

## Fósforo en humedales construidos: ¿Un problema o una oportunidad?

Phosphorus in Constructed Wetlands: A Problem or an Opportunity?

MONZÓN R., BRENDA LIZETH.<sup>1,\*</sup>, LÓPEZ M., MARÍA CRISTINA <sup>2</sup> Y GONZÁLEZ M., HUMBERTO RAYMUNDO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio De Humedales y Sustentabilidad Ambiental, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla.

<sup>2</sup> División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Veracruz CP 93821, México

\* Autor por correspondencia: blmonzonr@gmail.com

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 03 de septiembre de 2025

Publicado: 24 de noviembre de 2025

### Resumen

Los humedales construidos son una alternativa ecológica y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales. Entre sus múltiples beneficios, destaca su capacidad para eliminar nutrientes como el fósforo, cuya acumulación en cuerpos de agua puede provocar eutrofización y afectar la salud ambiental y humana. Sin embargo, aunque existen numerosos estudios sobre los mecanismos físicos, químicos y biológicos involucrados en la eliminación de fósforo, pocos han explorado su potencial como sistemas de reciclaje de este nutriente, especialmente a través de la biomasa vegetal. Se evaluó el desempeño de un humedal subsuperficial horizontal (HSSFH) sembrado con plantas ornamentales durante un periodo de seis meses. Se encontraron eficiencias hasta 83% en la eliminación de fósforo total, particularmente en condiciones de temperatura elevada. Además, se identificó una correlación entre la remoción de FT y el crecimiento de las especies *Alocasia odora* y *Heliconia psittacorum* de 0.557, indicando una fuerte correlación. Los humedales construidos ofrecen un doble beneficio: la depuración eficiente del agua y la recuperación de nutrientes a través de la biomasa vegetal. Por ello, resulta fundamental considerar la selección estratégica de especies vegetales con alta capacidad de asimilación de fósforo, la implementación de sistemas híbridos que combinen diferentes tipos de humedales y el establecimiento de programas de monitoreo a largo plazo que permitan optimizar su desempeño y sostenibilidad en el tiempo.

**Palabras clave:** *Nutrientes, fósforo, humedales construidos, plantas ornamentales*

## **Abstract**

Constructed wetlands are an ecological and low-cost alternative for the treatment wastewater. Among their many benefits, their ability to remove nutrients such as phosphorus stands out, as phosphorus accumulation in water bodies can lead to eutrophication and negatively impact both environmental and human health. However, although numerous studies have investigated the physical, chemical, and biological mechanisms involved in phosphorus removal, few have explored their potential as nutrient recycling systems, particularly through plant biomass. The performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland (HSSF CW) planted with ornamental species was evaluated over a six-month period. Total phosphorus removal efficiencies of up to 83% were observed, especially under high-temperature conditions. A correlation of 0.557 was found between phosphorus removal and the growth of *Alocasia odora* and *Heliconia psittacorum*, indicating a strong relationship. Constructed wetlands offer a dual benefit: efficient water treatment and nutrient recovery through plant biomass. Therefore, it is essential to consider the strategic selection of plant species with a high phosphorus uptake capacity, the implementation of hybrid systems combining different types of wetlands, and the establishment of long-term monitoring programs to optimize performance and ensure sustainability over time.

**Keywords:** *Nutrients, phosphorus, constructed wetlands, ornamental plants*

## **1. Introducción**

El agua, esencial para la vida, pero también uno de los más amenazados por la contaminación. Cada día, millones de litros de aguas residuales generados por actividades humanas como la agricultura, la industria y el uso doméstico, llegan al medio ambiente a menudo cargados de nutrientes como el fósforo. Este elemento, presente en detergentes, fertilizantes y desechos humanos es indispensable para el crecimiento de plantas y microorganismos. Sin embargo, su liberación excesiva al entorno puede causar graves problemas ambientales, como la

eutrofización de cuerpos de agua. Este fenómeno ocurre cuando el exceso de nutrientes, combinado con la baja disponibilidad de oxígeno, desencadena un crecimiento descontrolado de algas, alterando los ecosistemas acuáticos y poniendo en riesgo la salud humana (Maucieri, Salvato and Borin, 2020).

Ante esta problemática, los humedales construidos han surgido como una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas replican los procesos naturales de los humedales para eliminar contaminantes, utilizando plantas, suelos y microorganismos (Martín *et al.*, 2013). El manejo del fósforo en humedales construidos no está exento de desafíos. Con el tiempo, los suelos pueden saturarse, limitando su capacidad para retener fósforo y aumentando el riesgo de que este sea liberado nuevamente al agua. A pesar de esto las plantas desempeñan un papel crucial en estos sistemas. Absorben el fósforo y lo incorporan en su biomasa (Li *et al.*, 2021), transformando lo que podría ser un contaminante peligroso en un recurso valioso y contribuyendo al equilibrio y eficiencia del humedal. Así como también permitiendo una posible recuperación del fósforo para abastecer las necesidades actuales en la producción de alimentos.

### *1.1 Desafío del fósforo como contaminante y recurso valioso*

La principal fuente de fósforo en la naturaleza proviene de la agricultura y las aguas residuales. En la agricultura, su regulación puede lograrse mediante una fertilización equilibrada que evite el exceso de este nutriente. En el caso de las aguas residuales, es necesario aplicar tratamientos adecuados para reducir sus niveles a concentraciones aceptables para los ecosistemas naturales. Uno de los problemas más comunes asociados al exceso de fósforo es la eutrofización, especialmente en los ecosistemas de agua dulce. Este fenómeno puede desencadenarse con concentraciones de fósforo tan bajas como 0.03 a 0.1 mg/L (Zhou *et al.*, 2022), lo que demuestra que incluso pequeñas cantidades pueden tener impactos devastadores. Los daños no solo afectan los ecosistemas acuáticos, sino también la salud humana, ya que la eliminación del fósforo acumulado en sistemas acuáticos y cuencas hidrográficas puede tardar entre 100 y más de 2,000 años.

Por otro lado, el fósforo es fundamental para garantizar la producción de alimentos, especialmente en un mundo donde la población aumenta considerablemente día a día. Este nutriente esencial proviene de rocas fosfóricas que se encuentran en pocas regiones del planeta, lo que lo convierte en un recurso limitado, bajo la alta demanda se espera su agotamiento en los próximos 45 a 100 años(Sengupta, Nawaz and Beaudry, 2015).

La importancia de gestionar eficientemente el fósforo no solo radica en la prevención de consecuencias a largo plazo, sino también fomentar prácticas sostenibles que optimicen su uso y garanticen su disponibilidad para las futuras generaciones.

### *1.2 Gestión del fósforo en humedales construidos*

Durante décadas se ha explorado la eliminación de fósforo en humedales construidos, se dice que se iniciaron estudios a escala real y de gran tamaño en 1976 y fue hasta la década de 1990 donde se añadieron más sistemas de control de fósforo mediante humedales construidos(Kadlec, 2016). Los investigadores sugieren explorar estos sistemas de gran tamaño debido a la diferencia controlada en el caso de los sistemas en escalas pequeñas, y así conocer los procesos que realmente suceden a escala de campo.

La eliminación de fósforo en humedales construidos depende de una interacción dinámica entre componentes físicos, químicos y biológicos comprender como actúan estos procesos, es útil para optimizar el diseño y funcionamiento del humedal. Los principales mecanismos de eliminación de fósforo descritos por Vera-Puerto et al. (2017) son: Adsorción, precipitación, absorción por plantas y sedimentación y acumulación.

## **2. Materiales y métodos**

### *2.1 Sitio de estudio y descripción del sistema*

El estudio se llevó a cabo una comunidad rural de Misantla, México en un humedal construido a escala real ornamental, el tratamiento integrado por un sedimentador como

tratamiento primario, un sistema de flujo libre y un sistema subsuperficial de flujo horizontal. El diseño del sistema fue temático, utilizando grava roja volcánica como medio filtrante, y se plantaron tres especies de plantas ornamentales: *Alocasia odora*, *Heliconia psittacorum* y *Zantedeschia aethiopica*.

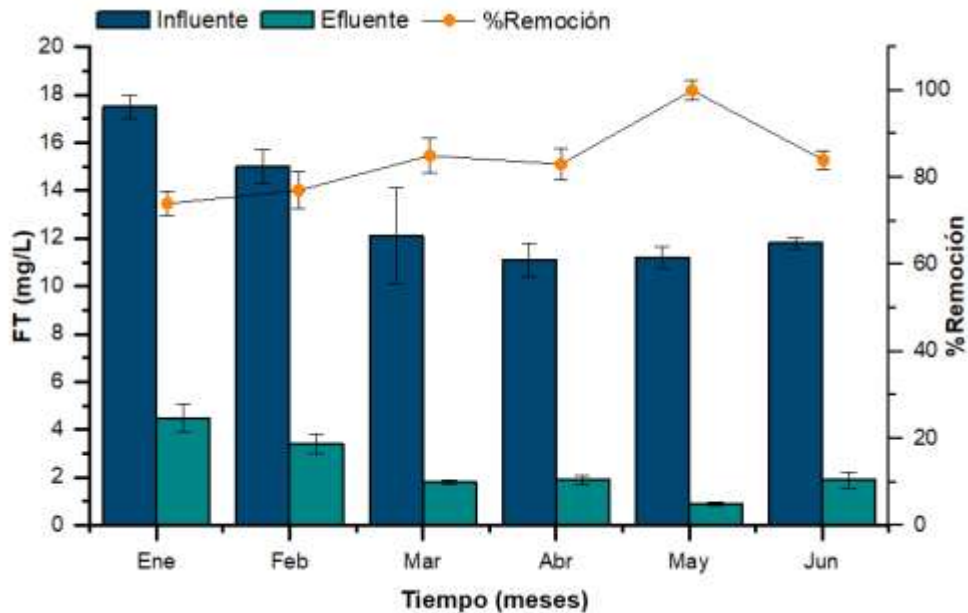
### 2.2 Medición de parámetros y vegetación

Se tomaron muestras de agua quincenalmente en el influente y el efluente y fueron analizadas en el laboratorio de humedales y sustentabilidad ambiental del Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Se determinó Fósforo Total (FT) mediante un espectrofotómetro Visible HI801-01 “iris” (HANNA ® Instruments, Woonsocket, RI, EE. UU.) basado en métodos normalizados para análisis de aguas potables y aguas residuales (AWWA-WEF, 2005). El desarrollo vegetal fue medido cada 3 meses con tomando en cuenta la altura de las plantas sembradas, fue medida la altura con cinta métrica. La eficiencia del sistema fue siguiendo la fórmula recomendada por Haghshenas-Adarmanabadi et al. (2016).

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Remoción de fósforo

El comportamiento de FT puede observarse en la Figura 1. Los resultados muestran una mayor eficiencia durante los meses de febrero a mayo, lo que evidencia la influencia de la temperatura en el desempeño del sistema. Estos meses, caracterizados por temperaturas elevadas (32 °C) y baja precipitación (5 mm), favorecieron el proceso de eliminación de fósforo. Las concentraciones de salida alcanzaron un promedio de  $2.54 \pm 0.19$  mg/L, cumpliendo ampliamente con los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 en México (15 mg/L) (SEMARNAT, 2022).



**Figura 1.** Comportamiento de Fósforo Total a lo largo del periodo de evaluación porcentaje de remoción. Valores promedio  $\pm$  Error

Este comportamiento es consistente con estudios previos que han demostrado que las temperaturas altas estimulan la actividad microbiana y la absorción de nutrientes por las plantas (Ruan *et al.*, 2021). Los resultados de este estudio, con una eficiencia de remoción promedio del 83%, destacan como uno de los valores más altos reportados para sistemas subsuperficiales de flujo horizontal (HSSFH) en la Tabla 1. Este desempeño supera ampliamente eficiencias reportadas en Portugal (21.5%) (Mesquita *et al.*, 2018) y es consistente con el rango observado en estudios realizados en China ( $65 \pm 21\%$ ). Estos datos confirman la efectividad de los sistemas HSSFH, especialmente cuando se emplean sustratos adecuados, como la grava roja volcánica utilizada en este caso, y bajo condiciones climáticas tropicales que favorecen los procesos de eliminación de fósforo.

### 3.2 Contribución de las plantas en la remoción de fósforo

En relación a la vegetación en humedales construidos, la mayor parte del fósforo es absorbida por las raíces de las plantas, así como por las hojas y los brotes (Brant and Chen, 2015). Este proceso es más intenso durante la primavera y el verano, por lo tanto, se pueden tener mayores índices de crecimiento en estas temporadas, como se observa en la Figura 2. Esto

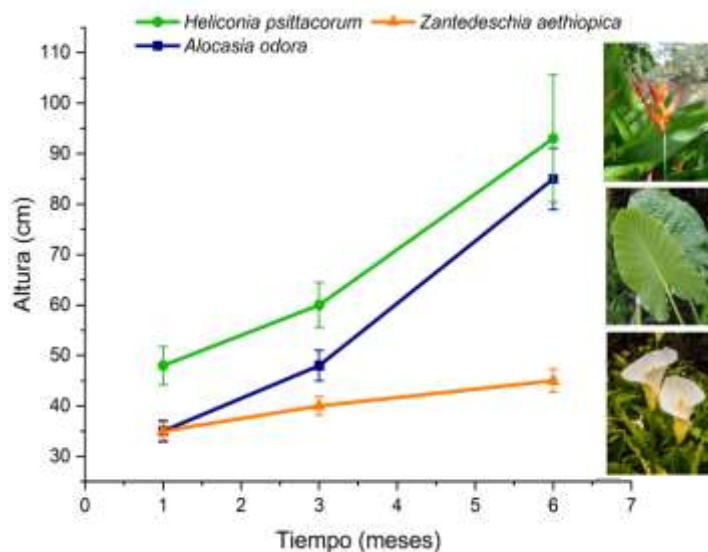
coincide igualmente con el inicio de la temporada de crecimiento de la vegetación, cuando su actividad metabólica alcanza su punto máximo. Caso contrario de las estaciones de otoño e invierno, donde es útil poner atención, dadas las pérdidas de material vegetal que después se descompone en el sistema. A principios del otoño, cuando las plantas alcanzan la etapa de senescencia, podría implementarse un plan de recolección de biomasa vegetal. Este enfoque permitiría recuperar los nutrientes acumulados durante la primavera y el verano, estableciendo un proceso sostenible para la extracción y reutilización de estos nutrientes, optimizando el manejo de los humedales construidos.

A este punto, sería apresurado afirmar que la vegetación es el factor determinante más importante en la eliminación de fósforo en humedales construidos a escala real. Esto se debe a diversos factores, como la dificultad de establecer monocultivos en lugar de policultivos, las condiciones climáticas variables y las concentraciones de nutrientes en el afluente. Sin embargo, los datos evidencian una correlación entre la mayor pérdida de fósforo y el crecimiento de las plantas. Tal como se muestra en la Figura 3, entre los meses 3 y 6 (marzo-junio), se registró el mayor crecimiento de las especies, destacándose *Heliconia psittacorum* seguida por *Alocasia odora*. Mediante el análisis de correlación de Pearson, mostró un coeficiente de 0.557, indicando una correlación fuerte. Esto sugiere que la vegetación podría desempeñar un papel significativo en la eliminación de fósforo.



**Figura 2.** Crecimiento *Alocasia odora* y *Heliconia psittacorum* en humedal construido

En particular, este es uno de los primeros estudios en humedales a escala real que incorpora *Alocasia odora*, una especie ampliamente reconocida por su capacidad como hiperacumuladora de nutrientes, especialmente para la eliminación de metales pesados (Mohamad Thani *et al.*, 2020). Esto refleja una relación entre el crecimiento acelerado de la biomasa vegetal, la capacidad de eliminación de fósforo y la biomasa existente en el sistema, destacando el potencial de esta especie como componente clave en el manejo del fósforo en humedales construidos.



**Figura 1.** Crecimiento de especies de plantas ornamentales en el periodo de monitoreo

### 3.3 Perspectivas futuras para el manejo del fósforo en humedales construidos

Los humedales construidos representan una solución prometedora para la gestión del fósforo en aguas residuales, y su potencial sigue en expansión. En el futuro, se espera que se diseñen sistemas más eficientes y sostenibles para la eliminación y recuperación de fósforo, centrados en la optimización del uso de plantas. Específicamente, se podrían emplear especies vegetales con mayor capacidad para absorber nutrientes, como las que se están investigando en la actualidad. La recolección periódica de biomasa para recuperar el fósforo almacenado en las plantas será un aspecto clave para garantizar que estos sistemas sigan siendo efectivos a largo plazo, especialmente en climas tropicales. Además, los avances en el diseño de humedales

más grandes y en la mejora de los sustratos filtrantes permitirán aumentar la capacidad de remoción de fósforo, maximizando el potencial de estos ecosistemas construidos.

A medida que los cambios climáticos alteren las condiciones ambientales, la adaptación de los humedales construidos a estos nuevos escenarios será esencial para mantener su rendimiento. A largo plazo, el uso de estos sistemas no solo contribuirá a mitigar la eutrofización, sino que también proporcionará una fuente de nutrientes reciclados que podrían ser utilizados como fertilizantes, cerrando así el ciclo de este recurso vital.

#### **4. Conclusiones**

La vegetación empleada en humedales construidos es un factor clave en la eliminación de fósforo, por lo que, la selección de especies es fundamental para la recuperación de este nutriente. En especial especies ornamentales que para este estudio mostraron correlación directa con la eficiencia de remoción. En general se exhibieron remociones por encima del promedio de los estudios revisados, destacando el papel de las plantas ornamentales en comparación con otras especies.

La presencia de fósforo en los humedales construidos no debe verse solo como un desafío, sino como una oportunidad para optimizar el tratamiento de aguas residuales y la recuperación del mismo a través de estos sistemas. Estos sistemas pueden contribuir significativamente a la preservación de los recursos hídricos y al fortalecimiento de la biodiversidad local, favoreciendo un desarrollo más sostenible y consciente. Se recomienda que las investigaciones se centren en el aprovechamiento de los recursos que ofrecen los humedales construidos, como la obtención de fósforo como nutriente.

**Agradecimientos:** En agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

#### **Referencias bibliográficas**

Ansola, G. et al. (2003) 'Experimental and full-scale pilot plant constructed wetlands for municipal wastewaters treatment', *Ecological Engineering*, 21(1), pp. 43–52. Available

- at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2003.08.002>.
- AWWA-WEF (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater.
- Brant, A.N. and Chen, H.Y.H. (2015) 'Patterns and Mechanisms of Nutrient Resorption in Plants', *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34(5), pp. 471–486. Available at: <https://doi.org/10.1080/07352689.2015.1078611>.
- Haghshenas-Adarmanabadi, A., Heidarpour, M. and Tarkesh-Esfahani, S. (2016) 'Evaluation of horizontal-vertical subsurface hybrid constructed wetlands for tertiary treatment of conventional treatment facilities effluents in developing countries', *Water, Air, and Soil Pollution*, 227(1). Available at: <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2718-6>.
- Kadlec, R. (2016) 'Large Constructed Wetlands for Phosphorus Control: A Review', *Water*, 8(6), p. 243. Available at: <https://doi.org/10.3390/w8060243>.
- Li, J. et al. (2021) 'The Use of Constructed Wetland for Mitigating Nitrogen and Phosphorus from Agricultural Runoff: A Review', *Water*, 13(4), p. 476. Available at: <https://doi.org/10.3390/w13040476>.
- Martín, M. et al. (2013) 'Phosphorus and nitrogen removal from tertiary treated urban wastewaters by a vertical flow constructed wetland', *Ecological Engineering*, 61, pp. 34–42. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.046>.
- Maucieri, C., Salvato, M. and Borin, M. (2020) 'Vegetation contribution on phosphorus removal in constructed wetlands', *Ecological Engineering*, 152, p. 105853. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105853>.
- Mesquita, C. et al. (2018) 'Effectiveness and Temporal Variation of a Full-Scale Horizontal Constructed Wetland in Reducing Nitrogen and Phosphorus from Domestic Wastewater', *ChemEngineering*, 2(1), p. 3. Available at: <https://doi.org/10.3390/chemengineering2010003>.
- Mohamad Thani, N.S. et al. (2020) 'Optimization of Phytoremediation of Nickel by *Alocasia puber* Using Response Surface Methodology', *Water*, 12(10), p. 2707. Available at: <https://doi.org/10.3390/w12102707>.
- Ruan, W. et al. (2021) 'Efficiency and plant indication of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands: A field-scale study in a frost-free area', *Science of The Total Environment*, 799, p. 149301. Available at:

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149301>.
- Sandoval Herazo, L. et al. (2023) ‘Full-Scale Constructed Wetlands Planted with Ornamental Species and PET as a Substitute for Filter Media for Municipal Wastewater Treatment: An Experience in a Mexican Rural Community’, *Water*, 15(12), p. 2280. Available at: <https://doi.org/10.3390/w15122280>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). NOM-001-SEMARNAT-2021: Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación, 11 de marzo de 2022. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645435&fecha=11/03/2022](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645435&fecha=11/03/2022)
- Sengupta, S., Nawaz, T. and Beaudry, J. (2015) ‘Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater’, *Current Pollution Reports*, 1(3), pp. 155–166. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0013-1>.
- Song, Z. et al. (2006) ‘Seasonal and annual performance of a full-scale constructed wetland system for sewage treatment in China’, *Ecological Engineering*, 26(3), pp. 272–282. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.10.008>.
- Vera-Puerto, I. L., Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., ... & von Sperling, M. HUMEDALES PARA TRATAMIENTO.
- Zhai, J. et al. (2016) ‘Seasonal Variation of Nutrient Removal in a Full-Scale Artificial Aerated Hybrid Constructed Wetland’, *Water*, 8(12), p. 551. Available at: <https://doi.org/10.3390/w8120551>.
- Zhou, Q. et al. (2022) ‘Simultaneous biological removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent of wastewater treatment plants by advanced treatment: A review’, *Chemosphere*, 296, p. 134054. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134054>.