



## Efecto de *Canna hybrids* en humedales construidos parcialmente saturados para el tratamiento de aguas porcinas

### Effect of *Canna hybrids* in partially saturated constructed wetlands for swine water treatments

Nicolás Mateo<sup>1,2</sup>, Graciela Nani<sup>3</sup>, William Montiel<sup>4</sup>, Carlos Nakase<sup>1</sup>, Corelly Salazar-Salazar<sup>5</sup> & Luis Sandoval<sup>1,5\*</sup>

<sup>1</sup> División de Investigación, Posgrados e Innovación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz, México. <sup>2</sup> Universidad del Caribe, Cancún, Quintana Roo, México.

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería en Gestión Empresarial, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz, México. <sup>4</sup> Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Sinú, Montería Córdoba, Colombia. <sup>5</sup> Departamento de Ingeniería Ambiental, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz, México. \*Autor de correspondencia: lcsandovalh@gmail.com

Recibido 13 de noviembre 2019; recibido en forma revisada 6 de diciembre 2019; aceptado 16 de diciembre 2019

#### RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales de micro y pequeñas empresas que pertenecen a la agroindustria porcina representan una problemática en países en vías de desarrollo, principalmente por los altos costos de las tecnologías de tratamiento de aguas negras que se utilizan y generan para estos fines. Por otro lado, los humedales construidos son sistemas de bajo costo, fácil operación y cero gasto energético y funcionales en la eliminación de los diversos contaminantes de aguas residuales. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del uso de *Canna hybrids* en humedales, de construcción vertical, parcialmente saturados, alimentados con aguas porcinas. Se emplearon seis mesocosmos de humedales construidos, de flujo vertical parcialmente saturados (HC-VPS), rellenos de grava volcánica roja. Tres mesocosmos se utilizaron como controles sin vegetación y en los otros tres se plantó un individuo de *Canna hybrids*. Los sistemas fueron alimentados de forma intermitente con 4 l de aguas residuales porcinas diluidas al 50%, cada cuatro horas se midió la eliminación de sólidos suspendidos (SS), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total (PT), nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>4</sub>) y coliformes fecales (CF). Los resultados mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la eliminación entre los sistemas con vegetación SS (69%), PT (39%), N-NO<sub>4</sub> (65%), CF (62%) y sistemas sin vegetación SS (46%), PT (23%), N-NO<sub>4</sub> (47%), CF (56%) y en la eliminación de DQO (67-65%). Los HC-VPS demostraron ser más eficientes en la eliminación de contaminantes de aguas porcinas. El uso de *Canna hybrids* favoreció la eliminación de SS, PT, N-NO<sub>4</sub>, y CF. Se requieren estudios que evalúen diferentes especies de plantas y diferentes alturas de la zona de saturación para tener claro el funcionamiento de estos sistemas en la eliminación de contaminantes.

*Palabras clave:* Aguas residuales agroindustriales, humedales de tratamiento parcialmente saturados, plantas ornamentales.

### ABSTRACT

The treatment of wastewater from micro and small enterprises belonging to the pig agriculture business represents a problem in developing countries, mainly because of the high costs of wastewater treatment technologies that are used and generated for these purposes. An alternative of low cost, easy operation and maintenance, that has been evaluated in a promising way are the constructed wetlands, this ecotechnology imitates the phytodepurification function of natural wetlands. However, the use of partially saturated wetlands has been little studied in wastewater and to a lesser extent in the use of industrial waters such as those derived from the pig industry, despite the benefits they have demonstrated in the elimination of pollutants. The objective of this study was to evaluate the effect of the use of *Canna hybrids* in vertically constructed wetlands, partially saturated, fed with swine water. Six mesocosms of constructed wetlands, partially saturated in vertical flow (PS-VFW) conditions, were filled with red volcanic gravel. Three mesocosms were used as controls without vegetation and in the other three an individual of *Canna hybrids* was planted in each system, these were fed of intermittent form with 4 l of porcine residual waters stored in a tank that acted as sedimentador, these waters were diluted to 50%, every four hours was measured the elimination of suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), total phosphorus (TP), ammoniacal nitrogen (N-NH<sub>4</sub>) and fecal coliforms (FC). The results showed significant differences ( $p < 0.05$ ) in removal between systems with SS vegetation (69%), TP (39%), N-NO<sub>4</sub> (65%), FC (62%) and systems without SS vegetation (46%), TP (23%), N-NO<sub>4</sub> (47%), FC (56%) and COD removal (67-65%). PS-VFW proved to be more efficient in the removal of contaminants from swine water. The use of *Canna hybrids* favored the elimination of SS, TP, N-NO<sub>4</sub>, and FC. Studies evaluating different plant species and different heights of the saturation zone are required to have a clear understanding of how these systems work in contaminant removal and to be able to use them on a real scale in pig microenterprises.

*Keywords:* Wastewater Porcine, partially saturated constructed wetlands, ornamental plants.

### INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales de la agroindustria porcina de micro y pequeñas empresas es una problemática en países en vía de desarrollo, principalmente por los altos costos de las tecnologías de tratamiento convencionales para estos fines (Aalam et al., 2019; Hernández-Salazar et al., 2018; Ibekwe&Murinda, 2018). Tan solo en México, esta industria ha crecido a una tasa promedio anual de 2.0 % en el periodo de 2006 a 2015 y en 2016 la producción nacional de carne de cerdo se ubicó en 1.36 millones de toneladas, es decir, un crecimiento anual de 3.2 % (FIRA, 2016). Esta agroindustria genera grandes cantidades de residuos, que incluyen los residuos sólidos de excretas y los líquidos de orina y aguas usadas para limpieza de zonas de crianza (Yap et al., 2019), que contiene altas cargas de contaminantes como materia orgánica, nitrógeno, fósforo y microorganismos patógenos como coliformes fecales

y que al ser vertidos en aguas superficiales (ríos, lagos, lagunas) y subterráneas (pozos profundos, mantos freáticos y acuíferos), pueden causar fuertes daños a la calidad del agua, modificando sus propiedades físicas, químicas y biológicas originales y ponen en riesgo la salud de los ecosistemas (Ghimireet al., 2019; Ceballos et al., 2019). Una alternativa económica y ecológica rentable para el tratamiento de aguas residuales son los humedales construidos (HC), que son sistemas ingenieriles que imitan las funciones de los humedales naturales en cuanto a su capacidad de fitorremediación, éstos están constituidos principalmente por sustrato, plantas, y agua (Zamora et al., 2019a; Zamora et al., 2019b; Sandoval et al., 2019), y pueden ser diseñados para eliminar el nitrógeno presente en aguas residuales, obteniendo resultados favorables, aunque su eliminación en conjunto con la del fósforo en HC es aún un reto por atender en materia de estos sistemas

(Chang et al., 2019). En la actualidad existen nuevos diseños que mezclan diferentes tipos de humedales en un solo sistema, para hacer más eficiente la eliminación de este tipo de compuestos. Los diferentes mecanismos de transformación de nitrógeno en humedales dependen del tipo de humedal, los de flujo horizontal se encuentran constantemente saturados predominando condiciones anóxicas/anaeróbicas y propician la desnitrificación en presencia de materia orgánica. En los humedales de flujo vertical la presencia de oxígeno es mayor y favorecen la nitrificación, dada su alimentación intermitente se favorece la presencia de oxígeno en los sustratos (Han et al., 2019; Groh et al., 2015). Aunque se han empleado sistemas combinados (humedales de flujo vertical y horizontal) para resolver esta problemática, estos encarecen los costos de construcción e implementación, así como el espacio requerido para la operación de los mismos (Pradhan et al., 2019; Herrera-Maliàn et al., 2018). Una alternativa para maximizar la eliminación de contaminación y disminuir la superficie de construcción de los sistemas en aguas con altas concentraciones de contaminantes como las generadas por la agroindustria porcina, es el uso de humedales construidos verticales en condiciones parcialmente saturadas, donde la mezcla de las dos zonas; una insaturada y otra de saturación constante (Brix & Arias, 2005), podría incrementar la eliminación de contaminantes específicos. Lamentablemente la información sobre los mecanismos de funcionamiento de los HC-VPS es escasa y no del todo comprendida, dificultando su aprovechamiento en la solución de problemas a gran escala. En este sentido el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del uso de *Canna hybrids* en humedales construidos verticales parcialmente saturados alimentados con aguas porcinas.

## METODOLOGÍA

### Características del HC-VPS

El estudio se realizó en la ciudad de Xalapa, Veracruz, México (19° 29' N y 96° 48' O) con una

altitud entre 700-1600 msm. La temperatura anual promedio de la zona varía 18 y 24°C (INEGI, 2016). El sistema de humedales construido verticales parcialmente saturados (HC-VPS), constó de seis unidades experimentales de mampostería (1 m x 0.5 m x 0.5 m), rellenas de grava volcánica roja (porosidad 0.77) obtenida de una tienda comercial en la ciudad de Xalapa, de diámetro de 1 a 2.5 cm. Tres HC-VPS fueron sembrados con un individuo de *Canna hybrids*, colectadas en una vivienda ubicada en la zona de estudio (20 cm de altura en promedio) y tres fueron empleados como controles sin vegetación. Los sistemas HC-VPS (Figura 1), tenían a la altura de 0.5 m, una salida de agua en forma de ganso (zona de saturación) y 0.5 m de zona de flujo libre de drenaje, con la finalidad de tener dos condiciones, una con mayor presencia de oxígeno disuelto y otra con ausencia de éste (Figura 1). Los HC-VPS fueron alimentados de forma intermitente de un tanque de almacenamiento de 1000 l, con 4 l de agua cada cuatro horas, el sistema se adaptó a las nuevas condiciones fisicoquímicas del agua. Inicialmente se alimentó con agua de la llave durante 20 días, los siguientes 20 días con agua residual procedente de una microempresa porcina de la zona, en concentraciones 20% agua porcina y 80% de la llave, finalmente desde el 1 septiembre a 19 de diciembre de 2018 se alimentaron los sistemas con 50% de agua residual porcina y 50% con agua de la llave, ésta se preparó en un tanque de 1000 l, el cual se llenó de forma manual, con agua trasladada en un contenedor de 1000 l desde la granja y preprada finalmente en el sitio experimental. La decisión del uso de *Canna Hybrids*, como vegetación, dado que es una planta resistente a altas concentraciones de contaminantes en suelo y agua, condiciones cambiantes de clima y y coloridas flores que hacen los paisajes más estéticos (Sandoval et al., 2019a). Esta planta es abundante en jardines de la ciudad de Xalapa y la región, la canna es una planta tropical cuyo origen es en Sudamérica, es una planta herbácea perenne, de rizoma carnoso y ramificado de hojas anchas que pueden medir de 30 a 60 cm (Marín-Muñiz, 2017).



Figura 1. Configuración de HC-VPS

### Medición y análisis

Durante el periodo comprendido entre el 1 de septiembre al 19 de diciembre de 2018, el tanque se alimentó con agua diluida con 50% aguas residuales poricnas, cada 15 días se muestreó tanto en efluente como los influentes de los humedales construidos. Las muestras fueron analizadas en laboratorio de aguas de TM. Los Sólidos suspendidos (SS), la demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total (PT), nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>4</sub>) y coliformes fecales (CF), se midieron por duplicado mediante el método estándar (APHA-AWWA-WEF, 2005). La temperatura ambiente y humedad (termómetro-higrómetro con sonda digital medidor humedad y temperatura), así como la intensidad de luz (Luxómetro – HER – 410-STEREM), tanto en efluente como influente de los CH-VPS, se midieron semanalmente a las 9 a 10 am, cada 15 días. Se midió la altura de las plantas con una cinta métrica, cada mes durante el periodo de estudio, así como la producción de flores de forma visual.

Los análisis de los sólidos suspendidos (SS), la demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total (PT), nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>4</sub>) y coliformes fecales (CF), todos los parámetros se midieron tanto en efluente como influente de los CH-VPS, se realizaron cada 15 días (1 Septiembre a 19 diciembre de 2018), tanto en el efluente como en el influente, mediante método estándar (APHA-AWWA-WEF, 2005), en el laboratorio de aguas del

Tenológico Nacional de Mexico campus Perote con la finalidad de obtener el porcentaje de remoción de contaminantes de acuerdo a Marín-Muñiz (2016).

### Análisis estadístico

Todos los análisis estadísticos del experimento fueron realizados usando Minitab, versión 16.1.0 (2010, Minitab Inc.). El error estándar de las variables estudiadas: Temperatura ambiente, humedad, intensidad de luz, altura de las plantas, DQO, fósforo total, amonio y coliformes fecales, fueron calculadas en los resultados obtenidos de cada mescosmo. Las diferencias entre los resultados de los tratamientos con presencia o no de vegetación se estimaron mediante análisis de varianza de medidas repetidas de dos vías para los siete periodos de medición, para todas las pruebas se usó un nivel de significancia del  $p < 0.05$  dado que los datos no fallaron en prueba de normalidad y varianza igual, se realizó un ANOVA de medidas repetidas.

## RESULTADOS

### Condiciones ambientales y desarrollo vegetal

La temperatura media ambiental durante el periodo de estudio se encontró entre 17 y 24 °C, éstas se consideran adecuadas para el desarrollo de plantas tropicales en rangos de 15 a 25°C (Sandoval-Herazo et al., 2018), la humedad mostrada en el estudio se

presenta en la figura 2, indicando que las condiciones predominantes son las de un clima cálido húmedo, la intensidad de luz reportada en el estudio (Figura 2), se encontró entre 800 y 630 lux, que se encuentra en los rangos deseables para el crecimiento de plantas ornamentales tropicales (Guzmán & Palenius, 2017).

En cuanto al desarrollo de *Canna hybrids*, se muestra que durante el periodo de estudio el

crecimiento de las plantas fue constante, como se muestra en la figura 2. La planta creció de forma saludable, sin dificultades a causa de los agentes del interperismo, esta información es congruente con la reportada por Zamora-Castro et al. (2019), ellos encontraron que en un periodo de tiempo similar de estudio la planta alcanzó una altura similar a la encontrada en este estudio.

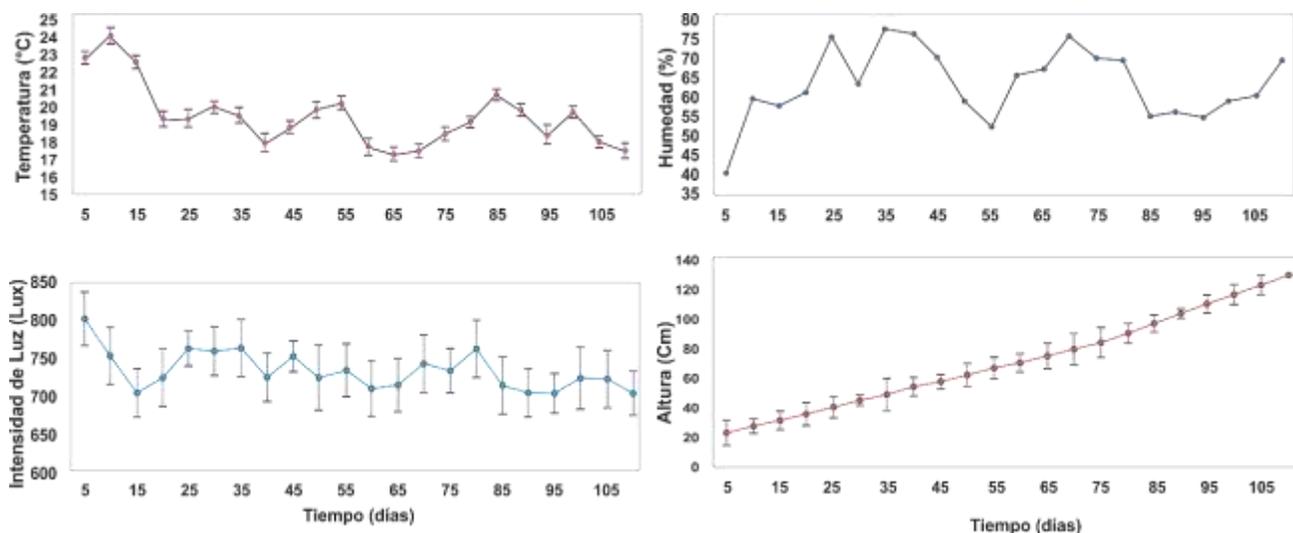


Figura 2. Parámetros ambientales y altura de las plantas

### Sólidos Suspendidos (SS)

Los principales mecanismos de eliminación de sólidos suspendidos en HC son la sedimentación y la filtración (Rowan et al., 2018), en este estudio las concentraciones de SS en la entrada en promedio fueron de 1,214.1 mg/l y en las salidas se mostró en el sistema con vegetación 374.6 mg/l y en sistemas sin vegetación en promedio 645.1 mg/l, mostrando disminuciones significativas ( $p \leq 0.05$ ). El tratamiento que mostró mejores resultados fue en los sistemas con presencia de *Canna hybrids*, superior en 22% de la remoción con relación a los controles sin vegetación (Figura 3). Esto se pudo deber a la presencia de la planta que pudo generar zonas donde se favoreciera la filtración dada la presencia de raíces en los sistemas.

de remociones, 37–51% de DQO en humedales construidos de flujo vertical. Las cuales pudieron tener lugar por los mecanismos de degradación de materia orgánica en HC, que se pueden presentar mediante microorganismos aerobios, anaerobios y facultativos (Cortez et al., 2019). La presencia de

### Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Esta mide la cantidad de sustancias disueltas en una muestra líquida que puedan ser oxidadas por medios químicos (Mello et al., 2019) y permite determinar el grado de contaminación del agua por materia orgánica. En este estudio la DQO de la entrada del sistema se encontró en promedio 418.3 mg/l y en las salidas de los HC-VPS en 141.8 mg/l y 154.7 mg/l en sistemas con presencia de *Canna hybrids* y sin vegetación, respectivamente. En cuanto a la eliminación de contaminantes (Figura 3), no se encontraron diferencias significativas entre los dos tratamientos en cuanto a la remoción de DQO ( $p \geq 0.05$ ), estos resultados son superiores a los reportados por Poach et al. (2004), que encontró una zona de flujo libre y vegetación, al parecer favorecieron en la eliminación de DQO (Figura 3), mayor que los sistemas que no tenía vegetación, aunque cabe resaltar que no se reflejan diferencias estadísticas entre estos, visualmente si muestra un

mejor comportamiento de los sistemas con vegetación.

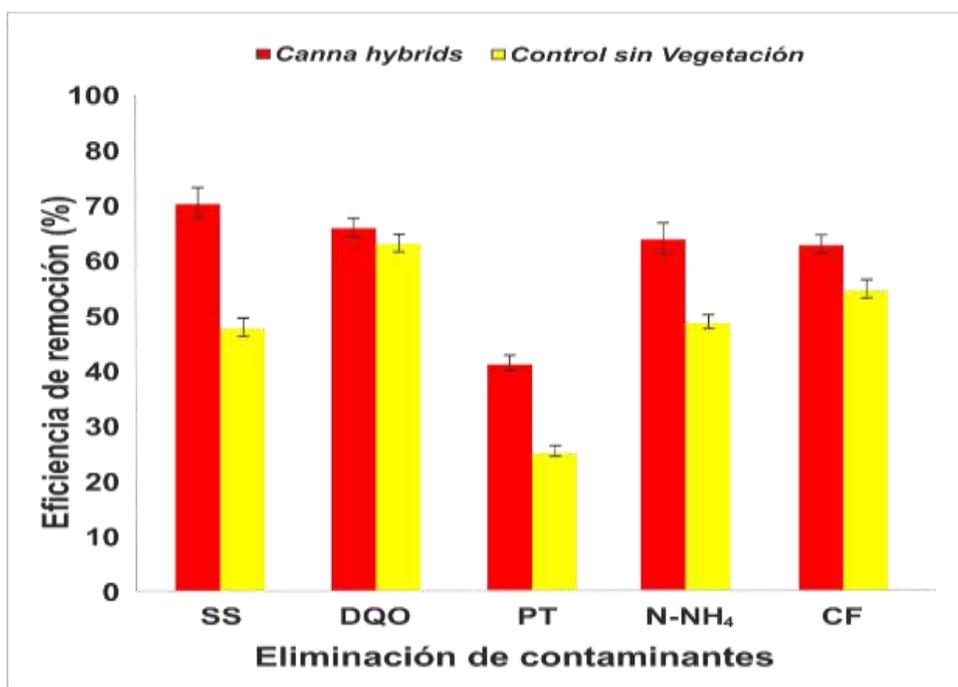


Figura 3. Eliminación de contaminantes en HC-VPS

#### Fósforo Total (PT)

La eliminación de fósforo en HC se genera principalmente por adsorción por sustratos y asimilación por las plantas (Yang et al., 2019). La concentración promedio en la entrada fue de 19.4 mg/l y después del tratamiento con *Canna hybrids* fue de 11.4 mg/l y 14.6 mg/l en controles. En cuanto a la eliminación de PT en los humedales experimentales con *Canna hybrids* fue mayor que en la registrada en los controles (Figura. 3) con el tratamiento, mostrando diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) entre estos. La concentración inicial de fósforo fue de 19.4 mg/l, la concentración de PT en los humedales experimentales con *Canna hybrids* y controles fue de 11.4 mg/l y 14.6 mg/l respectivamente, con una diferencia significativa de  $p \leq 0.05$  se observa que la presencia de *C. hybrids* eliminó fósforo en los HC-VPD. Lo anterior pudo ser por los mecanismos de eliminación de PT en HC, y la presencia de plantas en los sistemas. Es conocido que la eliminación de PT es limitada en HC, sin embargo, la presencia de las plantas demostró un papel importante en la eliminación de

este compuesto (Ryan & Gregory, 2019), como se puede ver en la figura 3.

#### Amonio (N-NH<sub>4</sub>)

Los mecanismos de eliminación del nitrógeno en humedales construidos son principalmente por la amonificación, seguidos por la nitrificación, la asimilación por las plantas (Adsorción mayormente) y la volatilización de amoniaco (Kumar & Dutta, 2019). La entrada del agua al sistema fue de 64.1 mg/l y la salida del sistema con vegetación, 21.9 mg/l y 31.6 mg/l en los controles sin vegetación. En los HC-VPS, la eliminación de amonio (N-NH<sub>4</sub>), después del tratamiento de agua con HC-VPS comparando la acción de la planta *Canna hybrids* y un control sin vegetación (Figura 3) mostró diferencia significativa al evaluarse a un nivel de significancia ( $p \leq 0.05$ ). Las tasas de eliminación fueron similares a las reportadas por Ibekwe&Murinda (2018) en HC, con varios ciclos de operación, mostrando que estos sistemas pueden mejorar sustancialmente la eliminación de este compuesto, por la zona de drenaje libre.

### **Coliformes Fecales NMP/100ml (CF)**

Las concentraciones de CF en entrada se encontraron durante el periodo de estudio en rangos de  $307 \pm 103$  NMP/100 ml, se registró una reducción significativa al pasar por los HC-VPS en sistemas con presencia de vegetación  $103 \pm 73$  NMP/100 ml, mientras en sistemas sin vegetación los valores estuvieron entre  $128 \pm 36$  NMP/100 ml, estos datos son superiores a los encontrados por Zurita et al. (2015), empleando sistemas de humedales híbridos. Por otra parte esta información se sustenta en los mecanismos de eliminación de patógenos en HC, por sedimentación, filtración, muerte natural e irradiación ultravioleta (Wu et al., 2016), en este estudio la condiciones parcialmente saturadas, al parecer favorecieron la eliminación de CF como se muestra en la figura 3 observándose mayor remoción de CF, en los sistemas con presencia de *Canna hybrids*, superior en 12%, con relación a los de control sin vegetación, encontrando diferencia significativa entre estos dos tratamientos ( $p \leq 0.05$ ); esto se debe a las nuevas condiciones de saturación parcial de los HC y la presencia de vegetación que pudo incrementar la oxigenación del sustrato por la liberación de oxígeno en la zona radicular.

### **Dirección de futuros estudios**

Si bien el presente estudio aporta información valiosa de los mecanismos de diseño, operación, y remoción de algunos contaminantes en HC-VPS, así como en el uso de *Canna hybrids*, se requieren nuevas investigaciones que permitan comprender el mecanismo de funcionamiento y replantear cuestiones de diseño y selección de especies en estos sistemas, por esta razón los futuros estudios en materia de humedales construidos de flujo vertical parcialmente saturados deben abocarse a:

- ✓ Evaluar estos sistemas durante periodos trimestrales de estudio para conocer su operación y posibles problemas en el transcurso de su operación.
- ✓ Establecimiento de zonas de flujo libre y saturadas adecuadas, evaluando diferentes alturas de estas dos condiciones y establecer las más adecuadas para maximizar la eliminación de contaminantes y mejorar los diseños de este tipo de sistemas.
- ✓ Mecanismos de alimentación de los sistemas que sean más eficientes y permitan un mejor

control de volumen de agua que ingresa y los tiempos de retención hidráulica que estos deben de tener para comprender mejor su funcionamiento.

- ✓ Estudios sobre adición de fuentes de carbono orgánico en los sustratos, son requeridos evaluar para su aplicación en aguas con bajo contenido de éste, dado que es necesario para los procesos de eliminación que se presentan en los HC.
- ✓ Estudios de selección de nuevas especies de plantas y su evaluación en mono vs policultivo, serían adecuados para analizar la influencia de la vegetación en los HC-VPS.
- ✓ Por otra parte, se considera importante el uso de aguas residuales con mayor contenido de contaminantes sin dilución para establecer como responderían estos sistemas a la presencia de altos contenidos de contaminación en cuanto a la reducción, como pueden ser aguas porcinas sin diluir o de la industria láctica que poseen altos contenidos de estos.

### **CONCLUSIONES**

Los resultados de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales porcinas en humedales construidos verticales parcialmente saturados, sembrados con *Canna hybrids*, muestran la capacidad de estos para la remoción de SS, PT, N-NO<sub>4</sub>, y CF, aunque se conocen pocos reportes del uso de estos sistemas, durante el periodo de estudio. Lo anterior indica que las condiciones parcialmente saturadas (aerobias/anóxicas) de operación favorecen la eliminación de contaminantes.

Este estudio demuestra que los HC-VPS son una alternativa para la remoción de contaminantes convencionales en aguas residuales porcinas, mostrando mejores condiciones de eliminación de contaminantes que las de sistemas de humedales construidos de flujo vertical convencionales. Los HC-VPS, muestran un gran potencial de aplicación en pequeñas grajas porcinas en diferentes países en vía de desarrollo, por su bajo costo de implementación, disminución de espacio para su implementación, fácil manejo y operación.

La información generada a partir del este estudio, como el medio de sustrato (Grava volcánica roja), la

vegetación (*Canna hybrids*), el mecanismo de operación (alimentación intermitente) y la distancia de la zona de drenaje libre y saturación, podrían ser considerados en futuras aplicaciones a escala real en granjas porcinas y con esto contribuir a la mitigación de la contaminación generada por microempresas porcinas en México y Latinoamérica, que generan un gran impacto negativo al medio ambiente.

### BIBLIOGRAFÍA

- Brix, H., & Arias, C. A. 2005. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering*, 25(5), 491-500.
- Ceballos, S., Aspiroz, C., Ruiz-Ripa, L., Reynaga, E., Azcona-Gutiérrez, J. M., Rezusta, A., & López-Cerero, L. 2019. Epidemiology of MRSA CC398 in hospitals located in Spanish regions with different pig-farming densities: a multicentre study. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*.
- Chang, M., Wang, Y., Pan, Y., Zhang, K., Lyu, L., Wang, M., & Zhu, T. 2019. Nitrogen removal from wastewater via simultaneous nitrification and denitrification using a biological folded non-aerated filter. *Bioresource Technology*, 289, 121696.
- Cortez, V. M. A., Nolasco, A. Q., del Valle Paniagua, D. H., Popoca, M. C., Vinaja, Á. B., & Zierold, J. A. R. 2019. Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(5), 319-342.
- Del Toro, A., Tejeda, A., & Zurita, F. 2019. Addition of Corn Cob in the Free Drainage Zone of Partially Saturated Vertical Wetlands Planted with *I. sibirica* for Total Nitrogen Removal—A Pilot-Scale Study. *Water*, 11(10), 2151.
- FIRA. 2016. Fidecomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Disponible en: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:TT0epMyejjUJ:https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp%3FfabreArc%3D67086+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx>. Accesado: 25/10/2019.

### AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento otorgado para la ejecución del proyecto “Tratamiento de aguas residuales producidas por microempresas porcinas en Veracruz, México mediante humedales construidos de flujo vertical parcialmente saturados” correspondiente a la Convocatoria 2019: Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica en los Programas Educativos de los Institutos Tecnológicos Federales, Descentralizados y Centros y al Ing. Saúl Antonio Rivera González por su apoyo en el desarrollo de las gráficas

- Ghimire, U., Nandimandalam, H., Martinez-Guerra, E., & Gude, V. G. 2019. Wetlands for wastewater treatment. *Water Environment Research*.
- Groh, T. A., Gentry, L. E., & David, M. B. 2015. Nitrogen removal and greenhouse gas emissions from constructed wetlands receiving tile drainage water. *Journal of environmental quality*, 44(3), 1001-1010.
- Guzmán, A. B. M., & Palenius, H. G. N. 2017. Utilización de un sistema de inmersión temporal (SIT) para multiplicar plantas ornamentales de *Agave Victoriae-Reginae* (T. Moore). *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1429-1433.
- Han, Z., Miao, Y., Dong, J., Shen, Z., Zhou, Y., Liu, S., & Yang, C. 2019. Enhanced nitrogen removal and microbial analysis in partially saturated constructed wetland for treating anaerobically digested swine wastewater. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 13(4), 52.
- Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. 2018. Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *RINDERESU*, 2(1-2), 75-87.
- Herrera-Melián, J., Borreguero-Fabelo, A., Araña, J., Peñate-Castellano, N., & Ortega-Méndez, J. (2018). Effect of Substrate, Feeding Mode and

- Number of Stages on the Performance of Hybrid Constructed Wetland Systems. *Water*, 10(1), 39.
- Ibekwe, A., & Murinda, S. (2018). Continuous Flow-Constructed Wetlands for the Treatment of Swine Waste Water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(7), 1369.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía Censo de Población y Vivienda 2010 y Marco Geoestadístico Municipal 2010. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825292812>
- Kumar, S., & Dutta, V. (2019). Constructed wetland microcosms as sustainable technology for domestic wastewater treatment: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 11662-11673.
- Marín-Muñiz, J. L. 2017. Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua. *Agroproductividad*, 10(5).
- Marín-Muñiz, J.L. 2016. Removal of wastewater pollutant in artificial wetlands implemented in Actopan, Veracruz, Mexico. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15, 553–563. Available online: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62046829021> (accessed on 30 07 2019).
- Mello, D., Carvalho, K. Q., Passig, F. H., Freire, F. B., Borges, A. C., Lima, M. X., & Marcelino, G. R. 2019. Nutrient and organic matter removal from low strength sewage treated with constructed wetlands. *Environmental Technology*, 40(1), 11-18.
- Poach, M. E., Hunt, P. G., Reddy, G. B., Stone, K. C., Johnson, M. H., & Grubbs, A. 2004. Swine wastewater treatment by marsh-pond-marsh constructed wetlands under varying nitrogen loads. *Ecological Engineering*, 23(3), 165-175.
- Pradhan, S., Al-Ghamdi, S. G., & Mackey, H. R. 2019. Greywater treatment by ornamental plants and media for an integrated green wall system. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 145, 104792.
- Rowan, A. C., Irala, C. Z., & Zamora, C. Q. 2018. Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia. *Diseño y Tecnología para el Desarrollo*, (5), 88-108.
- Ryan, M. D., & Gregory, D. B. 2019. Sorption Potential of Soluble Phosphorus and Rhodamine WT onto Gravel Media from a Mature Constructed Wetland. *Pro Aqua Farm Marine Biol*, 2(1), 180016.
- Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Salas, F., & Alvarado-Lassman, A. 2019a. Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants and Filled with Mineral and Plastic Substrates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2), 167.
- Sandoval-Herazo, L., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J., Méndez-Contreras, J., & Zamora-Castro, S. A. 2018. Effects of the use of ornamental plants and different substrates in the removal of wastewater pollutants through microcosms of constructed wetlands. *Sustainability*, 10(5), 1594.
- Wu, S., Carvalho, P. N., Müller, J. A., Manoj, V. R., & Dong, R. 2016. Sanitation in constructed wetlands: a review on the removal of human pathogens and fecal indicators. *Science of the Total Environment*, 541, 8-22.
- Yang, Y., Liu, J., Zhang, N., Xie, H., Zhang, J., Hu, Z., & Wang, Q. 2019. Influence of application of manganese ore in constructed wetlands on the mechanisms and improvement of nitrogen and phosphorus removal. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 446-452.
- Yap, G., Lim, X. F., Chan, S., How, C. B., Humaidi, M., Yeo, G., ... & Ng, L. C. 2019. Serological evidence of continued Japanese encephalitis virus transmission in Singapore nearly three decades after end of pig farming. *Parasites & Vectors*, 12(1), 244.
- Zamora, S., Marín-Muñiz, J. L., Nakase-Rodríguez, C., Fernández-Lambert, G., & Sandoval, L. 2019b. Wastewater Treatment by Constructed Wetland Eco-Technology: Influence of Mineral and Plastic Materials as Filter Media and Tropical Ornamental Plants. *Water*, 11(11), 2344.
- Zamora, S., Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Fernández-Lambert, G., & Hernández-Orduña, M. G. 2019a. Impact of Ornamental Vegetation Type and Different Substrate Layers on Pollutant

- Removal in Constructed Wetland Mesocosms Treating Rural Community Wastewater. *Processes*, 7(8), 531.
- Zamora-Castro, S. A., Marín-Muñiz, J. L., Sandoval, L., Vidal-Álvarez, M., & Carrión-Delgado, J. M. 2019. Effect of Ornamental Plants, Seasonality, and Filter Media Material in Fill-and-Drain Constructed Wetlands Treating Rural Community Wastewater. *Sustainability*, 11(8), 2350.
- Zurita, F. M., Bravo, D. R., Álvarez, A. C., & Lomelí, M. G. 2015. Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos. *Interciencia*, 40(6), 409-415.