

DIVERSIFICACIÓN DE USO Y MANEJO SOSTENIBLE DE LIRIO ACUÁTICO

Aguilar-Rivera Noé¹, Torres Eduardo^{2*}

¹Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana. Córdoba Ver.

²Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 Sur Ciudad Universitaria C. P. 72570 Puebla, Puebla. México

*Autor de correspondencia: eduardo.torres@correo.buap.mx

RESUMEN

Lirio acuático, es la principal maleza invasiva presente en lagos, presas, ríos y cuerpos de agua. Llegó a México al finalizar el siglo XIX del río del Amazonas y se extendió rápidamente debido a condiciones climáticas similares. Es una planta acuática de gran resiliencia que a la fecha es un problema de amplitud nacional debido a los impactos que genera al modificar ecosistemas acuáticos, rutas marítimas y turísticas y las actividades económicas pesqueras, por lo que el objetivo de este trabajo fue analizar las posibles opciones tecnológicas a implementar, con el marco de la bioeconomía circular, para su uso en áreas como bioenergético, alimentación pecuaria, productos para la agricultura y biorefinerías. Se empleo la técnica de análisis bibliométrico con la base de datos scopus. Se determino que esta maleza posee gran potencial para el uso sostenible en bioproductos y a la vez como opción más rentable para el manejo de su biomasa

Palabras clave: Maleza acuática, Bioproductos, Análisis bibliométrico

ABSTRACT

Water hyacinth is the main invasive weed present in lakes, dams, rivers, and bodies of water. It arrived in Mexico at the end of the 19th century from the Amazon River and spread rapidly due to similar climatic conditions. It is a highly resilient aquatic plant that to date is a nationwide problem due to the impacts it generates by modifying aquatic ecosystems, maritime and tourist routes, and fishing economic activities, so the objective of this work was to analyze the possible technological options to

implement, within the framework of the circular bioeconomy, for its use in areas such as bioenergy, livestock feed, agricultural products, and biorefineries. The bibliometric analysis technique was used with the Scopus database. It was determined that this weed has great potential for sustainable use in bioproducts and at the same time is the most profitable option for the management of its biomass.

Keywords: *Aquatic weed, Bioproducts, Bibliometric analysis.*

INTRODUCCIÓN

El lirio acuático o jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), una planta hidrófita flotante de la familia Pontederiaceae, representa un desafío global al ser considerado un invasor agresivo de difícil manejo sostenible. Sin embargo, su extraordinaria capacidad para absorber nutrientes disueltos, contaminantes, residuos de fertilizantes y metales pesados directamente del agua lo convierte en una especie prometedora para la fitorremediación. Ante esta dualidad, académicos, empresarios y gobiernos exploran soluciones tecnológicas innovadoras con múltiples objetivos: controlar su proliferación, implementar limpiezas periódicas efectivas y transformar la planta o sus componentes en productos útiles, aprovechando así su potencial para el tratamiento de aguas residuales mientras se mitiga su impacto invasivo. (Madikizela, 2021).

Las revisiones sistemáticas de Nandiyanto et al. (2024) y Bajpai y Nemade (2023) evidencian que existe un sólido respaldo científico sobre el aprovechamiento del lirio acuático, pese a su naturaleza invasora, para la generación de productos de valor. La investigación global demuestra que esta especie ofrece soluciones prometedoras para desafíos contemporáneos en tres áreas críticas: seguridad alimentaria, producción energética y gestión ambiental, particularmente en el tratamiento de aguas residuales. Además, la diversidad de aproximaciones tecnológicas documentadas sienta las bases para futuras innovaciones en su aprovechamiento sostenible.

Por su parte la revisión de Madhumidha et al. (2024) demostró el potencial de utilizar lirio acuático para la restauración ambiental para promover la renovabilidad y la sostenibilidad. Con relación a la viabilidad técnica de utilizar lirio acuático para numerosos propósitos, la mayoría de los estudios se han realizado a nivel de laboratorio y actualmente hay muy pocos productos comercializables o innovaciones basadas

en lirio acuático. A pesar de estas estrategias, todavía existe una cantidad significativa de restricciones financieras que podrían ofrecer mayores retornos socioeconómicos al considerar los beneficios ambientales y sociales de la industrialización de esta maleza.

Lirio acuático como especie invasora

El lirio acuático es una especie de rápido crecimiento con tasas de reproducción superior a las 1 400 toneladas por hectárea y de hasta el 201% en 7 días, y sus semillas pueden permanecer latentes hasta 15 años. Está clasificado como una de las malezas más agresivas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (Xu et al. 2016). Como especie invasora, el lirio se produce en grandes cantidades, aproximadamente 5,6 millones de toneladas mensuales pueden ser generadas. Las plantas de lirios crecen hasta alcanzar volúmenes extremadamente densos que superan los 60 kg m², obstruyendo gravemente las masas de agua. La altura máxima del lirio es de 1 m, aunque lo más frecuente es una altura de 40 cm. Debido a este tamaño absorbe la luz solar, limitando la vida marina de suministros ambientales notable oxígeno de la atmósfera. De acuerdo con Nega et al. (2024), el lirio acuático tiene una capacidad invasiva excepcional que le permite duplicar su cobertura cada 13 días y generar entre 140 y 350 toneladas de peso seco por hectárea al año, superando a la vegetación nativa. Esta especie exhibe una notable adaptabilidad y resiliencia ante condiciones ambientales extremas, tolerando amplias variaciones de temperatura, salinidad y pH. Su distribución abarca diversos cuerpos de agua dulce (lagos, canales, presas y ríos) en regiones tropicales y subtropicales cercanas al Ecuador, prosperando desde el nivel del mar hasta los 2 250 metros de altitud.

Los impactos de esta invasión son múltiples y severos. En el ámbito ecológico, reduce la biodiversidad acuática autóctona y deteriora el funcionamiento del ecosistema acuático y sus servicios. Las densas colonias de lirio bloquean la entrada de luz solar y reducen los niveles de oxígeno, afectando directamente a las poblaciones de peces. Además, estas formaciones vegetales propician el incremento de vectores de enfermedades transmitidas por mosquitos y moscas. En el aspecto socioeconómico, la proliferación del lirio acuático afecta la generación de energía hidroeléctrica, obstaculiza el transporte fluvial al forzar modificaciones en las rutas de navegación y pesca, bloquea sistemas de riego y redes

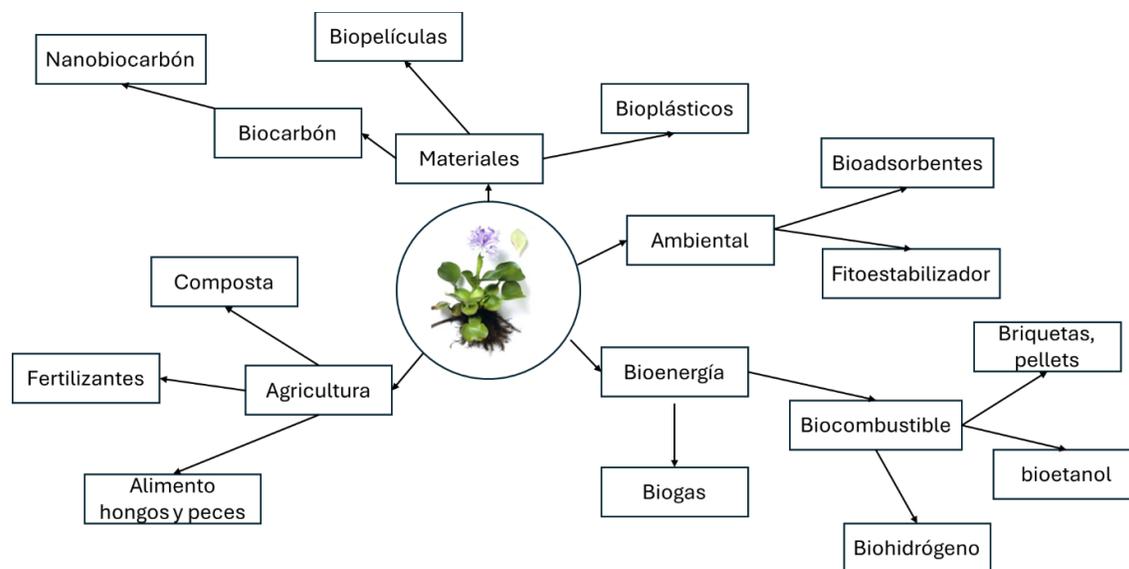
hidráulicas, y acelera la evaporación del agua. Estas alteraciones impactan severamente la vida de las comunidades locales, incluyendo sus actividades turísticas y recreativas en embalses y presas, comprometiendo así el bienestar social de las poblaciones aledañas a los cuerpos de agua afectados.

Para mitigar los efectos de la infestación del lirio acuático en los cuerpos de agua, se emplean diversos métodos de control: mecánicos, manuales (como la trituración y hundimiento), químicos (mediante herbicidas) y biológicos. Sin embargo, debido a las características particulares de esta planta acuática, ninguno de estos métodos ha logrado resolver completamente el problema. El control biológico se destaca como el método más eficiente y ambientalmente seguro, especialmente cuando se buscan resultados sostenibles a largo plazo. Por otro lado, aunque los controles mecánico y químico proporcionan resultados rápidos a corto plazo, pueden comprometer gravemente las condiciones ecológicas de los cuerpos de agua (De Carvalho et al. 2019).

Ante esta situación, se ha planteado un enfoque dual que busca no solo controlar la proliferación del lirio acuático, sino también aprovechar su biomasa de manera sostenible. El objetivo principal es desarrollar innovaciones tecnológicas que permitan tanto su control efectivo como su transformación en productos de valor agregado (Gómez et al. 2024). Islam et al. (2021) señalan que, a nivel mundial, se han realizado importantes investigaciones para encontrar usos alternativos a esta planta invasora. Entre las aplicaciones más prometedoras destacan: la producción de biogás, alimento pecuario, fertilizantes verdes, composta, biocombustibles (sólidos, líquidos y gaseosos), biopelículas biodegradables y bioplásticos. Además, se ha explorado su uso como sustrato para el cultivo de hongos y en la síntesis de biocarbón y nanobiocarbón, adaptando diferentes niveles de intervención tecnológica (Figura 1).

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es informar las opciones tecnológicas para valorizar el lirio acuático, basado en un estudio bibliométrico, analizando y presentando de manera clara y accesible las tendencias y avances en la investigación científica y tecnológica relacionada con el aprovechamiento de esta planta acuática.

Figura 1. Aplicaciones y productos potenciales del lirio acuático



Fuente: elaboración propia.

METODOLOGÍA

La exploración de opciones tecnológicas para el aprovechamiento del lirio acuático se realizó mediante un análisis bibliométrico. Se consultó la base de datos Scopus para recopilar publicaciones académicas de los últimos 20 años, utilizando como término de búsqueda principal "water hyacinth" y aplicando un filtro para documentos en inglés. Los patrones de co-ocurrencia de palabras clave relacionadas con esta especie se analizaron y visualizaron mediante el software VOSviewer.

RESULTADOS

La nube de palabras del jacinto de agua muestra una amplia gama de áreas de estudio relacionadas con esta planta acuática (Figura 2). Los colores nos ayudan a visualizar estas áreas y a comprender mejor la complejidad del tema, que abarca desde el impacto ambiental negativo hasta el potencial de uso en la biorremediación y la producción de bioenergía. El turquesa se centra en la planta en sí, sus

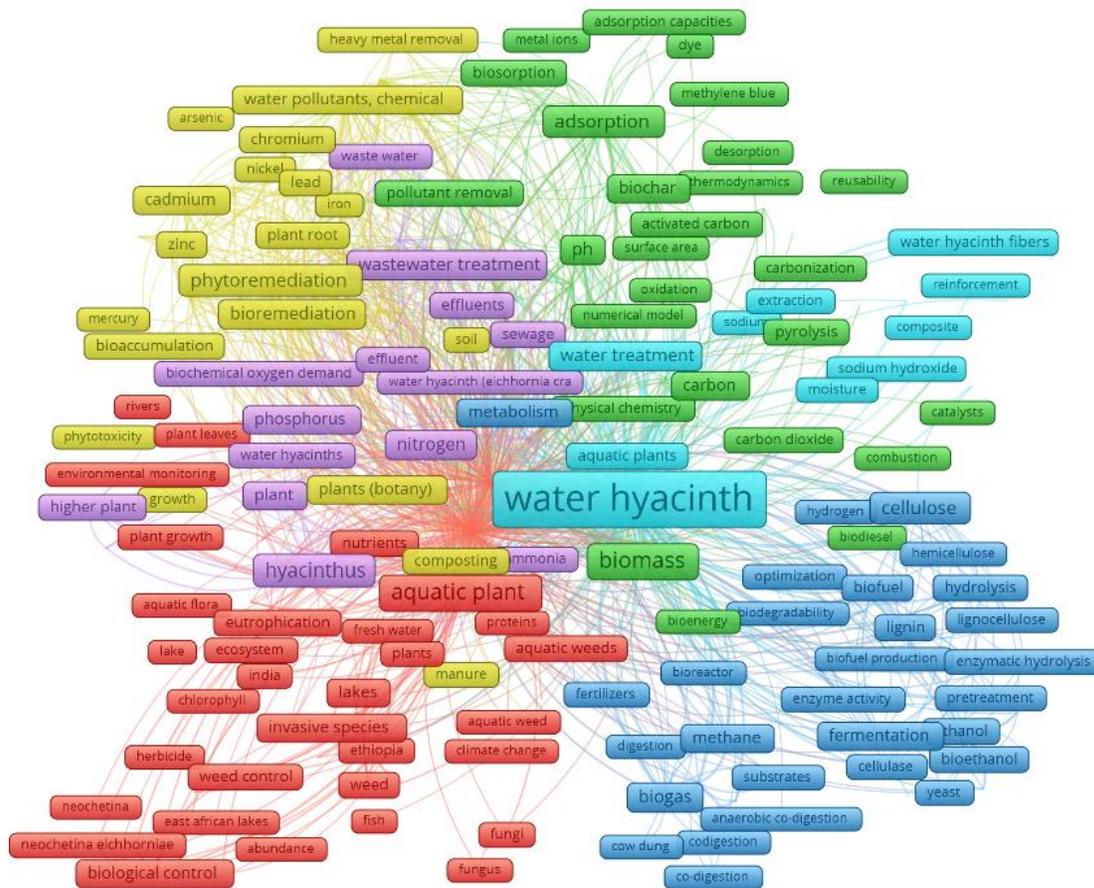
características y su papel en el ecosistema acuático. El morado representa un área de estudio que investiga la contaminación ambiental asociada al jacinto de agua. El amarillo representa el uso del jacinto de agua para limpiar el agua contaminada, especialmente de metales pesados y otros productos químicos. El verde claro se enfoca en el potencial del jacinto de agua para producir biocarbón. El rojo destaca el impacto ambiental negativo del jacinto de agua como especie invasora que puede causar problemas de contaminación y dañar los ecosistemas acuáticos. El azul representa un área de investigación centrada en la composición química del jacinto de agua y su potencial para ser utilizado como materia prima para la producción de biocombustibles y otros productos biológicos.

El análisis bibliométrico reveló tendencias significativas en la investigación sobre el aprovechamiento del lirio acuático. Los estudios se han concentrado principalmente en tres áreas de aplicación: la producción de abonos orgánicos, la generación de bioenergía y los procesos de biorremediación. Esta tendencia se ha mantenido consistente durante las últimas dos décadas, con un notable incremento en publicaciones relacionadas con aplicaciones biotecnológicas. En cuanto a la distribución geográfica de la investigación, China e India emergen como los principales centros de producción científica en este campo, lo cual se atribuye a dos factores principales: la presencia frecuente del lirio acuático en sus ecosistemas acuáticos y la considerable inversión en investigación biotecnológica de estos países. La dominancia de estas naciones se refleja tanto en el número de publicaciones como en la diversidad de aplicaciones tecnológicas desarrolladas.

En relación con el análisis, el compostaje de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) presenta un enfoque prometedor para el manejo de la maleza y el ambiente acuático de origen, al mismo tiempo que incrementaría la producción agrícola y la fertilidad del suelo. En el trabajo de Gezahegn et al. (2024) emplearon lirio acuático con otros agentes de carga (estiércol de vaca, paja de arroz, tierra y ceniza). Se agregó estiércol de vaca para acelerar el compostaje y mejorar los niveles de nutrientes en el producto de compost final, mientras que la paja de arroz se empleó para ajustar la relación C/N y el nivel de humedad para un compostaje eficiente. El suelo se utilizó como fuente microbiana para la descomposición de la materia orgánica (y la adición de ceniza fue para la regulación de los niveles de pH y la mejora del efecto de encalado del compost final. La aplicación de composta de lirio acuático mostró el potencial de reemplazar el 50 % del fertilizante mineral. Esto indica que al mejorar la fertilidad del suelo y mejorar la calidad agrícola y ambiental, el uso combinado a largo plazo de fuentes orgánicas

e inorgánicas puede reducir apreciablemente la necesidad de nutrientes inorgánicos (Unpaprom et al. 2021).

Figura 2. Análisis de concurrencia para lirio acuático.



Fuente: elaboración propia.

La reutilización del lirio acuático como material renovable para el tratamiento de aguas municipales e industriales presenta algunas ventajas tanto económicas como ecológicas. Su composición, rica en fibra porosa y lignina, permite su conversión eficiente en biocarbón mediante pirólisis. Este bioproducto ha demostrado ser efectivo en la eliminación de metales pesados, incluyendo el arsénico, de soluciones acuosas. La transformación de la biomasa del lirio acuático en biocarbón representa una alternativa

prometedora para su gestión y aprovechamiento, destacando especialmente por su elevado contenido de carbono y nitrógeno (C-N), así como por su abundante presencia de minerales esenciales como hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), potasio (K), fósforo (P) y zinc (Zn) (Gaurav et al. 2020; Kumari et al. 2021)

La conversión del lirio acuático en nanobiocarbón representa una alternativa prometedora que ofrece múltiples beneficios (Rajput et al. 2024). Este proceso no solo permite controlar la proliferación invasiva de la planta, sino que también genera un producto con propiedades fisicoquímicas ideales para la recuperación de suelos altamente degradados (Saxena et al. 2025). La producción sostenible de nanobiocarbón resulta económicamente viable, ya que la materia prima se obtiene sin costo, siendo el transporte de la biomasa al centro de procesamiento el único gasto operativo significativo (Kassa et al. 2025).

En otras opciones, el lirio acuático puede ser una opción como abono verde, normalmente en forma de abono orgánico o nanoformulaciones (Pandiya et al. 2023). Esta maleza es muy adecuada para este propósito debido a su rico contenido en nutrientes y materia orgánica, esta última descrita como compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina y otros compuestos que contienen carbono que la hacen útil para la remediación de suelos agrícolas, el alto contenido en humedad, que representa más del 80 % de su peso fresco, lo que le permite aumentar la concentración de nutrientes en los cultivos cuando se aplica como abono (Widjajanto et al. 2003).

El lirio acuático destaca por su alto contenido de nitrógeno, alcanzando hasta un 3.2% de su peso en seco, principalmente en forma de proteínas y aminoácidos. Esta característica, sumada a su contenido significativo de fósforo, potasio y micronutrientes esenciales como hierro, manganeso, zinc y cobre, lo convierte en una materia prima idónea para la producción de fertilizantes de base biológica. Su composición química también sugiere su potencial aplicación en la producción de alimentos pecuarios (Harun et al. 2021). Sin embargo, es crucial considerar una limitación importante: su extraordinaria capacidad de bioacumulación. El lirio acuático puede concentrar contaminantes como mercurio, plomo y estroncio-90 hasta 10,000 veces más que los niveles presentes en su entorno. Por lo tanto, antes de su aprovechamiento en aplicaciones agrícolas o pecuarias, es indispensable realizar análisis exhaustivos para garantizar la ausencia de estos contaminantes (Begum et al. 2022).

Los estudios actuales han establecido firmemente la necesidad de un enfoque sostenible para el control y la utilización de lirio en la producción de biocarbones y fertilizantes. Sin embargo, se necesita más investigación para refinar y optimizar los procesos implicados en la conversión de esta maleza:

- La determinación de las condiciones de pirólisis más eficientes, incluyendo la temperatura y el tiempo.
- La comprensión de las implicaciones de las técnicas de pretratamiento, como la separación de la biomasa vegetal en diferentes tipos de tejidos.
- La evaluación de diferentes métodos de postratamiento para mejorar la calidad y las propiedades del nanobiocar, incluyendo la caracterización y funcionalización del material
- Evaluar la posible toxicidad del nanobiocarbón derivado de lirio, especialmente en lo que respecta a la bioacumulación de metales pesados.
- Realizar un estudio de viabilidad económica de la producción a gran escala de bio carbones a partir de lirio, incluida una evaluación directa de la relación coste-beneficio del desarrollo de biocarbón a partir de esta planta acuática, tanto desde el punto de vista del consumidor como del inversor empresarial.

La planta de lirio acuático está formada por carbohidratos estructurales como lignina, celulosa cristalina y el polímero de hemicelulosa. Por lo tanto, las hojas contienen grupos funcionales críticos, especialmente carboxilo, hidroxilo y carbonilo, que actúan como un catalizador para la adsorción de contaminantes del agua en adsorbentes a base de plantas. Las raíces contienen grupos funcionales - PO_4 , $C=O$, y $C-H$. La composición de las fibras de lirio incluye una cantidad significativa de celulosa en forma de hemicelulosa (33%), celulosa (25%), así como lignina (10%) (Zhang et al. 2020)

Con relación a lo anterior, el trabajo de Smriti et al. (2023) demostraron que la nanocelulosa (nanocristales de celulosa (CNC) y nanofibras de celulosa (CNF) de lirio acuático es idónea para varias aplicaciones como filamentos hilados en húmedo, aero geles, películas de embalaje, separadores de baterías y filtración de agua, mostrando resultados prometedores. La nanocelulosa obtenida a partir de lirio acuático tiene un diámetro y una cristalinidad comparables relacionados con la nanocelulosa derivada de otros desechos agrícolas, pero menor que la nanocelulosa extraída de la madera.

Finalmente, respecto a la valorización del lirio para producir energía, Wathore et al. (2024) demostraron sistemáticamente la preparación y caracterización de pellets de lirio acuático para su uso como combustible para cocinar en aplicaciones rurales. Adicionalmente, en el estudio de Midhun et al. (2023) se demostró la viabilidad de producir briquetas a partir del lirio acuático. Las briquetas son bloques sólidos de material combustible que se elaboran compactando biomasa, en este caso, el lirio acuático. Finalmente, el lirio acuático se ha investigado recientemente también como recurso energético eficaz para la producción de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia. Sin embargo, al igual que en otros biocombustibles y procesos de producción, los pretratamientos de la materia prima son clave para obtener buenos resultados (Karouach et al. 2024).

El pretratamiento de los residuos de lirio son un conjunto de métodos prometedores para aumentar la productividad del biogás. Además del pretratamiento, la optimización del uso del inóculo puede mejorar las tasas de productividad del biogás. La inclusión de estiércol de vaca en lirio acuático induce un efecto sinérgico que va más allá de la simple codigestión anaeróbica (Kulabako et al. 2025). Las estructuras microporosas y los nutrientes aportados por el lirio propagan las comunidades microbianas que intervienen en el proceso de generación de biogás, lo que conduce a una mayor estabilidad y puede mejorar la biodegradabilidad (Manigandan et al. 2023).

La gestión sostenible del lirio acuático requiere un marco innovador y transdisciplinar que transforme este desafío ambiental en una oportunidad de desarrollo. Este enfoque integral contempla dos aspectos fundamentales: la valorización de la biomasa y la implementación de políticas públicas efectivas. En primer lugar, la conversión de la biomasa del lirio acuático en bioproductos representa una solución tecnológica prometedora que aprovecha el potencial de esta especie para la mitigación ambiental. Esta transformación no solo aborda la problemática de su proliferación excesiva, sino que también genera productos de valor agregado para diversos sectores industriales.

La clave del éxito radica en la construcción de alianzas estratégicas entre comunidades, sector empresarial y academia, transformando la adversidad que representa la sobrepoblación del lirio acuático en una oportunidad de crecimiento sostenible. Este modelo de colaboración multiactor permitiría maximizar los beneficios económicos, sociales y ecológicos, mientras se desarrollan capacidades locales y se genera conocimiento científico-técnico valioso.

De esta manera, lo que inicialmente se percibe como un problema ambiental se convierte en un catalizador de desarrollo sostenible, innovación tecnológica y bienestar comunitario, demostrando que es posible alinear la conservación ambiental con el progreso económico y social.

CONCLUSIONES

La revalorización del lirio, una planta acuática a menudo considerada invasora, aparece como una estrategia con alto potencial para abordar desafíos ambientales y socioeconómicos. A través de la investigación científica básica y aplicada se han descubierto diversos usos para esta planta, desde la producción de bioenergía y materiales de construcción sostenibles hasta su empleo en la agricultura como abono y en la remediación de aguas contaminadas. La revalorización del lirio no solo contribuye a la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos, sino que también puede promover el desarrollo de nuevas industrias y la generación de empleo. Es fundamental seguir explorando el potencial de esta planta y promover su aprovechamiento responsable para maximizar sus beneficios y minimizar sus impactos negativos.

REFERENCIAS

- Bajpai, S., y Nemade, P. R. (2023). An integrated biorefinery approach for the valorization of water hyacinth towards circular bioeconomy: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(14), 39494-39536. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25830-y>
- Begum, S. L., Himaya, S. M. M. S., y Afreen, S. M. M. S. (2022). Potential of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as compost and its effect on soil and plant properties: A review. *Agricultural Reviews*, 43(1), 20-28. DOI : [10.18805/ag.R-184](https://doi.org/10.18805/ag.R-184)
- De Carvalho, L. B., y Junior, C. W. R. (2019). Control of water hyacinth: a short review. *Commun. Plant Sci.*, 9(1). DOI [10.26814/cps2019021](https://doi.org/10.26814/cps2019021)

- Gaurav, G. K., Mehmood, T., Cheng, L., Klemeš, J. J., y Shrivastava, D. K. (2020). Water hyacinth as a biomass: A review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 122214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122214>
- Gezahegn, A., Selassie, Y. G., Agegnehu, G., Addisu, S., Mihretie, F. A., Kohira, Y., y Sato, S. (2024). Sustainable weed management and soil enrichment with water hyacinth composting and mineral fertilizer integration. *Environmental Challenges*, 16, 101007. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101007>
- Gómez, R. S., García, A. E. Á., Izabal, A. D., y Vargas, G. O. (2024). Uso del Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*) como Alternativa en la Generación de Bioplásticos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(1), 9621-9637.
- Harun, I., Pushiri, H., Amirul-Aiman, A. J., y Zulkeflee, Z. (2021). Invasive water hyacinth: Ecology, impacts and prospects for the rural economy. *Plants*, 10(8), 1613. <https://doi.org/10.3390/plants10081613>
- Irewale, A. T., Dimkpa, C. O., Elemike, E. E., y Oguzie, E. E. (2024). Water hyacinth: Prospects for biochar-based, nano-enabled biofertilizer development. *Heliyon*.
- Islam, M. N., Rahman, F., Papri, S. A., Faruk, M. O., Das, A. K., Adhikary, N., y Ahsan, M. N. (2021). Water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms.) as an alternative raw material for the production of bio-compost and handmade paper. *Journal of environmental management*, 294, 113036. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113036>
- Kulabako, R. N., Semiyaga, S., Tumwesige, R. S., Irumba, C., Opio, M. I., Manga, M., y Ross, A. B. (2025). Enhanced biogas production from water hyacinth and cow dung with wood and faecal sludge biochar. *Energy Nexus*, 17, 100342. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100342>
- Karouach, F., Bakrim, W. B., Ezzariai, A., Mnaouer, I., Ibourki, M., Kibret, M., y Kouisni, L. (2024). Valorization of water hyacinth to biomethane and biofertilizer through anaerobic digestion technology. *Fuel*, 358, 130008. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130008>

- Kassa, Y., Amare, A., Nega, T., Alem, T., Gedefaw, M., Chala, B., y Tibebe, D. (2025). Water hyacinth conversion to biochar for soil nutrient enhancement in improving agricultural product. *Scientific Reports*, 15(1), 1820. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84729-x>
- Kumari, K., Swain, A. A., Kumar, M., y Bauddh, K. (2021). Utilization of Eichhornia crassipes biomass for production of biochar and its feasibility in agroecosystems: a review. *Environ Sustain* 4: 285–297. <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00185-7>
- Madikizela, L. M. (2021). Removal of organic pollutants in water using water hyacinth (Eichhornia crassipes). *Journal of environmental management*, 295, 113153. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113153>
- Manigandan, S., Praveenkumar, T. R., Anderson, A., Maryam, A., y Mahmoud, E. (2023). Benefits of pretreated water hyacinth for enhanced anaerobic digestion and biogas production. *International Journal of Thermofluids*, 19, 100369. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100369>
- Madhumidha, M., Benish Rose, P. M., Nagabalaji, V., Das, I., y Srinivasan, S. V. (2024). Critical assessment of biorefinery approaches for efficient management and resource recovery from water hyacinths for sustainable utilization. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 1-27. <https://doi.org/10.1007/s11157-024-09693-4>
- Martínez-Ruiz A., Méndez-González F. (2022). Biorefinería: control y aprovechamiento del lirio acuático *Ciencia* 73(2):79-84. <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-73-numero-2/323-desde-la-uam/947-biorrefineria-control-y-aprovechamiento-del-lirio-acuatico>
- Midhun, V. C., Jayaprasad, G., Anto, A., y Anish, R. (2023). Preparation and characterisation study of water hyacinth briquettes. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.157>
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., Hofifah, S. N., Al Husaeni, D. F., Al Husaeni, D. N., Fiandini, M., y Aziz, M. (2024). Progress in the utilization of water hyacinth as effective biomass material. *Environment, Development and Sustainability*, 26(10), 24521-24568. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03655-6>

- Nega, D. T., Ancha, V. R., Manenti, F., y Adeel, Z. (2024). A comprehensive policy framework for unlocking the potential of water hyacinth in Ethiopia's circular bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140509. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140509>
- Pandiya, R., Jona, S. E., Dhinakaran, S., Dinesh, J., Deepika, R., Aruna, S., y Manikandavelu, D. (2023). Water hyacinth a sustainable source of feed, manure and industrial products: a review. *Agricultural Reviews*, 44(3), 389-392. DOI : [10.18805/ag.R-2181](https://doi.org/10.18805/ag.R-2181)
- Rajput, P., Kumar, P., Priya, A. K., Kumari, S., Shiade, S. R. G., Rajput, V. D., ... y Rensing, C. (2024). Nanomaterials and biochar mediated remediation of emerging contaminants. *Science of The Total Environment*, 170064. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170064>
- Saxena, P., Miglani, R., Shah, D., Rajput, V. D., y Minkina, T. (2025). Role of Nanoparticles and Nano-Biochar in Reducing Salinity Stress for Improving Soil Health and Sustainable Crop Production. In *Nanomaterials and Nano-Biochar in Reducing Soil Stress* (pp. 137-159). Apple Academic Press.
- Smriti, S. A., Haque, A. N. M. A., Khadem, A. H., Siddiqa, F., Rahman, A. M., Himu, H. A., y Naebe, M. (2023). Recent developments of the nanocellulose extraction from water hyacinth: A review. *Cellulose*, 30(14), 8617-8641. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05374-7>
- Unpaprom, Y., Pimpimol, T., Whangchai, K., y Ramaraj, R. (2021). Sustainability assessment of water hyacinth with swine dung for biogas production, methane enhancement, and biofertilizer. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 849-860. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00850-7>
- Wathore, R., Hamdan, A., Badki, P., Bherwani, H., Gupta, A., y Labhasetwar, N. (2024). Sustainable fuel production from water hyacinth: evaluation for cooking applications and resource mapping. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06186-w>
- Widjajanto, D. W., Honmura, T., y Miyauchi, N. (2003). Possible utilization of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms), an aquatic weed, as green manure in vegetables cropping systems. *Japanese Journal of Tropical Agriculture*, 47(1), 27-33
- Xu, Y., Liu, Y., Liu, S., Tan, X., Zeng, G., Zeng, W., ... y Zheng, B. (2016). Enhanced adsorption of methylene blue by citric acid modification of biochar derived from water hyacinth (*Eichornia*

crassipes). *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 23606-23618.
<https://doi.org/10.1007/s11356-016-7572-6>

Zhang, C., Ma, X., Chen, X., Tian, Y., Zhou, Y., Lu, X., Huang, T., 2020. Conversion of water hyacinth to value-added fuel via hydrothermal carbonization. *Energy* 197, 117193. doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.117193 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117193>