

## Evaluación del desempeño de un Humedal Construido como tratamiento complementario de un efluente azucarero hidrolizado

Liliana Castro-Méndez <sup>1,\*</sup>, Norma Alejandra Vallejo-Cantú <sup>1</sup>, Alejandro Alvarado-Lassman <sup>1</sup>, Francisco Orduña-Gaytán <sup>1</sup>, Erik Samuel Rosas-Mendoza <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de ambiental I, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México

<sup>2</sup> Laboratorio de ambiental I, División de Estudios de Posgrado e Investigación CONACYT- Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9 Núm. 852 Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz, C.P. 94300, México

\*Autor de correspondencia: [lili\\_cm2807@hotmail.com](mailto:lili_cm2807@hotmail.com)

**Desarrollo Sustentable** (Humedales naturales y construidos).

**Resumen:** Diversas aportaciones han demostrado que una opción viable como tratamiento complementario para las aguas residuales es el uso de los Humedales Construidos. En este proyecto, se evaluó el desempeño de un humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical (HCMe) por medio de la eliminación de materia orgánica de un efluente hidrolizado de la industria azucarera. Este sistema tiene como medio soporte PET, tezontle y piedra de río y tres especies vegetales: *Typha latifolia* L, *Canna indica* L y *Spathiphyllum wallisii*. Se alimentó a cinco concentraciones diferentes, con TRH de 3 días y un flujo de alimentación de 1.25 L/h. Los resultados obtenidos muestran que el efluente hidrolizado más concentrado presentó las remociones más altas con 52.38 %, 37.86 %, 66.09 % y 61.14 % en DQO<sub>T</sub>, DQO<sub>S</sub>, ST y STV respectivamente, en comparación con las otras evaluadas. Por lo que estos sistemas son una alternativa económicamente viable debido a que no tienen costo energético ya que de manera natural logran aprovechar y remover los contaminantes.

**Palabras clave:** Humedal Construido, remoción, DQO, vegetación.

## Performance evaluation of a Constructed Wetland as a complementary treatment of a hydrolyzed sugar effluent

**Abstract** Various contributions have shown that a viable option as a complementary treatment for wastewater treatment is the use of Constructed Wetlands. In this project, the performance of a Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland (HCMe) was evaluated by removing organic matter from a sugar industry hydrolyzed effluent. This system has as a medium PET, tezontle and river stone and three plant species: *Typha latifolia* L, *Canna indica* L and *Spathiphyllum wallisii*. It was fed at five different concentrations, with TRH for 3 days and a feed flow of 1.25 L / h. The results obtained showed that the most concentrated effluent presented the highest removals with 52.38%, 37.86%, 66.09% and 61.14% in DQO<sub>T</sub>, DQO<sub>S</sub>, ST and STV respectively, compared to the others evaluated. Therefore, these systems are an economically viable alternative because they do not have an energy cost since they naturally manage to take advantage of and remove pollutants.

**Key words:** Constructed wetland, removal, COD, vegetation.

### Introducción

La producción de azúcar de caña provoca la contaminación de los cuerpos de agua, debido al contenido de restos de materia orgánica, metales, químicos, variaciones del pH y contenido de sólidos que acompañan a la remolacha al entrar en la instalación, por lo tanto estas descargas presentan altas resistencias (CONAGUA, 2018; Fito *et al.*, 2018), lo que representa un problema que debe ser tratado. Actualmente se han desarrollado tecnologías diferentes de Biorreactores anaerobios para el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, a pesar de las ventajas significativas, el efluente de los Biorreactores anaerobios de un solo paso no cumple con los estándares de descarga (Liu *et al.*, 2015). Por lo que los Humedales Construidos (HC) son ideales como tratamiento complementario de las aguas residuales y por ello resulta pertinente utilizar este tipo de alternativas, ya que estos sistemas de tratamiento tienen el propósito de simular los humedales naturales en su función de mejorar la calidad del agua (Marin-Muñiz, 2017). Los HC están conformados por macrófitas, las cuales interactúan de forma física, química y biológica con las aguas residuales, depurándolas lento y progresivamente (Sandoval-Herazo *et al.*, 2016).

Para el caso del efluente azucarero el pretratamiento anaerobio antes de los sistemas ecológicos es decir los HC es muy ventajoso (Ayaz *et al.*, 2011) pues durante la hidrólisis de compuestos orgánicos sólidos en el biorreactor anaerobio se aumenta la biodegradabilidad de las aguas residuales y, por lo tanto, mejora el rendimiento de los HC (Liu *et al.*, 2015).

En el presente proyecto se utilizó un Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical (VSSF por sus siglas en inglés) para el tratamiento de un efluente hidrolizado de la industria azucarera, ya que es considerado una alternativa de solución para tratar efluentes de manera eficaz, siendo capaz de reducir la materia orgánica y los nutrientes en las aguas residuales (Perdana *et al.*, 2018). Algunas de sus ventajas son los bajos costos de operación y mantenimiento (Pucher y Langergraber, 2019).

## Materiales y Métodos

En este proyecto se evaluó la remoción de carga orgánica del Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical (HCMe) mediante el tratamiento de un efluente hidrolizado de la industria azucarera.

### Obtención del efluente azucarero hidrolizado

Se trabajó con los efluentes hidrolizados provenientes de un Reactor de Biopelícula Anaerobio, los cuales presentaron diferentes concentraciones debido a las variaciones de operación del Reactor. Los efluentes fueron trasladados, almacenados y refrigerados en el área anexa de la planta de Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM) del Instituto Tecnológico de Orizaba.

Debido a las características del efluente, fue necesario realizar las siguientes determinaciones para su posterior alimentación al humedal.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y métodos de prueba

Análisis	Unidades	Método de prueba
DQO <sub>T</sub> y DQO <sub>S</sub>	g/L	Método colorimétrico 5220 D Standard Methods
ST y STV	g/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
pH	-	Método potenciométrico 4500- H+B de Standard Methods

### Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical (HCMe)

El diseño general del HCMe se muestra en la Figura 1, está conformado por un tanque de alimentación y 3 celdas, las cuales cuenta con un volumen total de 324 L y un volumen útil de 90 L.

Como soporte se empleó, piedra de río, trozos de polietileno y tezontle tamaño medio comercial. La vegetación plantada en los humedales fueron las especies, *Typha latifolia* L, *Canna indica* L y *Spathiphyllum wallisii* las cuales por sus múltiples funciones permiten la biodegradabilidad de la materia orgánica. Abdelhakeem *et al.*, (2016) concluyeron que la vegetación es un factor importante que afecta la eficiencia de VSSF sobre la eliminación de DQO, DBO, SST y NH<sub>4</sub>.

### Operación del HCMe

En el arranque y acondicionamiento del HCMe se inició alimentando agua fresca, para la activación de la vegetación, posteriormente se inició la alimentación al humedal con el efluente azucarero hidrolizado correspondiente a la primera prueba procedente del RBA<sub>p</sub> bajo sus respectivas variaciones en las condiciones de operación. Por lo que la concentración de DQO suministrada al sistema dependió de las características del efluente. Para su posterior alimentación se diluyeron 50 L de efluente hidrolizado en 220 L de agua fresca para evitar el decaimiento de la vegetación por la alta carga, las concentraciones evaluadas se muestran en la Tabla 2. Se operó el HCMe con TRH de 3, por lo que cada tercer día el HC fue alimentado, esta alimentación se realizó cinco veces bajo las condiciones de la prueba 1, posteriormente la prueba 2 y así sucesivamente, el flujo de alimentación fue de 1.25 L/h.

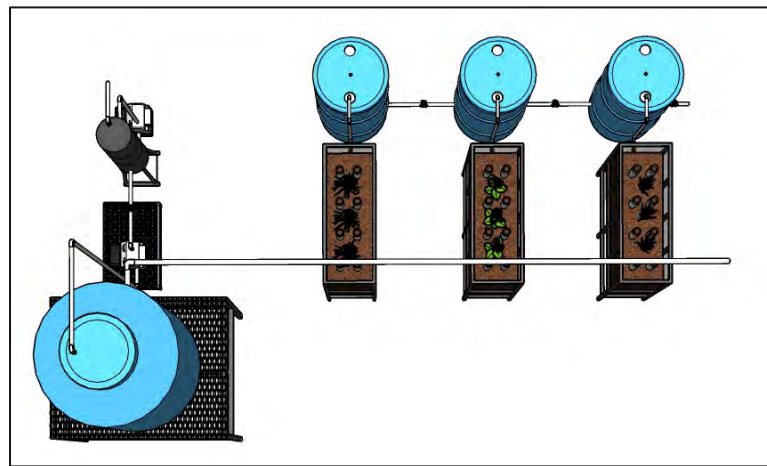
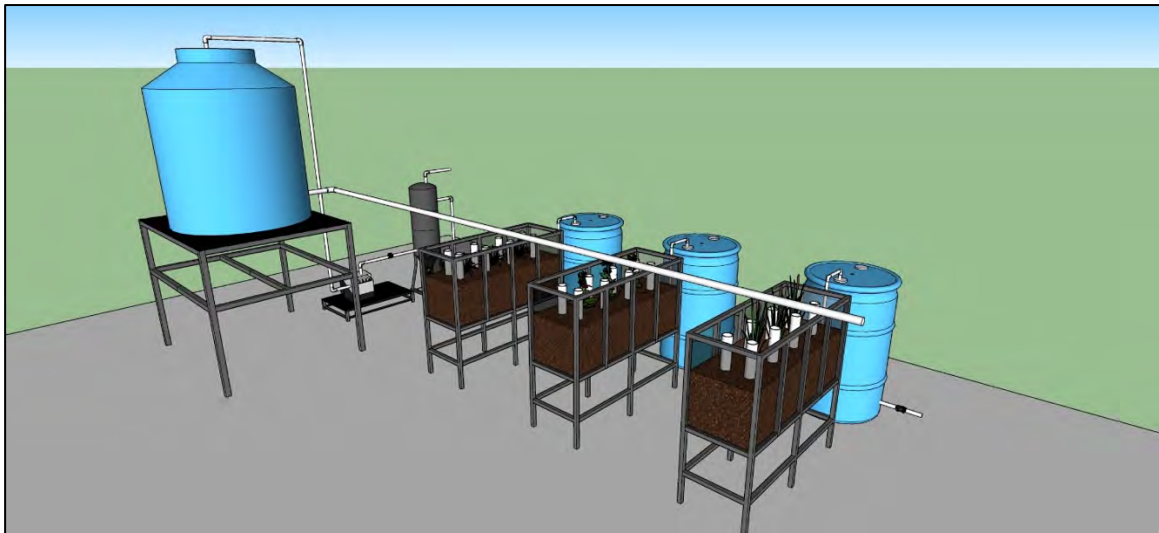


Figura 1. Diseño del Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical (HCMe) Orduña-Gaytán, *et al.*, (2021)

Tabla 2. Condiciones de operación del HCMe

Prueba	Cva (gDQO/Ld)	TRH (Día)	pH
1	16.25	3	5.9
2	19.49	3	5.9
3	20.50	3	5.8
4	22.26	3	5.9
5	24.84	3	5.8

#### Monitoreo de crecimiento de las especies

Se monitoreo el crecimiento de la vegetación de cada humedal, se midió altura, largo y ancho de la planta y se contabilizó el total de especies plantadas. Esto para visualizar la tolerancia y comportamiento de las plantas sometidas a las condiciones del efluente evaluado.

#### Análisis de remoción de DQO del HCMe

Se evaluó la capacidad del Humedal Construido por medio de la eliminación de materiales disueltos y suspendidos en el efluente, así como la eliminación de materia orgánica por medio de la DQO y determinación de ST y STV. Las remociones obtenidas corresponden a la operación global de las 3 celdas en conjunto.

## Resultados y discusión

Esta segunda etapa de tratamiento de aguas residuales de la industria azucarera comenzó con la alimentación al humedal de agua fresca para reactivación y adaptación de la vegetación plantada.

### Arranque y operación del humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical

Debido a la elevada concentración que presentaron los efluentes hidrolizados mostrados en la Tabla 3 fue necesario realizar diluciones en cada alimentación, por lo que las concentraciones de alimentación se muestran en la misma.

Tabla 3. Características del efluente hidrolizado y de la alimentación al HCMe

Prueba	Concentración promedio del hidrolizado azucarero (gDQO/L)	Concentración inicial (gDQO/L)
1	23.84	5.41
2	28.59	6.49
3	30.08	6.83
4	32.65	7.42
5	36.43	8.28

Una vez realizada la dilución del efluente proveniente del biorreactor anaerobio se alimentó con la primera prueba correspondiente a una concentración de 5.41 gDQO/L con TRH de 3 días. La carga más alta evaluada fue de 8.28, este dato concuerda con la alimentación máxima reportada por Orduña-Gaytán *et al.*, (2018). En la Figura 2 se muestra los valores de las 5 pruebas realizadas en cuanto a concentración de DQO<sub>T</sub>, los resultados de entrada y salida indican la eliminación la materia orgánica durante los 75 días de operación.

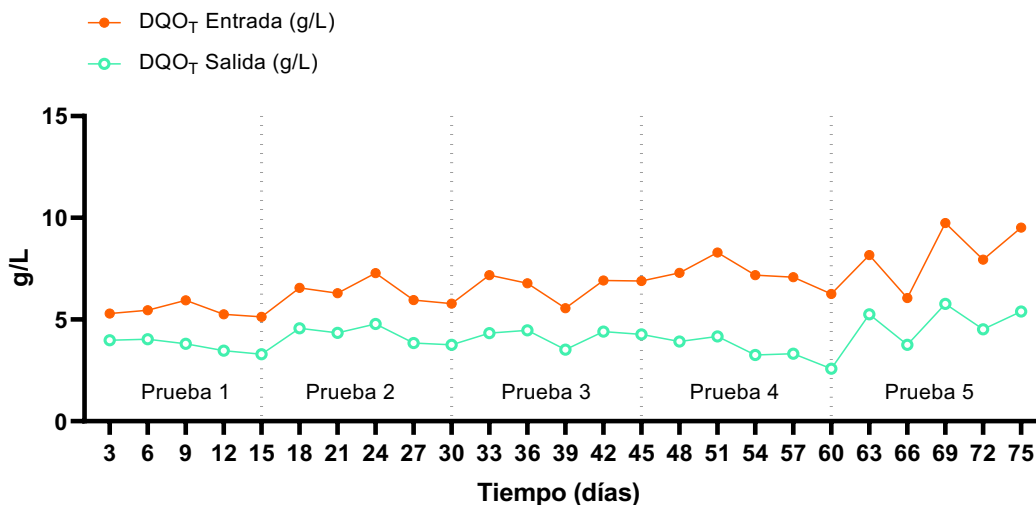


Figura 2. Resultados de la concentración de DQO<sub>T</sub> de entrada y salida

En la Figura 3 se muestran los resultados de remoción de la DQO<sub>T</sub> y DQO<sub>5</sub> de cada prueba evaluada. Los resultados evidencian que en cada prueba hubo remoción de contaminantes, por acción de la flora, los microorganismos y las características del sistema. La mayor remoción fue para la prueba cuatro, obteniendo un máximo de 52.48 % y 37.86 % respectivamente. Mientras que para la menor concentración evaluada se obtuvo una remoción de DQO<sub>T</sub> de 32.70 % y DQO<sub>5</sub> de 24.47 %.

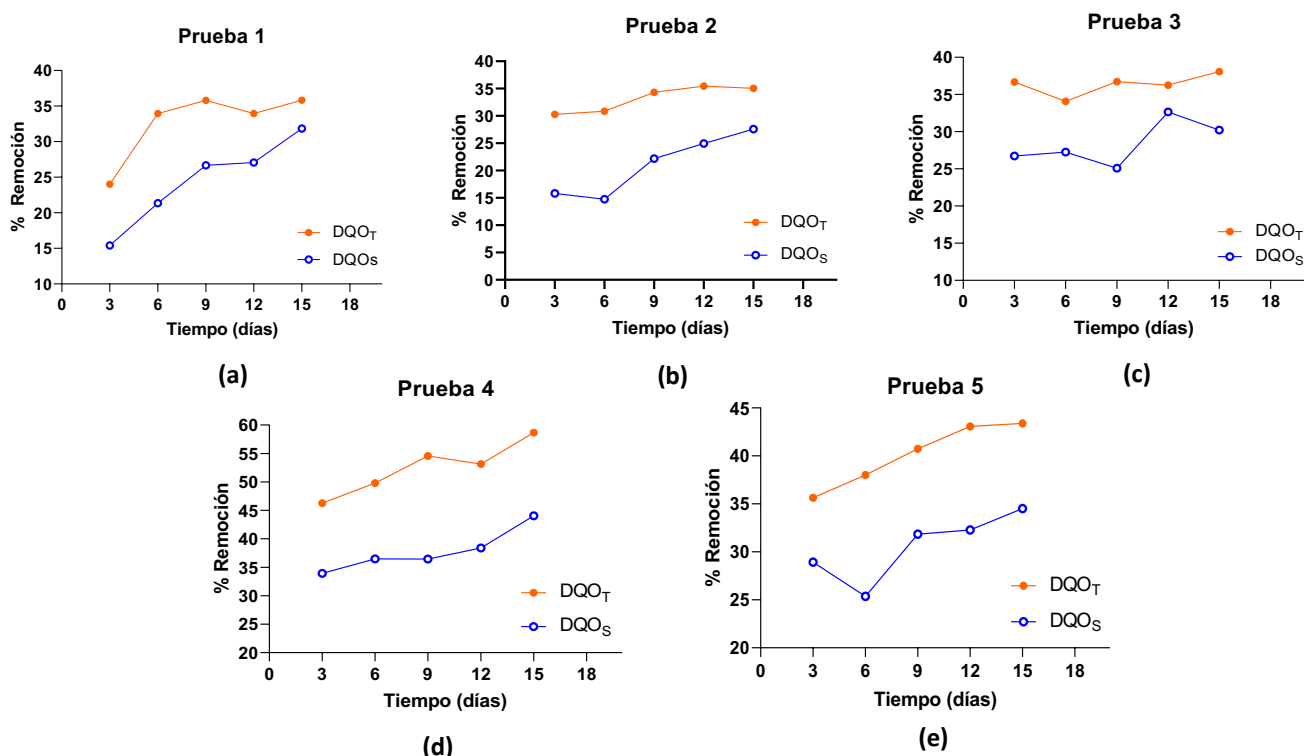


Figura 3. Porcentajes de remoción de DQO<sub>T</sub> y DQO<sub>S</sub> de cada prueba: a) Remoción de materia orgánica de la prueba inicial, b) Remoción de materia orgánica de la prueba dos, c) Remoción de materia orgánica de la prueba tres, d) Remoción de materia orgánica de la prueba cuatro y e) Remoción de materia orgánica de la prueba cinco.

En la Tabla 4 se presentan las remociones promedio obtenidas en el sistema completo, conformado por 3 celdas con 3 diferentes especies de plantas. El Humedal sometido a concentraciones de 7 - 8 gDQO/L, mostraron mejores remociones en comparación a las pruebas sometidas a menores cargas.

Tabla 4. Porcentaje de remoción de DQO<sub>T</sub> y DQO<sub>S</sub> en el HCMe

Concentración promedio (gDQO/L)	TRH (h)	% DQO <sub>T</sub> Remoción Promedio	% DQO <sub>S</sub> Remoción Promedio
5.41	3	32.70	24.47
6.49	3	33.19	21.04
6.83	3	36.96	28.38
7.42	3	52.48	37.86
8.28	3	40.16	30.59

En la Figura 4 se presentan las remociones promedio de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles, por lo que se puede observar la disminución de ST en un 66.09 % mientras que para los STV se alcanzó una remoción de 61.19 %, estos resultados corresponden a la cuarta prueba. Lo que nos indica el buen funcionamiento del medio de soporte para la retención de sólidos.

Debido a que el efluente se encontraba hidrolizado el pH fue de 5.8 a 5.9, pero cuando se preparó la alimentación estas condiciones cambiaron ya que el pH aumento, los valores se muestran en la Figura 5. También se observa el aumento del pH después del tratamiento, alcanzaba valores cercanos a 7 o incluso neutros.

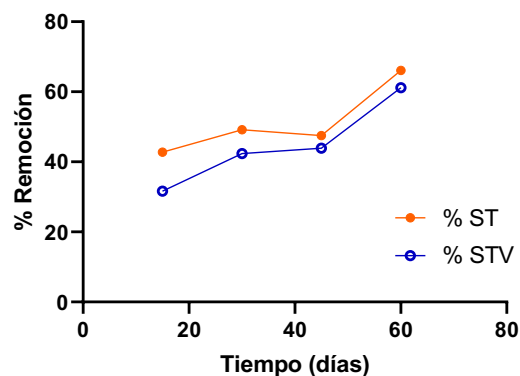


Figura 4. Remoción promedio de ST y STV

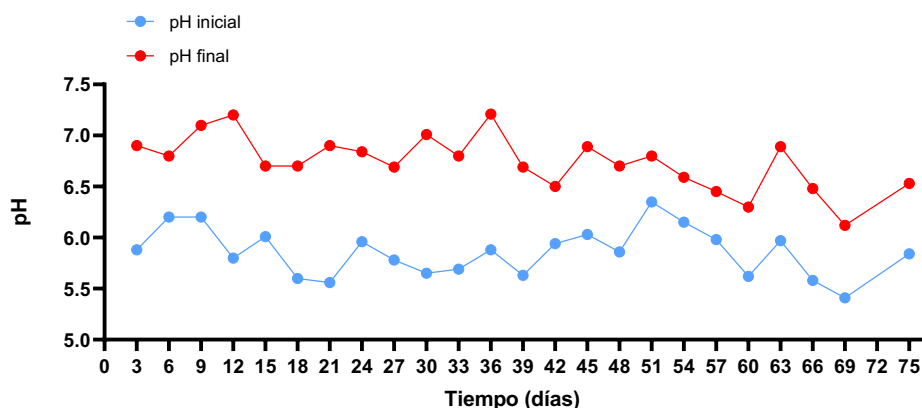


Figura 5. Monitoreo del pH

### Crecimiento de la vegetación plantada

Para este proyecto se utilizaron las especies mostradas en la Figura 6 que corresponden a *Spathiphyllum wallisii*, *Canna indica* L y *Typha latifolia* L, estas fueron seleccionadas de acuerdo a sus características de fácil adaptación y manipulación, la especie *Typha latifolia* L es una planta comúnmente utilizada en los humedales construidos, mientras que la *Canna indica* L y la *Spathiphyllum wallisii* son plantas ornamentales no precisamente nativas de humedales pero que poseen la capacidad de vivir y crecer en condiciones de inundación.

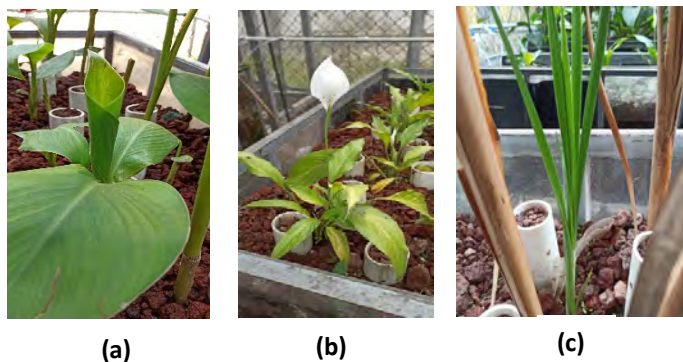


Figura 6. Plantas ornamentales y nativas de humedales  
 a) *Canna indica* L b) *Spathiphyllum wallisii* c) *Typha latifolia* L

En la Tabla 5 se muestran las características de crecimiento de cada especie obtenidas durante los 75 días de operación. La primer celda correspondiente a la especie *Canna indica* contaba con 10 ejemplares, la cual durante los primeros días

de operación presento buena adaptación al humedal y su crecimiento fue constante, a los 40 días alcanzó una altura de 90 cm, en ese punto se tuvo mayor producción de biomasa y floración. La tercer celda con la especie *Spathiphyllum wallisii* obtuvo un crecimiento máximo de 30 cm, el humedal contaba con 7 ejemplares, 5 brotes y 2 en su etapa de floración, esta especie mostró adaptación favorable, no hubo cambios significativos en el color de sus hojas y tallo. La tercer celda conformada por la planta *Typha latifolia* L contaba con 6 ejemplares de las cuales 3 se marchitaron debido a la configuración del sistema completo, las especies vivas mostraron un crecimiento lento pues en los primeros 15 días alcanzó una altura de 10 cm únicamente. Posterior a esto se continuó monitoreando el crecimiento de las plantas durante 40 días más.

Tabla 5. Características de crecimiento de la vegetación plantada en el HCMe

N° de Celda	Ejemplar	Ejemplares por especie	Altura máxima de la especie (cm)	Largo de la hoja (cm)		Ancho de la hoja (cm)		Total de especies	
				Max	Min	Max	Min	Brotes	Marchitas
1	<i>Canna indica</i> L	15	90	27	23	12.7	11.3	4	3
2	<i>Spathiphyllum wallisii</i>	11	30	22.5	15	9	6	6	2
3	<i>Typha latifolia</i> L	3	120	103	90	1	0.84	1	1

## Conclusiones

Los humedales construidos como tratamiento complementario, es decir utilizado como segunda etapa para la depuración de aguas residuales es una opción viable, debido a que por las características del mismo remueve aquellos contaminantes que en la primera etapa no se pudieron. Para este estudio se evaluó su desempeño por medio de la eliminación de contaminantes de un agua residual hidrolizada proveniente de un biorreactor anaerobio, por lo que se consiguió una eliminación del 52 % de DQO y 66.09 % de ST, estas remociones fueron influenciadas por los componentes propios de humedal. De manera general la adaptación y supervivencia de la vegetación utilizada fue buena, ya que las condiciones de operación y características del afluente no afectaron su crecimiento y función en el HCMe.

## Bibliografía

- Abdelhakeem, S. G., Aboulroos, S. A., & Kamel, M. M. (2016). Performance of a vertical subsurface flow constructed wetland under different operational conditions. *J Adv Res*, 7(5), 803 – 814.
- Ayaz, S. Ç., Findik, N., Akça, L., Erdoğan, N., & Kinaci, C. (2011). Effect of recirculation on organic matter removal in a hybrid constructed wetland system. *Water Sci Technol*, 63(10), 2360 – 2366.
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del Agua en México, México D.F.
- Fito, J., Tefera, N., Kloos, H., & Van Hulle, W. H. (2018). Physicochemical Properties of the Sugar Industry and Ethanol Distillery Wastewater and Their Impact on the Environment. *Sugar Tech*, 21(2), 265 – 277.
- Liu, R., Zhao, Y., Doherty, L., Hu, Y., & Hao, X. (2015). A review of incorporation of constructed wetland with other treatment processes. *Chem Eng J*, 279, 220–230.
- 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.
- Orduña-Gaytán, F., Alvarado-Lassman, A., Vallejo-Cantú, N., Alvarado-Vallejo, A., & Sandoval-Herazo, L. C. (2021). Tratamiento híbrido (Biorreactor Anaerobio-Humedal Construido) para el manejo sustentable de aguas residuales de la industria azucarera. *RINDERESU*, 5(2)
- Orduña Gaytán, F., Vallejo Cantú, N. A., & Alvarado Lassman, A. (2018). Evaluación de la remoción de contaminantes en humedales artificiales sembrados en monocultivo con plantas ornamentales utilizando el efluente de un reactor anaerobio. Instituto Tecnológico de Orizaba, México.
- Perdana, M., Sutanto, H., & Prihatmo, G. (2018). Vertical Subsurface Flow (VSSF) constructed wetland for domestic wastewater treatment. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 148(1), 012025.
- Pucher, B., & Langergraber, G. (2019). The state of the art of clogging in vertical flow Wetlands. *Water*, 11(11), 2400.
- Sandoval-Herazo, L. C. ., Marín-Muñiz, J. L. ., Alvarado-Lassman, A. ., & Castelan, R. (2016). Diseño de un Mesocosmo de Humedal Construidos con Materiales Alternativos Para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad de Pastorías Actopan , Ver. *CICA*, 35 – 43.