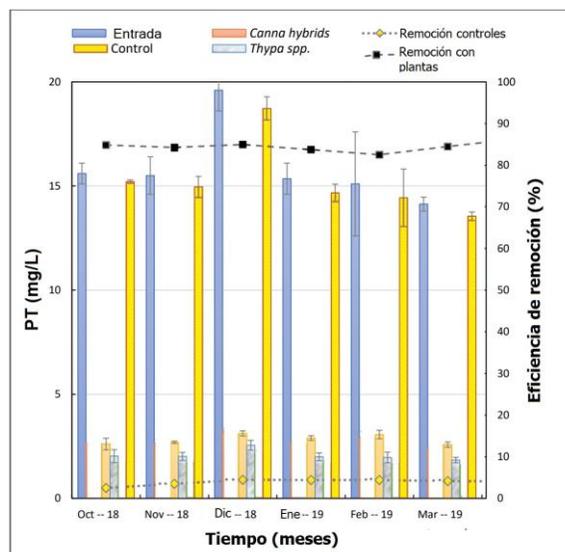


Fig. 6. Concentraciones y remoción de fósforo total en los humedales en estudio.

La funcionalidad de la ecotecnología de humedales con plásticos rugosos o con dobleces y de las plantas en estudio, hace recomendable su uso en futuros proyectos de intervención de tratamiento de aguas residuales. Además, nuevos estudios sobre el aprovechamiento de las plantas pueden generarse para propiciar mayor aceptación de los HC. Una reciente investigación en revista sobre temas de sustentabilidad [12], describió que la vegetación cultivada en humedales construidos provee potencialidades ambientales, económicas y sociales. Entre las sociales destacan las actividades artesanales, ornamentales y de medicina que pueden aprovecharse del uso de las plantas que el HC genera, lo cual podría favorecer un estudio de economía circular.

Para considerar la sustentabilidad de un humedal como sistema de tratamiento debe contemplarse además de su beneficio ambiental al remover contaminantes y el uso de plantas, su bajo costo de construcción comparado con sistemas convencionales y los beneficios sociales, que este no requiera de energía eléctrica para su funcionalidad, por lo que su instalación debe siempre considerar un área donde por gravedad el agua a tratar llegue y de allí al agua tratada poder darle un segundo uso como la irrigación de cultivos como sucede en el sitio de estudio.

5. Conclusiones

Los HC rellenos con residuos de plástico rugoso y sembrados con plantas ornamentales fueron eficientes en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos entre 70 y 90%. Este estudio provee evidencia que reutilizar los residuos de plástico rugoso como sustrato de relleno en HC, disminuye el costo de construcción de dichos sistemas y permite el buen anclaje de las plantas y funcionalidad de la ecotecnología por lo que su uso es recomendable, nuevas investigaciones sobre el proceso de degradación del plástico son importantes en el futuro.

También cabe resaltar que la fitorremediación con plantas de *Typha sp* y *Canna hybrids* favoreció mejores resultados de eliminación de contaminantes que en sistemas con ausencia de vegetación, demostrando la funcionalidad de las plantas ornamentales en la remoción de contaminantes y de allí la importancia de persuadir en su uso para coadyuvar en sistemas eficientes, estéticos y que propicien su adopción y apropiación. Para lograr lo último, estudios de participación comunitaria, capital social y de aprovechamiento de los servicios ambientales del HC son sugeridos.



6. Agradecimientos

Agradecemos a José María Marín, Emmanuel Barradas, Eriberto Pérez, Ricardo Rodríguez y Edgar González del programa de Gobierno “Jóvenes Construyendo el Futuro” por su valioso apoyo en el trabajo de campo y análisis de muestras. Este trabajo fue parcialmente apoyado por el CONACyT a través de la beca de doctorado del segundo autor.

7. Referencias

- [1] Chaundhry, FN. y Malik, MF, “Factors affecting water pollution: a review”, *Journal of Ecosystem & Ecography*, 7, 1, 2017, 1-3.
- [2] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), “Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación”, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, Diciembre 2019.
- [3] Mitsch, WJ. y Gosselink, JG, “Wetlands”, 15 ed. John Wiley & Sons, Nueva York, 2015.
- [4] Marín-Muñiz, JL, “Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua”, *Agroproductividad*, 10, 5, 2017, 90-95
- [5] Marín-Muñiz JL., Zitácuaro I. y Palma E.M., “Participación comunitaria para implementación de humedales para limpiar el agua residual: caso de estudio en Pastorías, Actopan, Ver. En “Miradas colectivas, rutas y aportes a la sustentabilidad”, 103-115, Secretaría de Medio ambiente del Estado de Veracruz, 11 de marzo 2021.
- [6] INEGI, “Censo de población y vivienda 2020”, <https://cuentame.inegi.org.mx/>
- [7] Marín-Muñiz J.L., “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, 2016, 553-563.
- [8] Haberl, R., Perfler, R. y Mayer, H., “Constructed wetlands in Europe”, *Water Science and Technology*, 32, 3, 1995, 305-315.
- [9] Rodríguez-Domínguez, MA., Konnerup, D., Brix, H. y Arias, C., “Constructed wetlands in Latin American and the Caribbean: a review of experiences during the last decade”, *Water*, 12, 2020, 1744.
- [10] García-García, PL., Ruelas-Monjardín. L. and Marín-Muñiz JL., “Constructed wetlands: a solution to water quality issues in Mexico?”, *Water Policy*, 18, 2016, 654-669.
- [11] Wang, Y., Cai, Z., Sheng, S., Pan, F., Chen, F. y Fu, J., “Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands”, *Science of The Total Environment*, 701, 2020, 134736.
- [12] Metcalf y Eddy. “Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización”. Madrid (España), McGraw-Hill, 1995
- [13] Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M. y Muench, E. “Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas”, Eschborn (Alemania), Agencia de cooperación internacional de Alemania, GIZ, 2011.
- [14] Zitácuaro-Contreras, I., Vidal-Álvarez, M., Hernández y Orduna, MG., Zamora-Castro, SA., Betanzo-Torres, EA., Marín-Muñiz, JL. y Sandoval-Herazo, LC. “Environmental, economic, and social potentialities of ornamental vegetation cultivated in constructed wetlands of Mexico”, *Sustainability*, 13, 2021, 6267.