



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS VERTICALES PARCIALMENTE SATURADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PORCINAS †

[EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF VERTICAL PARTIALLY SATURATED CONSTRUCTED WETLANDS FOR SEWAGE TREATMENT (SWINE)]

Mayerlin Sandoval-Herazo¹, Graciela Nani², Luis Sandoval^{1*}, Saúl Rivera¹, Gregorio Fernández-Lambert¹ and Alejandro Alvarado-Lassman³

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, División de Posgrados, Investigación e Innovación, Km 1.8 Carretera a loma del cojolite, Misantla, Veracruz, México, C.P. 93821. Email: lcsandovalh@gmail.com

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Departamento de Ingeniería en Gestión Empresarial, Km 1.8 Carretera a loma del cojolite, Misantla, Veracruz, México, C.P. 93821.

³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrados e Investigación, Oriente 9, Emiliano Zapata Sur, Orizaba, Veracruz, México, C.P. 94320.

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The operation of partially saturated vertical constructed wetlands (HC-VPS) are novel systems that improve the elimination of nitrogen present in wastewater and have been used mainly in Europe. However, there are no known reports of its use in the treatment of wastewater with a high content of Nitrogen and organic matter such as pig wastewater. **Objective.** This paper reports the performance of HC-VPS at the mesocosm level for the treatment of porcine sewage sown in triplicate with *Canna Hybrids* and *Germanic Iris*. **Methodology.** Six experimental HC-VPS units, filled with red tezontle and with the water outlet control level 0.5 m high from the base upwards, were fed with 1: 1 diluted swine wastewater and intermittently fed with 4 liters of water every 4 hours. The elimination of COD, SST, N-NH₄, NTK and total CF at the entry and exit of the systems was measured. **Results.** It was found that HC-VPS improve the removal of contaminants in COD (5%), SST (20%), N-NH₄ (25%), NTK (32%) and total CF (20%) in relation to traditional vertical constructed wetland systems. No significant differences were found ($p > 0.05$) for the elimination of any type of parameters including COD between the two species used as vegetation. **Implications.** These results contribute to improve operation parameters and species selection that are used in partially saturated vertical constructed wetlands in tropical and intertropical zones. **Conclusions.** The two species used managed to develop and adapt the new water quality conditions to which they were exposed. The water derived from these systems can be used in agro-industrial processes or incorporated into the production cycle once treated in HC-VPS.

Keywords: Partially saturated vertical constructed wetlands; swine wastewater; ornamental plants; pig microenterprises.

RESUMEN

Antecedentes. El funcionamiento de los humedales construidos verticales parcialmente saturados (HC-VPS) son novedosos sistemas que mejoran la eliminación de Nitrógeno presente en aguas residuales y se han usado principalmente en Europa. Sin embargo, no se conocen reportes de su uso en el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de Nitrógeno y materia orgánica como lo son las aguas residuales porcinas. **Objetivo.** Este estudio reporta el desempeño de HC-VPS a nivel mesocosmo para el tratamiento de aguas residuales porcinas sembrados por triplicado con *Canna Hybrids* e *Iris germánica*. **Metodología.** Seis unidades experimentales HC-VPS, rellenas con tezontle rojo y con el nivel de control de la salida del agua a 0.5 m de altura de la base hacia arriba, fueron alimentados con agua residual porcina diluida 1:1 y alimentados de forma intermitente con 4 litros de agua cada 4 horas. Se midió la eliminación de DQO, SST, N-NH₄, NTK y CF totales en la entrada y salida de los sistemas. **Resultados.** Se encontró que los HC-VPS mejoran la eliminación de los contaminantes DQO (5%), SST (20%), N-NH₄ (25%), NTK (32%) y CF totales (20%) en relación a sistemas de humedales construidos verticales tradicionales. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) para eliminación de ningún tipo de parámetros incluyendo DQO entre las dos especies empleadas como vegetación. **Implicaciones.** Estos resultados contribuyen a mejorar parámetros de operación

† Submitted December 31, 2019 – Accepted March 19, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

y selección de especies que se utilizan en humedales construidos verticales parcialmente saturados en zonas tropicales e intertropicales. **Conclusiones.** Las dos especies empleadas lograron desarrollarse y adaptarse a las nuevas condiciones de calidad de agua a que fueron expuestas. El agua derivada de estos sistemas puede ser empleada en procesos agroindustriales o incorporarse al ciclo productivo una vez tratada en HC-VPS.

Palabras clave: Humedales construidos verticales parcialmente saturados; aguas residuales porcinas; plantas ornamentales; microempresas porcinas.

INTRODUCCIÓN

El bienestar poblacional y una buena calidad de vida, entre otros factores socioeconómicos, ambientales, desarrollo tecnológico y el progreso científico, son fundamentales para lograr el desarrollo sustentable (Zaid *et al.*, 2019). Sin embargo, el uso masivo de los recursos naturales como el agua para satisfacer diversas necesidades agroalimentarias, sumado a la falta regulada de sistemas de tratamiento de las aguas, tiene como consecuencia la contaminación y el deterioro medio-ambiental, principalmente en comunidades donde la población crece sin control (Alcamo, 2019; Mikulčić *et al.*, 2020).

La contaminación del agua es uno de los problemas más graves a nivel mundial ya que afecta directamente a los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres, incluyendo la salud pública (Tessema and Simane, 2019). Este problema ambiental ha sido reportado en gran medida por el crecimiento de las pequeñas comunidades y al aumento del número de pequeños empresarios, así como por la falta de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales que forman parte de una familia alternativa de métodos de tratamiento sustentables b (Chowdhary *et al.*, 2020; Qadri and Faiq, 2020).

Para el tratamiento de distintos tipos de aguas residuales, existen tecnologías sofisticadas y eficientes, sin embargo, este tipo de tecnologías tienen alto consumo de energía, requieren mano de obra calificada y el costo de construcción y mantenimiento es alto, convirtiéndose en una de las principales limitantes al momento de implementar estos sistemas (Zamora *et al.*, 2019). La ausencia de ecotecnologías con bajo consumo energético y de adopción económica accesible al pequeño empresario para el tratamiento de aguas residuales, ha generado un fuerte impacto negativo de contaminación ambiental en diferentes sitios del país, tanto a gran y pequeña escala, como en regiones y subregiones tropicales y subtropicales de México (Puente *et al.*, 2017).

En México, el tratamiento de aguas residuales industriales es una limitante a la que se enfrentan las pequeñas y micro empresas (Hernández-Salazar *et al.*, 2018). El acceso a recursos del gobierno encaminados a tratar las aguas residuales que se generan y que puedan ser reutilizadas, es escaso. Así también, existen pocas investigaciones en países emergentes encaminadas al desarrollo tecnológico para el

tratamiento de aguas residuales industriales con bajo costo de construcción, operación, y que puedan ser instaladas en las micro y pequeñas empresas (Marín, 2016; Zamora *et al.*, 2019).

En el contexto agroindustrial, por su bajo costo de instalación y fácil manejo, la existencia de sistemas de tratamiento ecológicos, representan una tendencia como plantas de tratamiento de efluentes. Entre estos sistemas de tratamiento se encuentran las lagunas de oxidación y los humedales construidos, los cuales tienen ventajas, como bajo o nulo consumo de electricidad, bajo costo de operación de la planta de tratamiento, fácil manejo de la planta de tratamiento y alta remoción de contaminantes y patógenos; lo cual demuestra la pertinencia del uso de estas tecnologías para el sector de la micro y pequeña empresa (Su *et al.*, 2019; Velvizhi, 2019).

En la actualidad, la literatura científica reporta un número creciente de estudios centrados en el diseño, desarrollo y desempeño de diferentes tipos de Humedales Construidos desde una preceptiva de flujo vertical insaturados y de flujo horizontal saturados (Avellán and Gremillion, 2019; Liu *et al.*, 2019; Arden and Ma, 2018). Sin embargo, poca literatura describe el funcionamiento de humedales de flujo vertical en condiciones parcialmente saturadas para aumentar el proceso de remoción de contaminantes, y mucho menos se describen las comunidades microbianas y los parámetros críticos que influyen en la capacidad de degradación en Humedales Construidos (Han *et al.*, 2019; Manon *et al.*, 2019).

El uso de Humedales Construidos de Flujo Vertical (VFCW) ha estado creciendo rápidamente durante la última década para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en las ciudades pequeñas (Abou-Elela y and Hellal, 2019). Estos VFCW están compuestos de dos zonas: una de flujo libre o insaturada (parte superior del sistema), y una zona de saturación constante (parte inferior) en la cual el control de salida de agua se encuentra a una altura superior al fondo, generando una zona de constante saturación, lo que permite una mejor eliminación de Nitrógeno Total a través de la secuencia nitrificación/desnitrificación. Adicionalmente la profundidad de la zona saturada puede ser ajustada para establecer los mejores parámetros de operación del sistema de tratamiento. Este sistema de tratamiento ha demostrado su eficiencia en la remoción de materia orgánica y el Nitrógeno de aguas crudas residuales

municipales después del tratamiento primario (Nakase *et al.*, 2019). Sin embargo, todavía quedan algunos campos de mejora, no sólo para la eliminación de Nitrógeno Total por nitrificación/desnitrificación, sino también para retención de otros contaminantes. Por lo tanto, la concentración en los efluentes tratados debe satisfacer niveles normativos cada vez más bajos.

De acuerdo con Numeragua (2018), en México existen aproximadamente 2,526 plantas de tratamiento municipales que sólo tratan 215.2 m³/s de aguas residuales. Mientras que para el sector industrial existen 3,025 plantas, las cuales en su mayoría operan en grandes industrias y en medianas de manera autoabastecida. Por otra parte, sólo 0.8% de estas microempresas tienen un sistema para tratar sus efluentes, dato del que se infiere que la realidad es aún más crítica, por la cantidad de microempresas no registradas que están trabajando sin plantas tratadoras de sus aguas residuales, con parámetros ambientales superiores a la normatividad nacional. Esta realidad crítica no sólo es común para México, sino también en los países en donde la economía se gesta en comercio de productos locales, como las micro empresas porcinas en México (Núñez, 2017; Hernández-Salazar *et al.*, 2018). En este sector agroindustrial, México tiene un inventario promedio superior a los 16 millones de cabezas porcinas. En 2018 México exportó más de 131,264 mil toneladas de carnes de cerdo con un valor de 525.4 millones de dólares, mientras que para el primer semestre de 2019 se reporta un incremento de 23.61% respecto al primer semestre 2018 (OPORPA, 2019). En este contexto microempresarial, en México el crecimiento de este sector ha sido de 85% del total, donde 13.5% pertenece a la industria porcina, lo que demuestra la importancia que tienen este sector a nivel nacional (INEGI, 2017).

Es importante mencionar que este tipo de empresas agroindustriales no tienen un sistema de tratamiento de aguas residuales adecuado para disminuir el impacto ambiental que genera en su proceso de cría, engorda y sacrificio del cerdo. La razón de esto es el elevado costo de instalación y operación que tienen las plantas de tratamiento convencionales, las cuales son imposibles de solventar económicamente por una micro o pequeña empresa. Cabe mencionar que la mayor parte de las microempresas no cuentan con registros oficiales que puedan comprobar el desagüe diario que producen, por esta misma razón estas microempresas se desobligan legalmente a tratar toda el agua residual que generan durante sus procesos.

La principal ventaja de adoptar un sistema de Humedales Construidos Verticales Parcialmente Saturados (HC-VPS) como un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales porcinas, es su

eficiencia de remoción de contaminantes en otros tipos de efluentes industriales (SEMARNAT, 2016). El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de Humedales Construidos Verticales Parcialmente Saturados a nivel mesocosmo para el tratamiento de aguas residuales porcinas sembrados con *Canna Hybrids*, e *Iris germánica*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sistema

Este estudio se desarrolló en las instalaciones del Tecnológico Nacional de México-Campus Misantla, en Misantla, Veracruz, México. Seis sistemas de humedales construidos de flujo vertical parcialmente saturados (HC-VPS) fueron construidos en mampostería (Largo: 0.5 m, ancho: 0.5 m, alto: 1.0 m), establecidos a la intemperie cubiertos por una poli-sombra de 50% sombra. El control de nivel se ubicó a 0.5 m, por debajo de la superficie del sustrato generando una zona de saturación constante (anóxica/anaerobia). Los 0.5 m restantes fueron de zona de drenaje libre. (Figura 1). Todos los mesocosmos se rellenaron uniformemente con tezontle rojo, que es una grava de bajo peso molecular con mayor superficie de contacto que una roca basáltica, aunque tiene los mismos componentes químicos y diámetro de 1 a 3.5 mm, con una porosidad de 0.53 (Nakase *et al.*, 2019). Este es un material inerte que no tiene sustancias tóxicas, es estable físicamente y su pH es cercano al neutro (Trejo-Téllez *et al.*, 2013) y se encuentra con facilidad en la región de Misantla.

Los mesocosmos fueron alimentados cada dos horas de forma intermitente con 4 litros de agua residual porcina diluida al 50%, proveniente de un tanque de almacenamiento de 1100 litros que se adaptó como sedimentador. Las plantas utilizadas son *Canna hybrids* e *Iris germánica*, ambas son de clima tropical y son también ornamentales. Estas plantas ornamentales, con una altura entre 25 a 30 cm, fueron recolectadas a 5 km de la ciudad de Misantla, Veracruz (19°29'N y 96° 48'O), y se transportaron a los mesocosmos con un bulbo de tierra en la raíz de su procedencia inicial. Tres mesocosmos HC-VPS fueron plantados con un individuo de *Canna hybrids* y tres con un individuo de *Iris germánica*. El sistema de humedales se alimentó por dos semanas con agua limpia, y durante las tres semanas posteriores se dosificó la concentración de aguas residuales porcinas diluidas al 50%. Las aguas porcinas se recogieron de una micro granja porcina ubicada a 2 km de las instalaciones del Tecnológico de Misantla, del 1 septiembre de 2018 a 30 de marzo de 2019 —duración de estudio—.

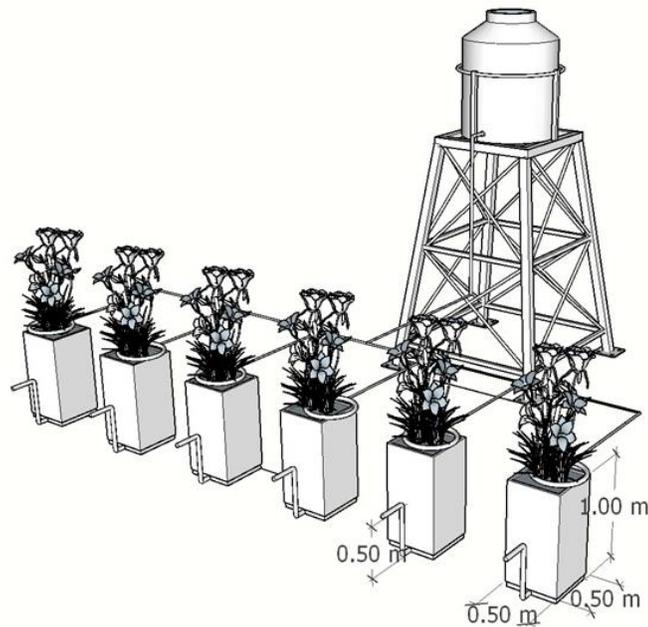


Figura 1. Configuración de sistemas de humedales construidos de flujo vertical parcialmente saturados.
Fuente: Elaboración propia

Monitoreo del Sistema

Después de estabilizar el sistema de HC-VPS durante un periodo de 7 meses, se monitorearon en el laboratorio de aguas, suelo y planta del Tecnológico de Úrsulo Galván, los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua (Tabla 1), tanto en la entrada como en las salidas de los mesocosmos cada 15 días, del 15 de septiembre 2018 al 30 de marzo de 2019.

Análisis de datos

Los resultados obtenidos de la eliminación de contaminantes se analizaron con prueba de varianza de Dunnett. Se estableció como hipótesis nula la igualdad de las medias entre controles y sistemas de vegetación, con confianza del 95% como requisito estadístico de dicha prueba. Se desarrolló la prueba de independencia de los datos, haciendo referencia a X^2 , prueba de varianza de Bartlett en Software Estadístico R versión 3.6 y RStudio 1.1.4.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Temperatura del agua, pH y Oxígeno disuelto

La temperatura en humedales de tratamiento afecta tanto a los microorganismos como la tasa de oxígeno disuelto (OD), siendo las temperaturas óptimas para el desarrollo de reacciones bioquímicas en humedales construidos de 16 a 35°C (Akratos, C. S., and

Tsihrintzis, 2007; Sandoval-Herazo *et al.*, 2018). Sin embargo, la temperatura del agua no alcanza la temperatura ambiente y es muy inferior hasta en 5 °C (Kadlec and Reddy, 2001). La Tabla 2 muestra que durante el periodo de estudio la temperatura del agua en los sistemas se encontró en los límites permisibles para un favorable desarrollo de relaciones bioquímicas, así como la dimensión en los rangos establecidos en la literatura entre el agua, encontrando diferencias significativas ($p=0.001$) entre entrada y salida (el agua a la salida >4 °C promedio que la entrada HC-VPS), lo que pudo favorecer resultados de la remoción de contaminantes en este estudio.

En cuanto al pH que indica la medida de acidez o alcalinidad en una solución acuosa (García *et al.*, 2019), se registró una disminución significativa ($p=0.0014$), lo que pudo deberse a la reducción de alcalinidad por los procesos de eliminación de Nitrógeno (Casierra-Martínez *et al.*, 2017) los cuales están presentes en los mesocosmos de HC-VPS en humedales construidos para el desarrollo adecuado de la amonificación entre 6.5 a 8.5 (Mang *et al.*, 2014). Al respecto, los valores obtenidos en este estudio se encuentran entre estos rangos. Por otra parte, estos resultados también son similares a los reportados por Del Toro *et al.*, (2019) que emplearon sistemas de humedales verticales parcialmente saturados con una fuente artificial de carbono en condiciones climatológicas similares, con aguas residuales domésticas.

Tabla 1. Métodos físicos y químicos utilizados en la medición de parámetros de calidad del agua en los mesocosmos HC-VPS.

Parámetro	Método de medición	Referencia
Oxígeno Disuelto (OD)	Electrodo (ilwaukee MW600 LED)	---
Temperatura del agua (°C)	Termómetro (SPIRE MIDELO: HG060)	---
pH	Electrodo (Ph 0-14 Portatil Lcd)	---
Demanda química de oxígeno (DQO)	Digestión por ácidos clorhídrico	APHA (2005)
Sólidos suspendido Totales (SST)	Método Gravimétrico	APHA (2005)
Nitrógeno total Kjeldhal (TNK)	Kjeldhal (Mye de occidente: Mkj-8)	APHA (2005)
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺ -N)	Kjeldhal (Mye de occidente: Mkj-8)	APHA (2005)
Coliformes totales (CT)	Número más probable (NMP)	APHA (2005)

El Oxígeno Disuelto (OD) en este estudio se incrementó significativamente ($p < 0.05$), tanto en los sistemas con presencia de *Canna hybrids* como en los que se plantaron con *Iris germánica*, siendo mayor el incremento en la primera especie ornamental (Tabla 2). Esto pudo deberse a tres factores: 1. A la presencia de la vegetación y a la liberación de Oxígeno en la zona radical (Zurita *et al.*, 2015), dado que la especie de *Iris germánica* no logró sobrevivir en los sistemas al incremento del Oxígeno; 2. Las condiciones de flujo libre parcialmente saturadas que presentaron los sistemas de GC-VPS (Nakase *et al.*, 2019); 3. A la exposición con la atmósfera que tuvo el agua cuando se midió en la salida, dado que no fue medida en el interior de los sistemas, puede ser uno de los factores por el cual se incrementó el Oxígeno en las aguas de salida de los sistemas, así como en otros estudios reportados en condiciones similares (Zurita *et al.*, 2015). En general los estudios reportados con humedales con saturación total muestran menores porcentajes de OD en el agua, lo que demuestra que los HC-VPS pueden mejorar significativamente el OD presente en el sistema, y de esta forma favorecer el proceso de nitrificación.

Eliminación de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en HC-VPS

La DQO permite medir cuánto oxígeno se agota de un cuerpo que recibe agua como resultados de la acción bacteriana. Este parámetro se ocupa para cuantificar la cantidad de materia orgánica presente en el agua, y se usa para determinar el efecto que podrá tener un efluente en el cuerpo receptor (Mo *et al.*, 2019; Robinson, 2016). En este estudio la concentración de DQO ($p < 0.05$) después de pasar por el sistema de tratamiento HC-VPS, se redujo en gran cantidad, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el tipo de vegetación empleada (Figura 2a). Estos resultados tienen sustento en la capacidad de mejorar la disminución de materia orgánica de la vegetación presente en los humedales construidos, debido a la liberación de exudados y enzimas que estimulan el desarrollo de microorganismo y actividad bioquímica en la zona de la rizófora (Sandoval-Herazo *et al.*, 2018), así como el incremento del OD en los sustratos (Tabla 2). Por otra parte, los sistemas de HC-VPS, dado sus condiciones de presencia de una zona de drenaje libre y saturada, propician mejores escenarios para el desarrollo de diferentes microorganismos que favorecen la eliminación de materia orgánica presente en las aguas residuales porcinas. Esta consideración facilita que se cumpla con la normatividad de descarga de agua residuales tratadas a cuerpos de aguas superficiales, y para reúso en la agricultura (Lorenzo *et al.*, 2009).

Tabla 2. Parámetros de control en sistema en la entrada de los HC-VPS.

Parámetro	Entrada	<i>Canna hybrids</i>	<i>Iris germánica</i>
Temperatura del agua (°C)	22.8±3.1	19.4±1.3	18.1±2.1
OD (mgL ⁻¹)	1.6±0.41	9.8±0.4	6.2±0.5
pH	7.7±0.3	7.4±0.1	7.1±0.2

Promedio ± error estándar (n= 56); OD: Oxígeno Disuelto

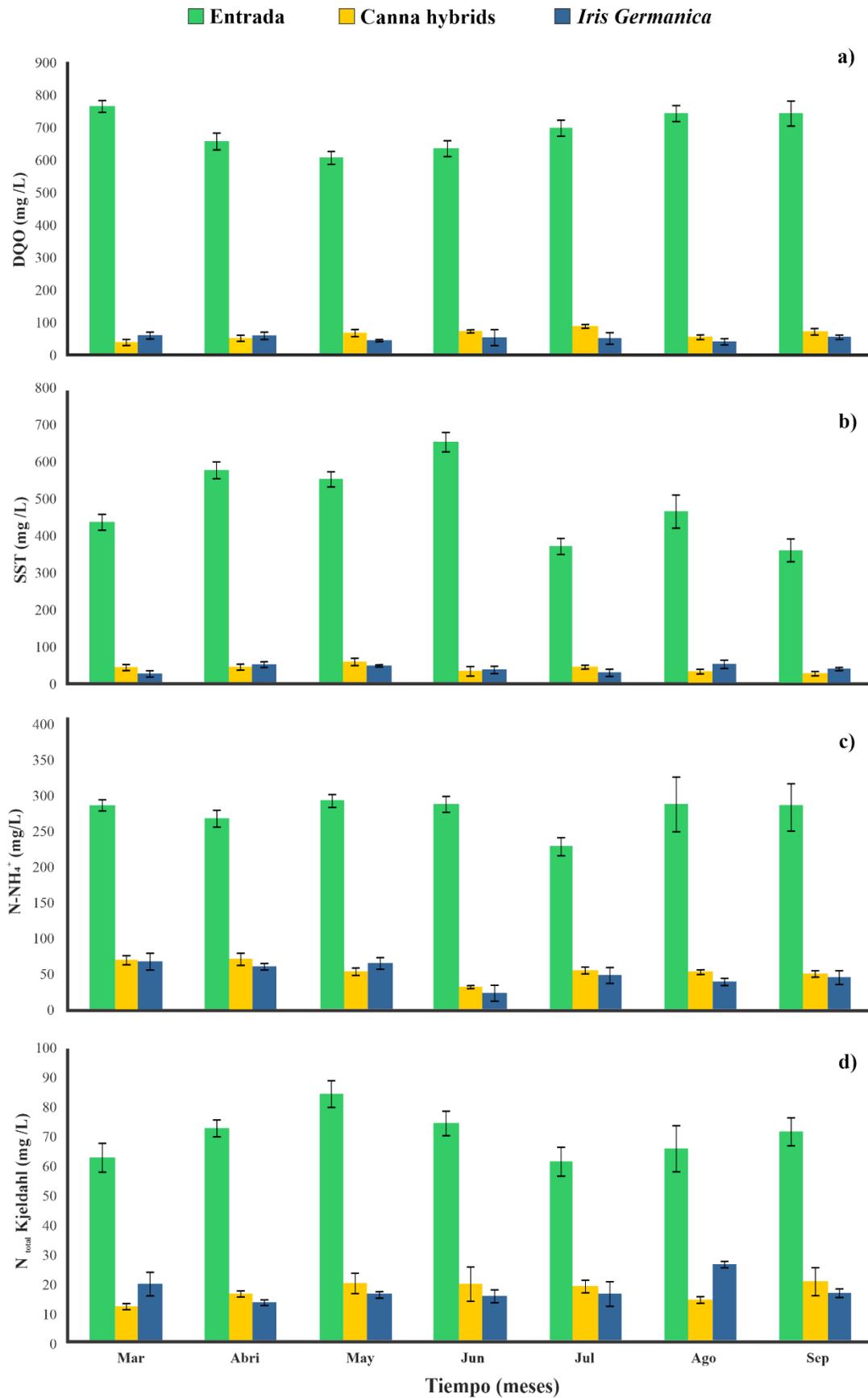


Figura 2. Concentraciones de contaminantes en la entrada y salida de los sistemas HC-VPS.

Eliminación de Sólidos Suspendedos Totales (SST) en HC-VPS

Los SST son el peso seco de las partículas en suspensión mayores a 2 micras que se encuentran en una muestra de agua (Becke *et al.*, 2019). La reducción significativa ($p < 0.05$), de los SST después de pasar por los HC-VPS (Figura 2b), se pudo deber a la forma de alimentación intermitente realizada a los sistemas. Esta condición pudo favorecer que se sedimentaran y biodegradaran sólidos durante el tratamiento, así como el uso de tezontle rojo como sustrato, que es un material rojo que permite se sedimente y filtren fácilmente sólidos en su superficie porosa (Rodríguez-Días *et al.*, 2013). Por otra parte, las diluciones de concentración de la entrada a los HC-VPS, en los meses julio, agosto y septiembre pudo deberse a las lluvias registradas durante estos meses en la zona de estudio (Sandoval *et al.*, 2019).

Eliminación de Nitrógeno en Forma de Amonio ($\text{N}-\text{H}_4^+$) en HC-VPS

El $\text{N}-\text{NH}_4^+$ se produce por descomposición por hidrólisis enzimática de la urea presente en aguas residuales. Las aguas superficiales no deben de tener presencia de amoníaco y su presencia en amoníaco libre o ión-amonio se considera como una prueba química de contaminación reciente y peligrosa (Fernández *et al.*, 2008; Ghimire *et al.*, 2019). Como era de esperarse, dado el tipo de aguas empleado en esta investigación, las concentraciones de amonio en el agua residual porcina fueron altas (Figura 2c) a pesar de que fueron diluidas 1:1. El NH_4^+-N se redujo significativamente ($p < 0.05$), con mejores resultados que los reportados en estudios con humedales construidos de flujo vertical tradicionales (Ayaz *et al.*, 2012; Saeed and Sun, 2012), y aun superiores a los reportados con humedales construidos con flujo de marea (Han *et al.*, 2019). Estos resultados pudieron deberse a las condiciones de operación del HC-VPS, en donde, las condiciones parcialmente saturadas han demostrado, a comparación a otros tipos de sistemas de humedales construidos, un mejor rendimiento en la disminución de concentración de amonio en aguas residuales (Nakase *et al.*, 2019). Sin embargo, las concentraciones de este compuesto en otros estudios fueron mejores, lo que pudo deberse a la forma de alimentación de los sistemas intermitentes, que demuestra favorecer la eliminación de contaminantes en el sistema. Así también, la presencia de vegetación que mostró un desarrollo saludable y sin mayores dificultades de adaptación en las dos especies empleadas en este estudio, pudo deberse a que el amonio contribuye al desarrollo de la vegetación (Schwammburger *et al.*, 2019; Schwammburger *et al.*, 2020), lo que también pudo contribuir a estas reducciones considerables en los HC-VPS.

Eliminación de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) en HC-VPS

El NTK es un indicador utilizado para medir la cantidad total de Nitrógeno en el agua determinada con química cuantitativa, el cual suma el Nitrógeno orgánico en sus diferentes formas y el ion amonio (Sáez-Plaza *et al.*, 2019). Los resultados de las concentraciones de NTK en este estudio se describen en Figura 2d, mostrando diferencias significativas ($p < 0.05$) en la eliminación de los sistemas plantados con *Canna hybrids* y *Iris germánica*, durante los meses de abril, mayo, junio, julio y septiembre (Figura 2d). En estos resultados es notable el efecto de *Iris germánica*, lo que pudo deberse al mayor crecimiento que presentó esta especie de planta durante estos meses del estudio. Mientras que en los meses de abril, mayo y julio no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$). Este estudio muestra resultados de eliminación de Nitrógeno superiores a los reportados por Li *et al.* (2019) y La Mora-Orozco *et al.* (2018) que emplearon humedales construidos con las aguas residuales porcinas, en condiciones de operación tradicionales de estos sistemas. Estos resultados de mayor eliminación de NTK pudo deberse a los mecanismos de eliminación de Nitrógeno en humedales construidos, como la desnitrificación que se puede dar en las zonas saturadas del HC-VPS, y la asimilación de la vegetación para su desarrollo. Así también la presencia de raíces en esta zona de flujo libre del HC-VPS propició la amonificación y nitrificación (Nakase *et al.*, 2019). Por otra parte, las condiciones de pH y temperatura que se presentaron en el sistema (Tabla 2), son adecuadas para el desarrollo de reacciones bioquímicas en los sistemas (Pérez-Pérez *et al.*, 2019).

Eliminación de Coliformes Totales (NMP 100mL) en HC -VPS

Los coliformes se reproducen fácilmente en aguas residuales porcinas dada las condiciones de alta presencia de nutrientes y materia orgánica (La Mora-Orozco *et al.*, 2018). En este sentido las concentraciones de Coliformes Totales son significativamente menores ($p < 0.05$) después de pasar por los sistemas HC-VPS (Figura 3), mientras que entre los dos tipos de vegetación no se prestaron diferencias significativas ($p < 0.05$) después del tratamiento en HC-VPS. Esta eliminación se pudo deber a las condiciones de los HC-VPS, que favorece la mayor presencia de oxígeno en los sistemas, pero a la vez proporciona condiciones anaerobias en una zona del sistema (Figura 1), así como la forma como estos fueron alimentados intermitentemente. En general los valores obtenidos en este estudio son superiores a los reportados por otros estudios de humedales

construidos que operan de forma tradicional de acuerdo a dos revisiones recientes de literatura exhaustiva realizadas sobre el tema por Wu *et al.* (2016) y Shingare *et al.* (2019). Estos resultados pudieron confluír por la integración de diversos factores como: las condiciones climáticas tropicales de operación de los sistemas, la mayor presencia de oxígeno en los HC-VPS (Tabla 2), la presencia de vegetación en los sistemas, y el mecanismo de alimentación intermitente que pudo permitir la inactivación de los coliformes.

Remociones de contaminante en HC-VPS

La remociones promedio de DQO (90 y 91%), N-NH₄ (77 y 79%), SST (), NTK (74 y 76%) y CT (94 y 93%)

[LC1] en HC-VPS sembrados con *Canna Hybrids* y *Iris germanica*, respectivamente, en general son rangos superiores a los reportados por Shingare *et al.* (2019), para humedales construidos verticales, en donde los porcentajes de eliminación de Coliformes están entre 65% a 82%. En el caso de otros parámetros convencionales Sandoval *et al.* (2019b) revisa 86 estudios de humedales construidos que usaron plantas ornamentales como las utilizadas en este estudio y de flujo vertical (45 documentos), encontrando eliminaciones en promedio inferiores a las reportadas en este estudio que utilizó concentraciones más altas de contaminantes. La remoción fue superior para los parámetros encontrados en HC-VPS: DQO (5%), N-NH₄ (25%), SST (20%), NTK (32%).

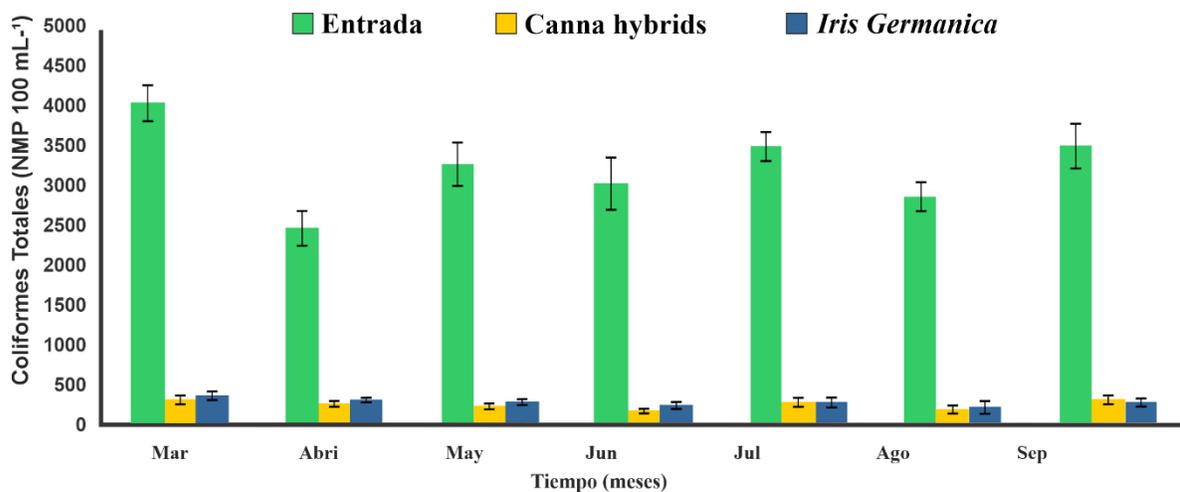


Figura 3. Contracción de coliformes totales en la entrada y salida de los HC-VPS.

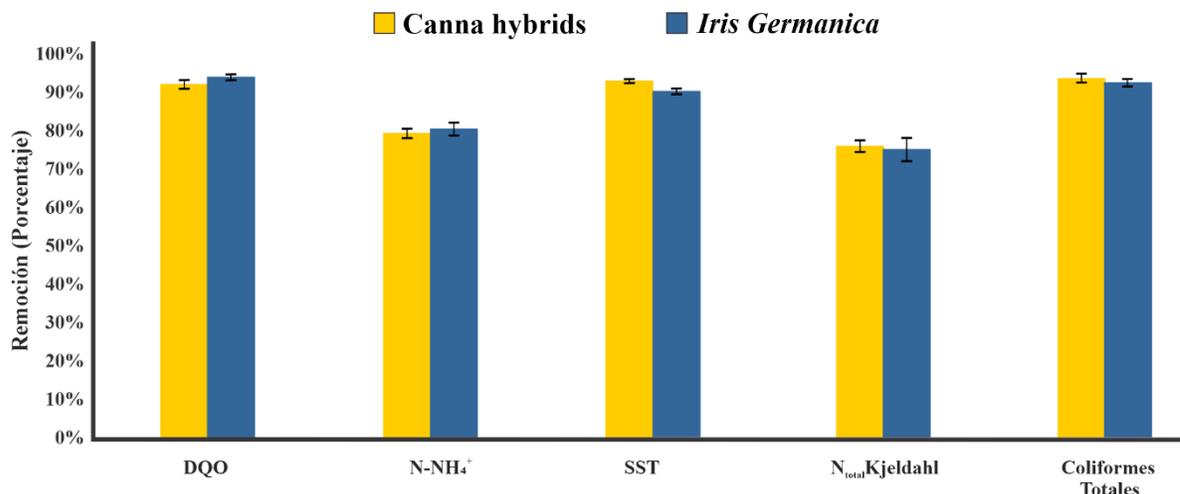


Figura 4. Remoción de contaminantes en HC-VPS.

CONCLUSIONES

El uso de Humedales Construidos Verticales Parcialmente Saturados para tratar aguas residuales de la agroindustria porcina, es un novedoso sistema de tratamiento económico ecológico a considerar en futuros diseños de humedales construidos. En este estudio, estos sistemas demostraron ser más eficientes que los humedales construidos verticales, tradicionalmente usados como sistemas de tratamiento para microempresas porcinas. Los hallazgos en este estudio demostraron que las condiciones de saturación parcial de los HC-VPS, son mayormente eficiente que los sistemas convencionales de tratamiento usados en humedales construidos. También, los resultados en este estudio demostraron que la *Canna Hybrids* e *Iris germánica* se lograron adaptar y su presencia, al parecer favorece la eliminación de contaminantes, por lo que pueden ser empleadas como vegetación en el tratamiento de aguas residuales porcinas.

Por otra parte, estudios con mayor tiempo de duración son requeridos para analizar posibles problemas en sistemas HC-VPS en cuanto a saturación, renovación de vegetación, o diferentes condiciones de operación, así como su evaluación en sistemas híbridos que ayuden a evaluar si el proceso es igual de eficiente sin necesidad de diluir el agua. Estos resultados dan la oportunidad de realizar estudios desde un enfoque de economía circular.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ingeniero Jesús Emanuel Paxtían Guillen por su apoyo en el desarrollo de la gráfica interpretativa del sistema HC-VPS.

Financiamiento. El Tecnológico Nacional de México otorgó el apoyo económico para el desarrollo del proyecto con clave: 5035.19-P: "Tratamiento de aguas residuales producidas por microempresas porcinas en Veracruz, México mediante humedal construidos de flujo vertical parcialmente saturados", en la Convocatoria 2019: Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica en los Programas Educativos de los Institutos Tecnológicos Federales, Descentralizados y Centros.

Conflicto de intereses: - Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Cumplimientos de normas éticas. Los autores declaran que este artículo es original y no ha sido publicado en ninguna otra revista y contribuyeron de manera voluntaria en su elaboración.

Disponibilidad de datos. Los datos están disponibles con el autor correspondiente, Luis Sandoval, y se

pueden solicitar a través de correo electrónico lsandovalh@gmail.com, previa solicitud.

REFERENCIAS

- Akratos, C. S., and Tsihrintzis, V. A., 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological engineering*, 29(2), 173-191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.013>
- Alcamo, J., 2019. Water quality and its interlinkages with the Sustainable Development Goals. *Current opinion in environmental sustainability*, 36, 126-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.11.005>
- American Public Health Association. APHA., 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. *American Public Health Association*, Washington DC, 1220p.
- Ayaz, S. C.; Aktaş, Ö.; Findık, N.; Akça, L.; and Kınacı, C., 2012. Effect of recirculation on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 40, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.028>
- Becke, C.; Schumann, M.; Steinhagen, D.; Rojas-Tirado, P.; Geist, J.; and Brinker, A., 2019. Effects of unionized ammonia and suspended solids on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 499, 348-357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.048>
- Casierra-Martínez, H. A.; Charris-Olmos, J. C.; Caselles-Osorio, A.; and Parody-Muñoz, A. E., 2017. Organic matter and nutrients removal in tropical constructed wetlands using *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) and *Echinochloa colona* (Poaceae). *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(9), 338. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3531-1>
- Chowdhary, P.; Bharagava, R. N.; Mishra, S., and Khan, N., 2020. Role of Industries in Water Scarcity and Its Adverse Effects on Environment and Human Health. In *Environmental Concerns and Sustainable Development* (pp. 235-256). Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5889-0_12

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2014). Numeragua México, 2018. Encontrar en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/Numeragua_2018.pdf
- Del Toro, A.; Tejada, A., and 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11102151>
- Fernández, E. S.; Garrido, J. M.; Coda, F. E.; Pujol, R. O., and Coma, S. C., 2008. Eliminación del nitrógeno amoniacal en aguas residuales sanitarias. *Técnica industrial*, 273, 44-49. DOI: <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/33/40/a40.pdf>
- García, S. L.; Arguello, A.; Parra, R.; and Pilay, M. P., 2019. Factores que influyen en el pH del agua mediante la aplicación de modelos de regresión lineal. *INNOVA Research Journal*, 4(2), 59-71. DOI: <https://doi.org/10.33890/innova.v4.n2.2019.909>
- Ghimire, U.; Jang, M.; Jung, S. P.; Park, D.; Park, S. J.; Yu, H.; and Oh, S. E., 2019. Electrochemical Removal of Ammonium Nitrogen and COD of Domestic Wastewater using Platinum Coated Titanium as an Anode Electrode. *Energies*, 12(5), 883. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12050883>
- Han, Z.; Miao, Y.; Dong, J.; Shen, Z.; Zhou, Y.; Liu, S.; and 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-019-1133-4>
- Hernández-Salazar, A. B.; Moreno-Seceña, J. C.; and 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. Encontrar en: <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/27>
- Kadlec, R. H.; and Reddy, K. R., 2001. Temperature effects in treatment wetlands. *Water environment research*, 73(5), 543-557. DOI: <https://doi.org/10.2175/106143001X139614>
- La Mora-Orozco, D.; González-Acuña, I.; Saucedo-Terán, R.; Flores-López, H.; Rubio-Arias, H.; and Ochoa-Rivero, J., 2018. Removing Organic Matter and Nutrients from Pig Farm Wastewater with a Constructed Wetland System. *International journal of environmental research and public health*, 15(5), 1031. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15051031>
- Li, X.; Li, Y.; Li, Y.; and Wu, J., 2019. Enhanced nitrogen removal and quantitative analysis of removal mechanism in multistage surface flow constructed wetlands for the large-scale treatment of swine wastewater. *Journal of environmental management*, 246, 575-582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.019>
- Lorenzo, E. V.; Ocaña, J. G. L.; Fernández, L. A.; and Venta, M. B., 2009. Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 40(1), 35-44. Encontrar en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181221574007>
- Luz, M. I. R.; Zárate, A. G.; Núñez, S. G. C.; and De Bazúa, C. D., 2011. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. *Química Central*, 2(1), 25-32. Encontrar en: <https://www.lenntech.es/eliminacion-del-fosforo>
- Marín-Muniz, J. L., 2016. Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México Removal of wastewater pollutant in artificial wetlands implemented in Actopan, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(2), 553-563. Encontrar en: <http://rmiq.org/iqfvp/Pdfs/Vol.%2015,%20No.%202/IA1/RMIQTemplate.pdf>
- Meng, P.; Pei, H.; Hu, W.; Shao, Y.; and Li, Z., 2014. How to increase microbial degradation in constructed wetlands: influencing factors and improvement measures. *Bioresource technology*, 157, 316-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.095>
- Mikulčić, H.; Baleta, J.; and Klemeš, J. J., 2019. Sustainability through combined development of energy, water and environment systems. *Journal of Cleaner Production*, 119727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119727>

- Mo, H.; Chen, Y.; Tang, Y.; Li, T.; Zhuang, S.; Wang, L.; ... and Wan, P., 2019. Direct determination of chemical oxygen demand by anodic oxidative degradation of organics at a composite 3-D electrode. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 23(5), 1571-1579. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10008-019-04250-4>
- Nakase, C.; Zurita, F.; Nani, G.; Reyes, G., Fernández-Lambert, G.; Cabrera-Hernández, A.; and Sandoval, L., 2019. Nitrogen Removal from Domestic Wastewater and the Development of Tropical Ornamental Plants in Partially Saturated Mesocosm-Scale Constructed Wetlands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23), 4800. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16234800>
- OPORPA., 2019. En 2018 México produjo 9.8 millones de toneladas de proteína animal. Encontrar en : <https://www.porcicultura.com/destacado/En-2018-Mexico-produjo-9.8-millones-de-toneladas-de-proteina-animal>
- Puente, E. O. R.; Murillo-Amador, B.; Ortega-García, J.; Preciado, P. R.; Garibay, A. N.; Peña, R. J. H.; ... and Corral, F. J. W., 2017. Natural development of the halophyte *salicornia bigelovii* (tor.) In coastal area of sonora state. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(1). Encontrar en: <http://www.revista.ccba.uady.mx/urn:ISSN:1870-0462-tsaes.v20i1.1573>
- Pérez-Pérez, T.; Pereda-Reyes, I.; Correia, G. T.; Pozzi, E.; Kwong, W. H.; Oliva-Merencio, D.; and Zaiat, M., 2019. Adición de zeolita en reactor EGSB para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *INFOMIN*, 11. Encontrar en: <http://www.infomin.co.cu/index.php/i/article/view/120>
- Qadri, R.; and Faiq, M. A., 2020. Freshwater Pollution: Effects on Aquatic Life and Human Health. In *Fresh Water Pollution Dynamics and Remediation* (pp. 15-26). Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8277-2_2
- Robinson, N. A., 2016. *Environmental Law Lexicon*. Law Journal Press. Encontrar en: <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=BGjcw2OLwO4C&oi=fnd&pg=PR7&dq=Environmental+Law+Lexicon+Por+Nicholas+A.+Robinson&ots=2Bz3TdWBw2&sig=rR7fGdQqQHKIRq8NAGb8Un6z2ug#v=onepage&q=Environmental%20Law%20Lexicon%20Por%20Nicholas%20A.%20Robinson&f=false>
- Rodríguez Díaz, E.; Salcedo Pérez, E.; Rodríguez Macias, R.; González Eguiarte, D. R.; and Mena Munguía, S., 2013. Reúso del tezontle: efecto en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Terra Latinoamericana*, 31(4), 275-284. Encontrar en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n4/2395-8030-tl-31-04-00275.pdf>
- Sáez-Plaza, P.; Asuero, A. G.; and Martín, J., 2019. Una anotación sobre el método de Kjeldahl. In *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* (Vol. 85, No. 1). Encontrar en: <http://www.analesranf.com/index.php/aranf/article/view/1907/1905>
- Saeed, T.; and Sun, G., 2012. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429-448. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>
- Sandoval-Herazo, L.; Alvarado-Lassman, A.; Marín-Muñiz, J.; Méndez-Contreras, J.; and 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10051594>
- Sandoval, L.; Marín-Muñiz, J. L.; Zamora-Castro, S. A.; Sandoval-Salas, F.; and 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16020167>
- Sandoval, L.; Zamora-Castro, S. A.; Vidal-Álvarez, M.; and Marín-Muñiz, J. L., 2019b. Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences*, 9(4), 685. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9040685>
- Schwammberger, P. F.; Lucke, T.; Walker, C.; and Trueman, S. J., 2019. Nutrient uptake by constructed floating wetland plants during the

- construction phase of an urban residential development. *Science of The Total Environment*, 677, 390-403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.341>
- Schwammberger, P. F.; Yule, C. M.; and Tindale, N. W., 2020. Rapid plant responses following relocation of a constructed floating wetland from a construction site into an urban stormwater retention pond. *Science of The Total Environment*, 699, 134372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134372>
- Shingare, R. P.; Thawale, P. R.; Raghunathan, K.; Mishra, A.; and Kumar, S., 2019. Constructed wetland for wastewater reuse: Role and efficiency in removing enteric pathogens. *Journal of environmental management*, 246, 444-461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.157>
- Tessema, I.; and Simane, B., 2019. Agroecosystem analysis of fincha sub basin, blue Nile river basin, Ethiopia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22(2). Encontrar en: <http://www.revista.ccba.uady.mx/urn:ISSN:1870-0462-tsaes.v22i2.2700>
- Trejo-Téllez, L. I.; Ramírez-Martínez, M.; Gómez-Merino, F. C.; García-Albarado, J. C.; Baca-Castillo, G. A.; and Tejeda-Sartorius, O., 2013. Physical and chemical evaluation of volcanic rocks and its use for tulip production. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(Especial 5), 863-876. Encontrar en: <http://www.inifap.gob.mx/.../rmca.aspx>
- Wu, S.; Carvalho, P. N.; Müller, J. A.; Manoj, V. R.; and 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.047>
- Zaid, A. Q.; Ghazali, S. B.; Mutamim, N. S. A.; and Olalere, O. A., 2019. Experimental optimization of Moringa oleifera seed powder as bio-coagulants in water treatment process. *SN Applied Sciences*, 1(5), 504. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0518-0>
- Zamora, S.; Sandoval, L.; Marín-Muñiz, J. L.; Fernández-Lambert, G.; and Hernández-Orduña, M. G., 2019. Impact of ornamental vegetation type and different substrate layers on pollutant removal in constructed wetland mesocosms treating rural community wastewater. *Processes*, 7(8), 531. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7080531>
- Zurita, F. M.; Bravo, D. R.; Álvarez, A. C.; and Lomelí, M. G., 2015. Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos. *Interciencia*, 40(6), 409-415. DOI: 0378-1844/14/07/468-08. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33938675008>