

Evaluación de la capacidad de remoción de fosfato del helecho de agua (*Salvinia minima*) en humedales artificiales

Evaluation of the phosphate removal capacity of the water fern (*Salvinia minima*) in artificial wetlands

Iris Atencio¹, Víctor Castro¹, Kristel Miranda¹, Yarisel González², Viccelda Domínguez de Franco^{2*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

Fecha de recepción: 8 de septiembre de 2023. **Fecha de aceptación:** 18 de diciembre de 2023.

***Autor de correspondencia:** viccelda.dominguez@utp.ac.pa

Resumen. El aumento excesivo de fosfato ($\text{PO}_4^{3-} > 0.10 \text{ mg/L}$) en cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, conducen a problemas como la eutrofización, consecuencia de la descarga directa o indirecta de vertidos industriales, agrícolas y domésticos, lo que resulta en un efecto negativo en la calidad de las aguas, poniendo en riesgo la salud y la integridad de los ecosistemas. De acuerdo con el Informe del Estado del Ambiente Panamá 2019, este fenómeno está produciéndose en los tramos bajos de las cuencas más urbanizadas. Debido a la falta de estudios de eutrofización y en búsqueda de brindar soluciones preventivas a este problema, el propósito de esta investigación fue evaluar la capacidad de remoción de fosfato de la *Salvinia minima* mediante un sistema de humedales artificiales y proponerlo como una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Se efectuaron análisis fisicoquímicos durante 13 días, evaluando diversos parámetros como la concentración, pH, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica de las muestras de agua con diferentes concentraciones de fosfato. Se encontró que el porcentaje de remoción fue de 10.60%, 26.09%, 18.33%, y 25.81% para los biorreactores con concentraciones de 3.5 mg/L, 7.0 mg/L, 10.5 mg/L y 14.0 mg/L de fosfato respectivamente. De acuerdo con los resultados, la aplicación de humedales artificiales con *Salvinia minima* demostró ser adecuada en el proceso de fitorremediación de aguas contaminadas por este nutriente. Se recomienda realizar más estudios de este tipo con concentraciones mayores que las trabajadas en esta investigación.

Palabras clave. Eutrofización, fitorremediación, fosfato, helecho acuático, humedales, *Salvinia minima*.

Abstract. The excessive increase of phosphate ($\text{PO}_4^{3-} > 0.10 \text{ mg/L}$) in surface and groundwater bodies leads to problems such as eutrophication, a consequence of the direct or indirect discharge of industrial, agricultural and domestic discharges, which results in a negative effect on water quality, putting the health and integrity of ecosystems at risk. According to the 2019 Panama State of the Environment Report, this phenomenon is occurring in the lower reaches of the most urbanized basins. Due to the lack of eutrophication studies and in search of providing preventive solutions to this problem, the purpose of this research was to evaluate the removal capacity of the phosphate of *Salvinia minima* through a system of artificial wetlands and propose it as a sustainable alternative for wastewater treatment. Physicochemical analyzes were carried out for 13 days, evaluating various parameters such as concentration, pH, total dissolved solids and electrical conductivity of the water samples with different concentrations of phosphate. It was found that the removal percentage was 10.60%, 26.09%, 18.33%, and 25.81% for the bioreactors with concentrations of 3.5 mg/L, 7.0 mg/L, 10.5 mg/L and 14.0 mg/L of phosphate respectively. According to the results, the application of artificial wetlands with *Salvinia minima* proved to be adequate in the phytoremediation process of water contaminated by this nutrient. It is recommended to carry out more studies of this type with higher concentrations than those studied in this investigation.

Keywords. Eutrophication, phytoremediation, phosphate, water fern, wetlands, *Salvinia minima*.

1. Introducción

Los ecosistemas acuáticos realizan funciones ecológicas básicas al reciclar y purificar el agua que reciben. Estos ecosistemas son alterados, en mayor o menor medida, ya sea por el vertido directo de efluentes industriales y domésticos (ej. efluentes de frigoríficos, actividad ganadera y ciudades) o como aporte indirecto (ej. fertilizantes aportados por escorrentía de campos agrícolas, rellenos sanitarios y vertederos). En general, estas actividades producen un aumento en el aporte de nutrientes a los cuerpos de agua, lo que resulta en un efecto negativo en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, amenazando la salud pública y la integridad de los ecosistemas [1].

El fósforo es un nutriente que forma parte natural de los ecosistemas acuáticos. Este apoya el crecimiento de algas y plantas acuáticas, que proporcionan alimento y hábitat para peces, mariscos y organismos más pequeños que viven en el agua [2]. Principalmente, el fósforo en agua se encuentra en forma inorgánica formando el anión fosfato [3].

El fosfato (PO_4^{3-}) es usado en grandes cantidades en la producción de detergentes y demás productos para la limpieza, también se encuentran en las excreciones animales y humanas, así como en algunos fertilizantes [3]. Sin embargo, cuando entra una cantidad excesiva de fosfato en el cuerpo de agua ($\text{PO}_4^{3-} > 0.10 \text{ mg/L}$) [4], generado por una amplia gama de actividades antropogénicas, puede llegar a contaminar este medio [2].

Ese exceso de nutrientes en el agua se define como eutrofización. Este proceso termina causando un trastorno tanto en el equilibrio de los organismos acuáticos como en la calidad del agua provocando fuertes impactos económicos, ecológicos y sanitarios [3], [5].

De acuerdo con el Informe del Estado del Ambiente Panamá 2019, el fenómeno de eutrofización ya está produciéndose en los tramos bajos de las cuencas más urbanizadas, en donde las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) descargan directamente el efluente. Se ha estudiado que las PTAR bajan la carga contaminante de las aguas residuales, pero no la eliminan completamente [6].

Para hacer frente a esta problemática se requiere disminuir las cantidades de nutrientes en los medios acuáticos proveniente de las aguas residuales, en virtud de lo cual en los últimos años gran atención se ha brindado al estudio de técnicas de remediación como la absorción para reducir la concentración de fosfatos.

Una alternativa sostenible para reducir la cantidad de fosfatos es la construcción de humedales artificiales que contengan plantas acuáticas con capacidades fitorremediadoras para el tratamiento de efluentes domésticos e industriales, la cual se ha ido desarrollando rápidamente a lo largo de las últimas décadas y, actualmente, representa un método de tratamiento aceptado y cada vez más común [7].

La fitorremediación es una alternativa emergente, que representa un menor costo, captura gases de efecto invernadero, utiliza energía solar y tiene una gran aplicabilidad bajo diferentes rangos de concentración de contaminantes [8].

Entre las plantas que se pueden utilizar se escogió a la *Salvinia minima*, debido a que es una especie que se puede encontrar ampliamente distribuida en América Central y del Norte. Esta especie prefiere zonas ricas en nutrientes y una temperatura tropical dentro de un rango de 22°C a 43°C , y un pH ligeramente ácido (6.5) a ligeramente alcalino (7.5), por lo cual se considera una planta de fácil reproducción [9].

En Panamá no se han encontrado evidencias de estudios sobre el uso de esta especie para fitorremediar el fosfato; sin embargo, la *Salvinia minima* ha mostrado su eficiencia en la remoción de fósforo [7], por lo cual podría resultar recomendable para el tratamiento de efluentes con exceso de fosfato en humedales artificiales o naturales.

Debido a la falta de estudios de eutrofización y en búsqueda de brindar soluciones preventivas a este problema, el presente artículo tiene como objetivo la evaluación de la capacidad de remoción de la *Salvinia minima*, con miras a que en futuros estudios se puedan construir humedales artificiales en continuo para la remoción de diferentes concentraciones de fosfato.

Este proyecto contribuye en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como, por ejemplo, garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos (ODS 6).

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño experimental

Se estudió un sistema diseñado por Mustafa y Hayder [10]; realizando ciertos ajustes en el proceso, como la preparación del agua sintética con concentraciones de PO_4^{3-} , tiempo de aclimatación de las plantas (un día), y el tiempo de retención (13 días).

Para realizar este estudio se prepararon concentraciones de 3.5 mg/L, 7.0 mg/L, 10.5 mg/L y 14.0 mg/L de PO_4^{3-} , seleccionando el compuesto fosfato monopotásico (KH_2PO_4) para obtener estas concentraciones en un medio acuoso.

Este ensayo se realizó en el invernadero de la universidad en un periodo de 13 días, registrando lectura de los parámetros de concentración, pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT).

2.2 Área de estudio

El proyecto se llevó a cabo en el invernadero de las áreas verdes del Campus Dr. Víctor Levi Sasso de la Universidad Tecnológica de Panamá (9°1'13"N, 79°32'1"W) (figura 1).

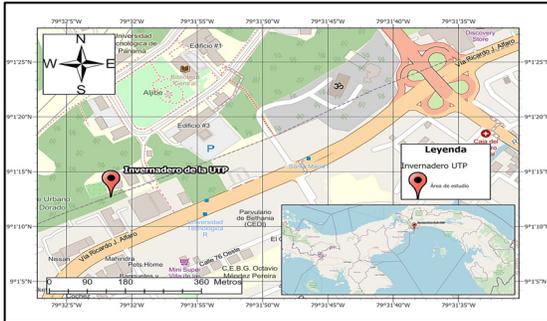


Figura 1. Ubicación del invernadero de las áreas verdes de la UTP (9°1' 13"N, 79°32'1" W) (mayo 3, 2022).

2.3 Materiales y equipos

Para la realización de este proyecto se utilizaron los siguientes materiales y equipos (figura 2):

- 10 recipientes plásticos: 8 recipientes de 8 L y 2 recipientes de 5 L de capacidad.
- Helechos de agua (*Salvinia minima*).
- 46 L de agua.
- 250 g de fosfato monopotásico (KH_2PO_4).
- Probeta graduada de 1000 ml.
- Declorinador (a base de tiosulfato de sodio).
- Balanza analítica OHAUS-Pioneer.
- Vaso químico de 200 ml.
- Pipeta.
- Matraz volumétrico de 50 ml.
- Espectrofotómetro HACH – DR/2010.
- Reactivos Fosfato PhosVer[®]3.
- pHmetro y conductímetro.



Figura 2. Materiales y equipos utilizados para la realización de los ensayos.

2.4 Procedimiento

2.4.1 Preparación y colocación de las muestras en el área de estudio

- Se llenaron los recipientes de 8 y 5 L previamente identificados, con 5 y 3 L de agua respectivamente.

- Luego se añadió 4 gotas del decolorinador por cada litro de agua y se dejó reposar en un lapso de 2 horas.
- Posteriormente se pesó con la balanza analítica, las muestras de KH_2PO_4 a utilizar.
- En cuatro de los recipientes con 5 litros de agua se distribuyeron masas de 25 mg, 50 mg, 75 mg y 100 mg de KH_2PO_4 . Este paso se replicó en los cuatro recipientes restantes.
- Luego se colocó en los ocho recipientes la *S. minima*.
- Los dos recipientes con 3 litros de agua se establecieron como los controles. Uno se dejó con agua decolorinada y la *S. minima* (control biótico). En el otro se agregó una masa de 30 mg de KH_2PO_4 al agua decolorinada (control abiótico).
- Se dejaron los biorreactores en condiciones óptimas de dentro del invernadero (figura 3).



Figura 3. Colocación de los biorreactores en el área de estudio.

2.4.2 Ensayos experimentales en el laboratorio

- Se midieron las primeras muestras 24 horas después de mezclar el compuesto en agua, estableciendo estas medidas como las del día cero.
- Se extrajo con recipientes esterilizados, 80 ml de agua por biorreactor, y se llevó al Laboratorio de Sanitaria de la Facultad (figura 4a).
- Dentro del laboratorio, primeramente, se lavó completamente todas las cristalerías a utilizar con jabón libre de fosfato (alconox), para no alterar las muestras.
- Para realizar las mediciones de concentración de PO_4^{3-} se cumplió con el procedimiento establecido de acuerdo con el método HACH – DR/2010 (figura 4b y 4c).
 - Si las concentraciones superaban el rango de lectura del espectrofotómetro (0 mg/L a 2.5 mg/L), se procedía a diluir las muestras.
- Para tomar las lecturas de los parámetros de pH (figura 4d y 4e), conductividad y sólidos disueltos (figura 4f), se siguieron los procedimientos establecidos en el "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition" [11].
- Las muestras extraídas de los biorreactores fueron analizadas durante los 13 días que duró el experimento,

realizando un total de cinco mediciones, dos días cada semana (martes y jueves).

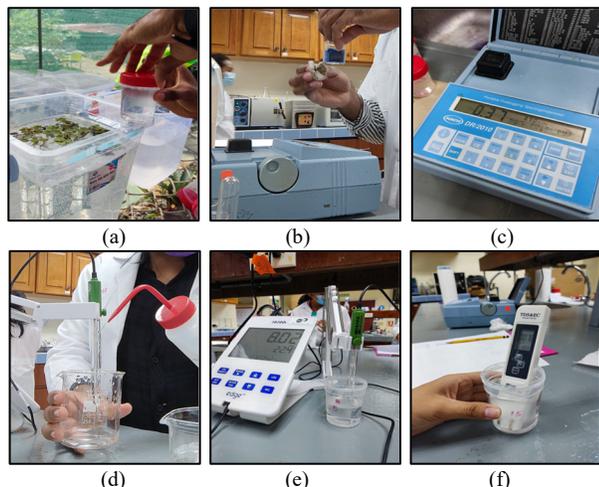


Figura 4. Procedimiento para el desarrollo del ensayo en el laboratorio. a) Extracción de la muestra. b) Colocación de la celda con reactivo en el espectrofotómetro. c) Lectura de la concentración de fosfato con el espectrofotómetro. d) Limpieza del electrodo del pHmetro. e) Lectura del pH de las muestras analizadas. f) Lectura de CE y SDT con el conductímetro.

3. Resultados y discusión

En la tabla 1 se muestran los resultados de laboratorio que se obtuvieron de los parámetros medidos para cada biorreactor con concentraciones diferente de PO_4^{3-} .

Tabla 1. Resultados obtenidos para cada concentración de fosfato estudiada

| | Día | Concentración (mg/L) | pH | SDT (ppm) | CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) |
|-----------|-----|----------------------|------|-----------|--------------------------------|
| 3.5 mg/L | 0 | 2.60 | 6.77 | 60 | 119 |
| | 1 | 2.58 | 7.94 | 60 | 119 |
| | 6 | 2.43 | 7.73 | 60 | 119 |
| | 8 | 2.35 | 7.60 | 47 | 93 |
| | 13 | 2.32 | 7.61 | 47 | 93 |
| 7.0 mg/L | 0 | 11.50 | 6.84 | 72 | 144 |
| | 1 | 7.00 | 6.79 | 73 | 146 |
| | 6 | 5.50 | 7.78 | 76 | 144 |
| | 8 | 11.50 | 7.49 | 81 | 162 |
| | 13 | 8.5 | 7.34 | 81 | 162 |
| 10.5 mg/L | 0 | 15.00 | 6.78 | 75 | 150 |
| | 1 | 9.00 | 6.75 | 76 | 152 |
| | 6 | 9.25 | 7.76 | 76 | 152 |
| | 8 | 10.25 | 7.60 | 81 | 162 |
| | 13 | 12.25 | 7.34 | 81 | 162 |
| 14.0 mg/L | 0 | 15.50 | 6.85 | 76 | 152 |
| | 1 | 8.50 | 6.86 | 76 | 152 |
| | 6 | 11.00 | 7.22 | 76 | 152 |
| | 8 | 11.00 | 7.57 | 82 | 164 |
| | 13 | 11.50 | 7.58 | 84 | 168 |

3.1 Análisis de la concentración de fosfato para cada biorreactor

En la figura 5 se muestra gráficamente las variaciones del comportamiento que ha tenido cada biorreactor en la absorción de fosfato dependiendo de la concentración estudiada, a una temperatura entre 27°C a 31°C.

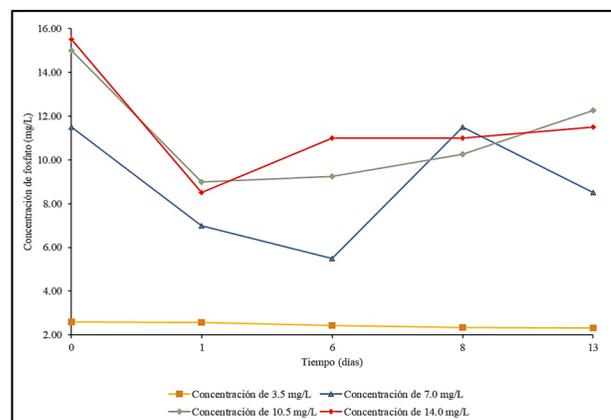


Figura 5. Comportamiento de la concentración de fosfato a través del tiempo, en los diferentes biorreactores.

En la figura 5 se puede observar que el biorreactor con concentración de 3.5 mg/L tuvo una disminución paulatina a medida que pasaba el intervalo de 13 días, por lo que al finalizar el estudio se determinó que el porcentaje de reducción fue de 10.60%.

El biorreactor de 7.0 mg/L en el día seis alcanzó una máxima reducción de 52.17%. En el día ocho la planta atraviesa (como primera hipótesis) por un proceso de desabsorción, cabe resaltar que se observó un cambio físico en algunas de sus hojas (marchitación). Al final del experimento se pudo estimar que la planta absorbió un 26.09% del total de la concentración inicial.

Comparando los resultados señalados en el párrafo anterior con el estudio de Mustafa y Hayder [10], donde se estudiaba a la *Salvinia molesta*, se encontró que a una concentración inicial de 6.8 mg/L en un sistema con un tiempo de retención hidráulica de 6 horas, la planta redujo a un 32.04% la concentración de PO_4^{3-} en un intervalo de 14 días.

Se puede observar en el biorreactor con concentración de 10.5 mg/L que el máximo valor de reducción (40.00%) ocurrió en el día uno. A partir del día uno hasta el último día de medición (día 13), se notó un aumento de 26.53% en la concentración. Este fenómeno se pudo deber (como segunda hipótesis) al proceso de intercambio de gases que tuvo la planta con el ambiente exterior; donde esta pudo captar gases que provocaran el aumento de PO_4^{3-} . Finalizado el estudio se encontró una remoción de 18.33% con respecto a la concentración inicial.

El biorreactor con concentración de 14.0 mg/L, mostró un valor mínimo de 8.50 mg/L de PO_4^{3-} lo que representa una máxima absorción de 45.16% en el día uno. En el día seis la concentración del nutriente incrementó un 22.73%, donde este aumento pudo ser causado (como tercera hipótesis) por la disminución del agua en los biorreactores, debido a la evaporación y extracciones periódicas de las muestras. Terminado el estudio se determinó que la reducción total de PO_4^{3-} fue de 25.81%.

3.2 Relación de la concentración de fosfato con el pH

En la figura 6, se puede observar que todos los biorreactores inicialmente (día 0) se encontraban en un rango de pH levemente ácido (6.77-6.85).

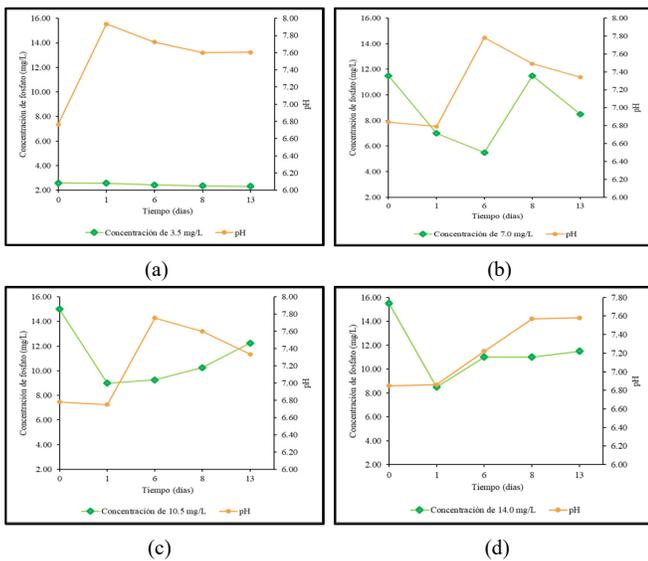


Figura 6. Comparación de la concentración de fosfato y el pH en un medio de (a) 3.5 mg/L, (b) 7.0 mg/L, (c) 10.5 mg/L, (d) 14.0 mg/L.

En días posteriores se puede ver (figura 6a, 6b, 6c y 6d) que la relación entre las concentraciones de PO_4^{3-} absorbidas por la *S. minima* y el pH es inversamente proporcional, ya que, aumentaron los valores de pH (7.34-7.61) con la disminución de PO_4^{3-} para el último día de medición (día 13).

En un estudio realizado por Rezania et al. [12], donde utilizaron *E. crassipes* para eliminar los nutrientes presentes en las aguas residuales, se obtuvo que esta planta mostró una reducción de pH (de 6-7 a 5-6), a diferencia de los resultados obtenidos en este estudio, donde la absorción de PO_4^{3-} por parte de la *S. minima*, ha llevado a un aumento en los niveles de pH (de 6.77-6.85 a 7.34-7.61) donde se puede afirmar que se encontraba en el rango óptimo de pH para realizar la fitorremediación [9].

3.3 Relación de la concentración de fosfato con los sólidos disueltos totales (SDT)

Con base a los resultados presentados en la tabla 1, los SDT aumentan a medida que las concentraciones disminuyen, lo que demuestra una relación inversamente proporcional.

De acuerdo con el análisis realizado, se observó que en el día 13 se presentó un valor más alto de SDT (84 ppm) para la concentración de 14.0 mg/L de PO_4^{3-} , este aumento puede explicarse en parte por la liberación de la materia orgánica por la *S. minima*. También se observó que la concentración de 3.5 mg/L de PO_4^{3-} tuvo un comportamiento diferente. Los valores de SDT se mantuvieron constante durante los primeros seis días del ensayo y a partir del sexto día hubo una disminución de 60 ppm a 47 ppm de SDT.

3.4 Relación de la concentración de fosfato con la conductividad eléctrica

En la tabla 1, se muestra que la CE aumenta a medida que las concentraciones disminúan. Los resultados presentados demostraron que las concentraciones de PO_4^{3-} son inversamente proporcionales a la CE, excepto para la concentración de 3.5 mg/L de PO_4^{3-} que presentó una disminución entre los días 6-8. Del mismo modo, se observó que la CE tiene un comportamiento similar a los SDT, esto se debe a que ambos parámetros son directamente proporcionales.

3.5 Cinética de absorción

En la figura 7 se aprecia la curva de velocidad de absorción que tuvo la *S. minima* dentro de los 13 días de estudio.

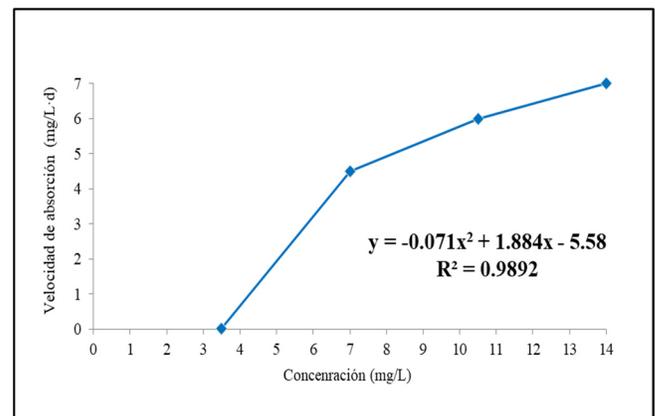


Figura 7. Concentración en función de la velocidad de absorción.

La velocidad de absorción de esta especie se correlaciona con la concentración de fosfato en un 98.92% con la ecuación 1:

$$v = -0.071c^2 + 1.884c - 5.58 \quad (1)$$

Donde v es la velocidad de absorción de la planta (mg/L*d) y c es la concentración inicial de fosfato (mg/L).

La cinética de absorción de contaminantes dentro del metabolismo de las plantas se realiza por procesos de fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización, fitodegradación, rizofiltración y fitoestimulación y estos procesos son acompañados por los mecanismos de absorción, excreción y desintoxicación de contaminantes en la planta [13].

Es importante resaltar que la cinética que se presenta en la figura 7 podría ser una cinética indirecta ya que las pruebas se realizaron en el agua y no directamente en las plantas, por lo que podrían existir también cinéticas de otros microorganismos como las bacterias.

3.6 Estudios realizados con diferentes plantas acuáticas para la remoción de fosfato

En la tabla 2, se puede apreciar que de acuerdo con los resultados de Kalankesh [14], trabajando con *Phragmites*

australis a una concentración inicial de 6.63 mg/L, que el porcentaje de reducción en la concentración de PO_4^{3-} fue de 94.4% en 10 días, sin embargo, si se compara con los resultados obtenidos de este estudio con una concentración de 7.0 mg/L (>0.37 mg/L), se puede ver que la *S. minima* presenta un porcentaje de remoción de 26.09% en un término de 13 días.

Con base en los resultados obtenidos por Ceschin [15], con *Lemna minor* a una concentración inicial de 9.0 mg/L en un periodo de 21 días, el porcentaje de reducción de PO_4^{3-} fue del 70.0%, comparando con el presente estudio a una concentración 10.5 mg/L (>1.5 mg/L), se puede observar que la remoción eficiente de la *Salvinia minima* fue de 18.33%.

Según Córdova y Díaz [16] y su estudio con *Chrysopogon zizanioides* con una concentración inicial de 1.15 mg/L de PO_4^{3-} , demostró que el porcentaje de remoción fue de 26.09% en un intervalo de 10 días, comparada con la concentración inicial de 3.5 mg/L (>2.35 mg/L) de nuestro estudio que fue de 10.60% de remoción.

Así mismo, se puede ver como otros autores (Alfaro y Arellano, Rezanía et al.) estudiaron concentraciones de PO_4^{3-} más bajas utilizando *Eichhornia crassipes*, *Typha angustifolia* y *Cyperus rotundus* por un periodo de 12 y 14 días, obtuvieron porcentajes de remoción diferente a los de este estudio [17], [12].

Tabla 2. Estudios sobre fitorremediación de aguas contaminadas con fosfato

| Especie | Concentración inicial (mg/L) | Porcentaje de remoción | Duración del ensayo | Referencia |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| <i>Salvinia minima</i> | 3.5 | 10.60% | 13 días | El presente estudio |
| | 7.0 | 26.09% | | |
| | 10.5 | 18.33% | | |
| | 14.0 | 25.81% | | |
| <i>Chrysopogon zizanioides</i> | 1.15 | 26.09% | 10 días | [16] |
| <i>Pistia stratiotes</i> | 6.8 | 34.28% | 14 días | [10] |
| <i>Salvinia molesta</i> | | 32.04% | | |
| <i>Eichhornia crassipes</i> | | 48.7% | | |
| <i>Lemna minuta</i> | 9.0 | 62.0% | 21 días | [15] |
| <i>Lemna minor</i> | | 70.0% | | |
| <i>Louis latifolia</i> | 6.63 | 64.0% | 10 días | [14] |
| <i>Phragmites australis</i> | | 94.4% | | |
| <i>Eichhornia crassipes</i> | 1.003 | 9.57% | 14 días | [17] |
| <i>Typha angustifolia</i> | | 6.78% | | |
| <i>Cyperus rotundus</i> | | 4.39% | | |
| <i>Eichhornia crassipes</i> | 0.53 | 45.0% | 12 días | [12] |

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos se concluye que la *S. minima* demostró ser adecuada en el proceso de fitorremediación de aguas contaminadas con fosfato, logrando un porcentaje de remoción de 10.60% a 25.81%, aunado la reducción de los valores de acidez en el pH durante los 13 días de estudio.

El motor para realizar esta investigación fue la necesidad de encontrar soluciones preventivas al problema de la eutrofización, brindando nuevos conocimientos útiles para la mejora de calidad del agua y conservación de la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos.

La principal ventaja de la implementación de esta tecnología de tratamiento es su potencial de contribuir al desarrollo sostenible, junto a su bajo costo y eficiencia, a diferencia de otros métodos de tratamiento convencionales.

La aplicación de esta planta debe llevarse a cabo bajo condiciones estrictamente controladas, ya que esta es reconocida como una especie invasora, pero de gran aporte si se usa de manera adecuada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores en primer lugar dan gracias a Dios, por brindarles salud, sabiduría y fortaleza para el desarrollo de este proyecto. Al Técnico Agustín Ábrego y personal de las áreas verdes de la UTP, por su valorable apoyo en el invernadero. Al Investigador José Ulises Jiménez del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, por facilitar información acerca de las características de plantas acuáticas. Al biólogo Carlos Nieto, por aportar sus conocimientos para el fortalecimiento de la interpretación de los resultados. Al Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería Civil de la UTP, por albergar esta investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] J. Li, Q. Jin, Y. Liang, J. Geng, J. Xia, H. Chen y M. Yun, «Highly Efficient Removal of Nitrate and Phosphate to Control Eutrophication by the Dielectrophoresis-Assisted,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, 2022.
- [2] EPA, «Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos,» 31 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/nutrientpollution/issue>. [Último acceso: 26 Mayo 2022].
- [3] K. Cusi y M. Vargas, «Revisión Sistemática: Disminución de Fosfatos en Cuerpos de Agua para Reducir la Eutrofización,» 2021. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/72875>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [4] A. O. Fadiran, S. C. Dlamini y A. Mavuso, «A comparative study of the phosphate levels in some surface and ground water bodies of Swaziland,» *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, vol. 22, n° 2, pp. 197-206, 2008.
- [5] T. Ferrando, «“Uso de Zeolitas para la reducción de fosfatos en el agua”,» 2020. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/158439>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [6] Ministerio de Ambiente, «GEO Panamá 2019 : Informe del estado del ambiente,» Editora Novo Art, S.A., Panamá, 2019.
- [7] L. de Cabo, M. V. Casares y R. Seoane, «Interacción entre *Salvinia Minima* y *Lemma gibba*: Efecto sobre el crecimiento en distintos medios de cultivo,» *Biología Acuática*, n° 26, pp. 63-70, 2019.
- [8] D. G. Guio y J. D. Toscano, «Fitorremediación en humedal artificial con *Eichhornia Crassipes* para remoción de materia orgánica en muestra de agua del canal Albina en Bogotá,» 2018. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/3417..> [Último acceso: Mayo 2022].
- [9] G. A. Carrillo, «Evaluación de *Salvinia minima* Baker como potencial acumuladora de Cu y Zn de agua residual porcina: efectos fisiológicos, morfológicos, y de crecimiento,» 2017. [En línea]. Available: https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/433/1/PCB_RN_M_Tesis_2017_Carrillo_%20Gerardo.pdf. [Último acceso: Mayo 2022].
- [10] H. Mustafa y G. Hayder, «Performance of *Pistia stratiotes*, *Salvinia molesta* and *Eichhornia crassipes* Aquatic Plants in the Tertiary Treatment of Domestic Wastewater with Varying Retention Times,» *Applied sciences*, vol. 10, 2020.
- [11] R. Baird, A. Eaton y E. Rice, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- [12] S. Rezanian, M. Ponraj, M. Din, S. Chelliapan y F. Sairan, «Effectiveness of *Eichhornia crassipes* in nutrient removal from domestic wastewater based on its optimal growth rate,» *Desalination and Water Treatment*, vol. 5, pp. 360-365, 2014.
- [13] E. Coyago y S. Bonilla, «Cinética de absorción de plomo en especies vegetativas previo a procesos de fitorremediación de suelos altamente contaminados,» *Alfa*, vol. 3, n° 7, pp. 47-58, 2019.

- [14] L. Kalankesh, S. Rodríguez-Couto, Y. Shahamat y H. Asgarnia, «Removal efficiency of nitrate, phosphate, fecal and total coliforms by horizontal subsurface flow-constructed wetland from domestic wastewater,» *Environmental Health Engineering and Management Journal*, vol. 6, n° 2, pp. 105-111, 2019.
- [15] S. Ceschin, M. Crescenzi y M. Lannelli, «Phytoremediation potential of the duckweeds *Lemna minuta* and *Lemna minor* to remove nutrients from treated waters,» *Environmental Science and Pollution Research*, 2020.
- [16] O. Córdova García y J. L. Díaz López, «Fitotratamiento del agua de la quebrada Indañe con *Chrysopogon zizanioides* en un humedal artificial para nitratos y fosfatos, Moyobamba, 2020,» Repositorio de la Universidad César Vallejo, 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/68227>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [17] K. Alfaro Pereda y C. Arellano Zapata, «Remoción de nitritos y fosfatos en humedales artificiales empleando tres tipos de plantas acuáticas a nivel de laboratorio,» Repositorio de la universidad César Vallejo, 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/38993>. [Último acceso: Mayo 2022].