



ORIGINAL

Integrated Wastewater Treatment Technology: Efficiency of Lime and Eichhornia crassipes for Agricultural Irrigation

Tecnología Integrada de Tratamiento de Aguas Residuales: eficiencia de Cal y Eichhornia crassipes para Riego Agrícola

Alfredo Lesvel Castro Landin¹  , Dunia Lisbet Domínguez Gálvez²  , Ángel Fortunato Bernal Alavá³  , Julio Cesar Pino Tarragó²  

¹Universidad Estatal del Sur de Manabí, Carrera de Medio Ambiente. Jipijapa, Ecuador

²Universidad Estatal del Sur de Manabí, Carrera de Ingeniería Civil. Jipijapa, Ecuador.

³Universidad Estatal del Sur de Manabí, Carrera de Pedagogía de los Idiomas Nacionales y Extranjeros. Jipijapa, Ecuador.

Citar como: Castro Landin AL, Domínguez Gálvez DL, Bernal Alavá AF, Pino Tarragó JC. Integrated Wastewater Treatment Technology: Efficiency of Lime and Eichhornia crassipes for Agricultural Irrigation. Salud, Ciencia y Tecnología. 2024; 4:.1313. <https://doi.org/10.56294/saludcyt2024.1313>

Enviado: 27-03-2024

Revisado: 12-07-2024

Aceptado: 17-11-2024

Publicado: 18-11-2024

Editor: Prof. Dr. William Castillo-González 

Autor para la correspondencia: Julio Cesar Pino Tarragó 

ABSTRACT

Introduction: wastewater treatment for irrigation is a pressing challenge in rural areas, especially in communities where agriculture depends on contaminated water sources. This study focused on developing a low-cost, sustainable technology tailored to the needs of vulnerable populations.

Method: the efficiency of a combined treatment using lime and water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) was evaluated in Joa, Ecuador. A completely randomized experimental design was employed to assess changes in key physicochemical parameters, including electrical conductivity, hardness, pH, nitrates, and sulfates, before and after the treatments.

Results: water hyacinth reduced water hardness significantly, from 218 mg/L to 154 mg/L of CaCO₃, while lime controlled pH, maintaining it near neutral (7,4) with precise dosing. Despite these improvements, the combination showed limitations in reducing nitrates and sulfates to meet local regulatory standards. Nevertheless, the treatments enhanced overall water quality, making it more suitable for agricultural purposes.

Conclusions: the combined use of lime and water hyacinth represents a feasible, eco-friendly solution for treating agricultural wastewater in resource-constrained settings. While effective in improving water quality, further studies are needed to optimize the system, explore scalability, and evaluate its long-term impact on soil and crop productivity.

Keywords: Agricultural Wastewater Treatment; Phytotechnology; Lime; Water Hyacinth; Rural Water Management; Sustainable Agriculture.

RESUMEN

Introducción: el tratamiento de aguas residuales para riego es un problema relevante en comunidades rurales, especialmente donde la agricultura depende de fuentes hídricas contaminadas. Este estudio propuso evaluar una tecnología combinada de bajo costo, basada en el uso de cal y lechuguín (*Eichhornia crassipes*), adaptada a las necesidades de estas comunidades.

Método: se realizó un diseño experimental completamente aleatorizado para evaluar la eficiencia del tratamiento en Joa, Ecuador. Se analizaron parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica, dureza, pH, nitratos y sulfatos, tanto antes como después de la aplicación de los tratamientos.

Resultados: el lechuguín redujo significativamente la dureza del agua, disminuyéndola de 218 mg/L a 154 mg/L de CaCO₃. Por su parte, la cal reguló eficazmente el pH, manteniéndolo en valores cercanos a 7,4 mediante una dosificación precisa. Sin embargo, la combinación de ambos tratamientos presentó limitaciones para reducir nitratos y sulfatos a niveles óptimos según las normativas locales. A pesar de ello, la calidad del agua mejoró notablemente, haciéndola más apta para el uso agrícola.

Conclusiones: la tecnología evaluada representa una solución práctica, sostenible y de bajo costo, basada en recursos locales, para el tratamiento de aguas residuales en comunidades vulnerables. Se recomienda realizar investigaciones adicionales para optimizar su escalabilidad y evaluar los efectos a largo plazo en la calidad del suelo y la productividad agrícola.

Palabras clave: Tratamiento De Aguas Residuales Agrícolas; Fitotecnología; Cal; Jacinto De Agua; Gestión Rural Del Agua; Agricultura Sostenible.

INTRODUCCIÓN

El acceso a agua de calidad para riego representa un desafío crítico a nivel mundial, especialmente en un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos debido al cambio climático, el aumento de la población y la intensificación de actividades humanas. La agricultura, que utiliza aproximadamente el 70 % del agua dulce disponible en el planeta, enfrenta una doble problemática: por un lado, una demanda cada vez mayor de alimentos, y por otro, una oferta de agua de riego comprometida tanto en cantidad como en calidad.

⁽¹⁾ Esta situación se agrava en regiones en desarrollo, donde la infraestructura tecnológica para el tratamiento y manejo adecuado de aguas residuales es insuficiente o inexistente. Según estimaciones, más del 80 % de las aguas residuales generadas globalmente se descargan al medio ambiente sin recibir tratamiento, exacerbando problemas como la contaminación de suelos, la pérdida de biodiversidad y riesgos para la salud humana.⁽²⁾

El desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas residuales no solo contribuye a minimizar la contaminación, sino que también promueve la sostenibilidad al recuperar recursos clave como nutrientes esenciales para la agricultura. Estas tecnologías pueden reducir la presión sobre fuentes hídricas naturales y apoyar la productividad agrícola de manera sostenible.⁽³⁾ Sin embargo, estudios han señalado que, aunque el uso de aguas residuales tratadas tiene beneficios, también puede ocasionar efectos adversos como salinización del suelo y acumulación de metales pesados, especialmente en regiones donde los estándares de tratamiento y la adopción tecnológica son limitados.⁽⁴⁾

En América Latina, la adopción de tecnologías para la gestión de recursos hídricos enfrenta retos particulares debido a una combinación de factores, incluyendo la falta de inversión en infraestructura, la dependencia económica de la agricultura y la presión demográfica. En países como Ecuador, donde el sector agrícola es fundamental para el sustento de las comunidades rurales, la contaminación hídrica afecta directamente la seguridad alimentaria y los medios de vida. Según el Banco Mundial (2020), menos del 50 % de las aguas residuales generadas en América Latina son tratadas adecuadamente, lo que contribuye a problemas como la degradación de la fertilidad de los suelos, la contaminación de acuíferos y la acumulación de metales pesados en ecosistemas agrícolas. Estas tendencias no solo comprometen la sostenibilidad del sector agrícola, sino que también representan un obstáculo para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS 6, relacionado con la gestión sostenible del agua.

El uso de tecnologías accesibles para el tratamiento de aguas residuales, como sistemas de bajo costo y fácil implementación, puede mejorar significativamente la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos. Estas soluciones tecnológicas también ofrecen una respuesta parcial a la escasez hídrica, siempre que se implementen con un monitoreo adecuado para mitigar riesgos asociados, como la transferencia de patógenos, contaminantes orgánicos persistentes y metales pesados.⁽⁵⁾

En este contexto, la comunidad de Joa, ubicada en el cantón de Jipijapa, provincia de Manabí, se presenta como un ejemplo representativo de estas problemáticas. La falta de tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas residuales ha llevado al uso de aguas insuficientemente tratadas para riego agrícola, con consecuencias negativas tanto para la productividad como para la salud pública. Los suelos de esta región han mostrado un deterioro significativo en sus propiedades físicas y químicas, incluyendo una creciente acumulación de metales pesados, lo que limita su capacidad para sustentar cultivos de manera eficiente y sostenible. Además, los agricultores de Joa enfrentan riesgos a largo plazo relacionados con la exposición a contaminantes presentes en el agua de riego, afectando no solo la calidad de los alimentos producidos, sino también la salud de las familias campesinas.

Entre las tecnologías emergentes de bajo costo, el uso de cal y plantas acuáticas como el lechuguín (*Eichhornia crassipes*) ha despertado interés por su potencial para mejorar la calidad del agua de manera económica y ambientalmente viable.⁽³⁾

La cal, ampliamente utilizada en tratamientos de agua, es una tecnología química efectiva para corregir el pH, neutralizar ácidos y precipitar contaminantes como metales pesados.⁽³⁾ Por otro lado, el lechuguín ha demostrado ser una tecnología biológica eficiente de fitorremediación, al absorber nutrientes y metales pesados presentes en aguas residuales y contribuir a la mejora de su calidad.⁽⁴⁾ No obstante, el uso independiente de estas tecnologías presenta limitaciones en términos de efectividad, escalabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

La combinación de estas tecnologías plantea una solución innovadora y accesible que podría superar las limitaciones de cada técnica por separado. Estudios recientes sugieren que integrar procesos químicos y biológicos en el tratamiento de aguas residuales agrícolas puede optimizar los resultados, reduciendo costos operativos y maximizando la eliminación de contaminantes.⁽⁵⁾ Sin embargo, aún persiste una brecha en la literatura científica sobre la validación experimental de esta combinación en entornos rurales.

En este trabajo, se propone evaluar la eficiencia de una tecnología híbrida que combina el uso de cal y lechuguín para el tratamiento de aguas residuales agrícolas en Joa. Mediante un enfoque experimental, se analizaron parámetros fisicoquímicos clave, como el pH, la alcalinidad, la dureza, los nitratos y los metales pesados, con el objetivo de determinar la viabilidad de esta estrategia en un entorno rural. Este estudio busca desarrollar una solución tecnológica práctica y replicable para comunidades vulnerables, contribuyendo al avance de tecnologías sostenibles alineadas con los principios de la economía circular y la resiliencia ambiental.

MÉTODO

Diseño del Estudio

Este estudio adoptó un enfoque experimental con un diseño completamente aleatorizado para evaluar la eficacia de la combinación de cal y lechuguín (*Eichhornia crassipes*) en el tratamiento de aguas residuales agrícolas. Se analizaron parámetros fisicoquímicos que incluyeron pH, alcalinidad, dureza, nitratos y metales pesados, antes y después de la implementación de los tratamientos.

Área de Estudio

La investigación se llevó a cabo en la comunidad de Joa, cantón de Jipijapa, provincia de Manabí, Ecuador. Esta región presenta una fuerte dependencia de la agricultura para el sustento económico, utilizando aguas residuales insuficientemente tratadas para el riego.

Materiales

1. Reactivos y Equipos de Laboratorio:
 - Hidróxido de calcio (cal).
 - Soluciones estándar para análisis de parámetros fisicoquímicos.
 - Espectrofotómetro UV-Vis para medición de nitratos y metales pesados.
 - pH-metro digital.
 - Conductímetro.
 - Equipo de titulación para dureza y alcalinidad.
2. Material Biológico:
 - Plantas de lechuguín (*Eichhornia crassipes*) recolectadas de cuerpos de agua locales.
3. Contenedores:
 - Tinas plásticas de 100 litros para experimentos controlados.

Recolección de Muestras

Las muestras de agua residual se recolectaron directamente de fuentes de riego utilizadas por la comunidad de Joa. Para garantizar la representatividad, se utilizaron técnicas de muestreo aleatorio simple, recolectando un total de 50 litros de agua por tratamiento.

Tratamientos

Se establecieron los siguientes tratamientos experimentales:

1. Control: agua residual sin tratamiento.
2. Tratamiento con Cal: agua tratada con una solución de cal en diferentes concentraciones para ajustar el pH.
3. Tratamiento con Lechuguín: agua con plantas de lechuguín durante un período de 5 semanas.
4. Combinación de Cal y Lechuguín: aplicación inicial de cal, seguida de la introducción de lechuguín para evaluar el efecto combinado.

Procedimientos Experimentales

1. Preparación de las Tinas:
 - Se llenaron las tinas plásticas con 50 litros de agua residual.

- Para los tratamientos con cal, se ajustó el pH del agua a niveles óptimos (6,5 a 8,5) antes de la introducción de lechuguín.
- En los tratamientos con lechuguín, se añadieron seis plantas con un peso promedio de 35 g por planta.

2. Monitoreo y Recolección de Datos:

- Se tomaron muestras de agua cada 7 días durante 5 semanas para análisis de laboratorio.
- Los parámetros evaluados incluyeron:
 - ✓ pH: medido con pH-metro digital.
 - ✓ Dureza: determinada mediante titulación EDTA.
 - ✓ Nitratos: analizados mediante espectrofotometría UV-Vis.
 - ✓ Metales Pesados: determinados mediante espectroscopía de absorción atómica.
 - ✓ Alcalinidad: evaluada por titulación ácido-base.

Análisis de Datos

Se realizó un análisis estadístico con el software *Statgraphics*, utilizando ANOVA para detectar diferencias significativas entre tratamientos con un nivel de confianza del 95%. En caso de encontrar diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey para identificar el tratamiento más efectivo.

RESULTADOS

Condiciones Iniciales del Agua Residual

Antes de la aplicación de los tratamientos, se realizó la caracterización fisicoquímica del agua residual utilizada para el riego en la comunidad de Joa. Los parámetros evaluados incluyeron pH, conductividad eléctrica, dureza, nitratos, sulfatos y metales pesados. Estos valores iniciales sirvieron como referencia para comparar los cambios ocurridos después de los tratamientos. Los resultados iniciales se resumen en la tabla 1.

Parámetro	Valor Inicial	Método Analítico
pH	6,8	Medición directa (pH-metro)
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	688,0	Conductímetro
Dureza ($\text{mg}/\text{L CaCO}_3$)	218,0	Titulación EDTA
Nitratos (mg/L)	4,7	Espectrofotometría UV-Vis
Sulfatos (mg/L)	49,4	Espectrofotometría UV-Vis
Metales Pesados (mg/L)	Ver detalles abajo	Absorción atómica

Nota: los valores iniciales se determinaron a partir de tres muestras representativas recolectadas en diferentes puntos del sistema de riego. Cada medición es el promedio de tres replicaciones para garantizar la precisión.

Resultados por Tratamiento

Tratamiento con Lechuguín

El uso de *Eichhornia crassipes* como herramienta de fitorremediación mostró resultados prometedores en la reducción de varios parámetros fisicoquímicos:

- pH: aumentó gradualmente desde 6,8 hasta 7,4, manteniéndose dentro del rango óptimo para riego agrícola (6,5 a 8,4).
- Dureza: disminuyó significativamente de 218 mg/L a 158 mg/L (CaCO_3).
- Nitratos: reducción notable de 4,7 mg/L a valores inferiores a 0,5 mg/L .
- Conductividad: mostró una reducción gradual de 688 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 524,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Sulfatos: no se observó una reducción consistente en este parámetro, manteniéndose cerca de los valores iniciales.
- Metales Pesados: la absorción por el lechuguín logró reducir las concentraciones de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en un 25 % y 18 %, respectivamente.

Tratamiento con Cal

La adición de cal al agua residual permitió observar los siguientes cambios:

- pH: se estabilizó rápidamente entre 7,5 y 8,2, dependiendo de la dosis aplicada.
- Dureza: reducción significativa del 20 % en promedio.
- Nitratos: se logró una disminución moderada del 15 %, alcanzando valores de 4,0 mg/L .
- Metales Pesados: el tratamiento con cal precipitó parcialmente los metales, logrando una reducción

del 30 % en los niveles de hierro (Fe) y manganeso (Mn).

Tratamiento Combinado (Cal + Lechuguín)

La combinación de cal y lechuguín mostró un desempeño superior en comparación con los tratamientos individuales, destacándose como la estrategia más eficaz:

- pH: se mantuvo estable entre 7,0 y 7,8 a lo largo del período experimental.
- Dureza: reducción significativa a valores de 140 mg/L (CaCO₃), superando la eficacia de los tratamientos individuales.
- Nitratos: reducción a niveles no detectables (< 0,5 mg/L).
- Metales Pesados: reducción combinada del 50 % en las concentraciones de Pb y Cd, lo que cumple con los estándares internacionales de calidad de agua para riego.
- Conductividad: mostró una disminución consistente a lo largo del tiempo, alcanzando valores finales de 480 µS/cm.

Tabla 2. Resultados promedio de parámetros fisicoquímicos al final del tratamiento

Parámetro	Control (Inicial)	Lechuguín	Cal	Cal + Lechuguín
pH	6,8	7,4	7,8	7,5
Conductividad (µS/cm)	688,0	524,6	540,0	480,0
Dureza (mg/L CaCO ₃)	218,0	158,0	174,0	140,0
Nitratos (mg/L)	4,7	<0,5	4,0	<0,5
Sulfatos (mg/L)	49,4	47,0	46,5	45,8
Metales Pesados (Pb)	0,12	0,09	0,08	0,06

Nota: los resultados corresponden al promedio de mediciones realizadas en tres réplicas para cada tratamiento. Los valores de pH y conductividad están dentro del rango recomendado por las Normas TULAS para el agua de riego.

Análisis Estadístico

El análisis de ANOVA indicó diferencias significativas entre los tratamientos para los parámetros evaluados (valor $p < 0,05$). La prueba de Tukey identificó al tratamiento combinado como el más efectivo para todos los parámetros evaluados, excepto sulfatos, donde las diferencias no fueron significativas.

Resumen de Hallazgos

1. El tratamiento con lechuguín fue efectivo en la reducción de nitratos y dureza, pero limitado en la eliminación de sulfatos.
2. La cal mostró una capacidad moderada para ajustar el pH y precipitar contaminantes, siendo más efectiva en la eliminación de metales pesados.
3. La combinación de cal y lechuguín demostró ser la estrategia más eficiente, logrando reducciones significativas en dureza, nitratos y metales pesados, con un impacto positivo en la calidad general del agua de riego.

DISCUSIÓN

Adaptación a Otras Comunidades Rurales

Los resultados de este estudio, realizados en la comunidad de Joa, demuestran que el tratamiento combinado de cal y lechuguín es una solución replicable para comunidades rurales con desafíos similares en la gestión de aguas residuales agrícolas. Esta tecnología híbrida tiene características fundamentales que facilitan su adopción en otros contextos:

1. Accesibilidad de los Recursos:
 - Tanto la cal como el lechuguín son materiales de bajo costo y ampliamente disponibles en muchas regiones rurales. La cal, con un precio asequible en mercados locales, y el lechuguín, una planta invasiva en cuerpos de agua, pueden recolectarse de forma controlada para evitar proliferaciones descontroladas.^(5,6,7)
 - Esta accesibilidad fomenta la adopción, como lo señalan estudios similares que destacan la efectividad de recursos locales en sistemas descentralizados de tratamiento en comunidades rurales de la India.⁽⁸⁾
2. Simplicidad del Proceso:
 - La implementación del sistema no requiere infraestructura sofisticada ni conocimientos técnicos avanzados. Procedimientos manuales y el uso de tinas plásticas permiten que el tratamiento sea operado directamente por agricultores o técnicos locales.

- Este enfoque descentralizado fortalece la autonomía comunitaria, una ventaja también documentada en África subsahariana, donde sistemas sencillos han mejorado la calidad del agua sin depender de infraestructuras complejas.⁽⁹⁾
3. Escalabilidad y Adaptación:
- El sistema puede ajustarse según la demanda de agua tratada y las características de las fuentes locales. Por ejemplo, en regiones con contaminantes más persistentes, la optimización de las dosis de cal o el tiempo de exposición del lechuguín puede aumentar la eficiencia.

Integración con Políticas Públicas Locales y Nacionales

La implementación de esta tecnología híbrida puede alinearse con políticas públicas para mejorar la gestión del agua en entornos rurales:

1. Apoyo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):
 - Este enfoque contribuye directamente al ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y al ODS 12 (producción y consumo responsables) al reutilizar recursos locales como el lechuguín.⁽⁶⁾
 - Además, respalda el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres) al reducir la contaminación hídrica en suelos y cuerpos de agua.⁽⁸⁾
2. Incorporación en Planes de Desarrollo Rural:
 - La tecnología puede incluirse en programas nacionales de manejo de recursos hídricos, priorizando comunidades vulnerables que dependen de la agricultura. Esto refuerza la capacitación comunitaria para maximizar el impacto, como sugieren estudios en América Latina.⁽⁹⁾
3. Incentivos Económicos:
 - La introducción de subsidios para materiales o programas de capacitación podría incentivar la adopción del sistema. Además, las ONG pueden desempeñar un papel clave en su difusión y monitoreo.
4. Normativas Ambientales:
 - La adopción del tratamiento combinado puede integrarse con normativas existentes, como estándares de calidad de agua para riego, garantizando que las comunidades cumplan con los requisitos ambientales y agrícolas establecidos.

Potencial de Impacto Socioeconómico

1. Aumento de la Productividad Agrícola: el agua tratada mejora la calidad del suelo y la salud de los cultivos, resultando en mayores rendimientos agrícolas. Estudios en Egipto refuerzan que tecnologías accesibles mejoran significativamente la productividad agrícola.⁽¹⁰⁾
2. Reducción de Costos a Largo Plazo: aunque el sistema requiere una inversión inicial, los costos operativos son bajos, ofreciendo una solución económicamente sostenible con retornos evidentes en la mejora de calidad del agua y menor exposición a contaminantes.
3. Mejora de la Salud Pública: al reducir la exposición a metales pesados y patógenos, este sistema contribuye a la protección de la salud humana, especialmente en comunidades con recursos médicos limitados.^(11,12,13)

Limitaciones y Áreas de Mejora

1. Proliferación del Lechuguín: aunque eficaz en la fitorremediación, su manejo debe ser cuidadoso para evitar impactos ecológicos negativos en ecosistemas acuáticos.⁽¹⁴⁾
2. Duración del Estudio: este trabajo se realizó durante cinco semanas; se requieren estudios a largo plazo para evaluar la sostenibilidad del sistema y sus efectos acumulativos en el suelo y los cultivos.⁽¹⁵⁾
3. Contaminantes Emergentes: futuras investigaciones deberían abordar la eliminación de contaminantes orgánicos persistentes (COP) y otros compuestos emergentes no evaluados en este estudio.

Recomendaciones Futuras

1. Implementar proyectos piloto en comunidades rurales con características similares para validar la replicabilidad y escalabilidad del sistema.
2. Desarrollar programas de capacitación para agricultores y técnicos locales sobre el uso y mantenimiento del sistema.
3. Investigar cómo las condiciones climáticas y geográficas específicas afectan la eficiencia del tratamiento.

CONCLUSIÓN

La combinación de cal y lechuguín (*Eichhornia crassipes*) demostró ser una tecnología eficaz, sostenible y económica para el tratamiento de aguas residuales agrícolas en la comunidad de Joa, cantón Jipijapa,

provincia de Manabí. Este enfoque híbrido logró mejoras significativas en parámetros clave de calidad del agua, cumpliendo con estándares internacionales y respondiendo a las necesidades específicas de comunidades rurales.

Principales Logros

1. Eficiencia de la Tecnología Combinada:
 - Reducción de la dureza del agua en un 35,8 % (de 218 mg/L a 140 mg/L de CaCO₃).
 - Eliminación de nitratos a niveles < 0,5 mg/L, disminuyendo riesgos para cultivos y suelos.
 - Disminución del 50 % en metales pesados como plomo (Pb) y cadmio (Cd).
 - Estabilización del pH en un rango óptimo (7,0 a 7,8), adecuado para el riego agrícola.
2. Viabilidad Práctica y Tecnológica:
 - Utilización de materiales disponibles localmente, como cal y lechuguín, lo que reduce costos y facilita la implementación.
 - Requiere infraestructura simple y conocimientos técnicos básicos, permitiendo su adopción directa por agricultores locales.
3. Contribución Ambiental y Social:
 - Promueve la sostenibilidad agrícola al disminuir la contaminación de suelos y cuerpos de agua.
 - Refuerza la seguridad alimentaria y mejora la calidad de vida al reducir riesgos ambientales y sanitarios.

Limitaciones y Futuras Investigaciones

1. Duración del Estudio: se necesitan evaluaciones a largo plazo para confirmar la sostenibilidad de los resultados observados y los efectos acumulativos en suelos y cultivos.
2. Manejo del Lechuguín: es esencial implementar controles efectivos para prevenir su proliferación descontrolada, evitando impactos negativos en ecosistemas cercanos.
3. Contaminantes Emergentes: futuros estudios deben abordar la eficacia de esta tecnología frente a contaminantes orgánicos persistentes y otros compuestos emergentes no evaluados en este trabajo.

Implicaciones Prácticas y Científicas

1. Escalabilidad: esta tecnología puede replicarse en comunidades rurales con desafíos similares, ofreciendo una solución innovadora y práctica para la gestión hídrica sostenible.
2. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): contribuye al ODS 6 (agua limpia y saneamiento), al ODS 13 (acción climática) y al ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres) mediante el uso de soluciones tecnológicas accesibles.
3. Nuevas Líneas de Investigación: este modelo abre oportunidades para explorar la integración de tecnologías complementarias y evaluar los impactos a largo plazo en la calidad del agua, suelos y cultivos agrícolas.

En conclusión, esta investigación presenta una tecnología híbrida que aborda problemas críticos de calidad del agua en comunidades rurales. Su implementación tiene el potencial de transformar la gestión de aguas residuales agrícolas, contribuyendo al desarrollo sostenible, la seguridad hídrica y la resiliencia ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FAO. El agua y la agricultura: perspectivas globales y desafíos locales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; 2020. Disponible en: <http://www.fao.org>
2. UNESCO. Informe mundial sobre el desarrollo del agua: valorar el agua. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura; 2021. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org>
3. Silva J. Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: a systematic literature review. *Sustainability*. 2023;15(14):10940.
4. Belhaj D, Jerbi B, Medhioub M, Zhou JL, Kallel M, Ayadi H. Impact of treated urban wastewater for reuse in agriculture on soil properties and crop productivity. *Environ Sci Pollut Res*. 2016;23:15877-87.
5. Banco Mundial. Gestión de recursos hídricos en América Latina y el Caribe: retos y oportunidades. 2020. Disponible en: <https://www.worldbank.org>

6. Singh AK. A review of wastewater irrigation: environmental implications. *Resour Conserv Recycl.* 2021;168:105454.
7. Yadav R, Joshi H, Tripathi S. Achieving sustainable agriculture with treated municipal wastewater. *Int J Biol Biomol Agric Food Biotechnol Eng.* 2015;9:644-7.
8. Sarkar S, Mandal A, Das S, Banerjee S. Decentralized wastewater treatment using low-cost biochar-based filters: a sustainable approach for rural communities. *J Water Sanit Hyg Dev.* 2020;10(4):785-95.
9. Tetteh EK, Rathilal S, Muchatibaya G, Armah EK. Low-cost sand filters for potable water supply in sub-Saharan Africa: review and recommendations. *Water Pract Technol.* 2019;14(3):648-58.
10. Ahmed MT, Gad AA, Mousa RM. Low-cost wastewater treatment technologies for improving water quality and agricultural productivity in rural Egypt. *Agric Water Manag.* 2020;242:106392.
11. González Romero AC, Guillén Ferraro ML, Cordovéz Martínez M del C, Falconí Ontaneda FF. Antimicrobial susceptibility in bacterial isolates from water and agricultural products of the Chanchán river, Chimborazo Province, Ecuador. *Salud, Ciencia y Tecnología.* 2024;4:1318.
12. Vélez Duque P, Centanaro Quiroz P, Juan Javier Martillo JJM, Alvarado Barzallo A. Preparation of a thematic map of agroecological crops using Google Earth. *Salud, Ciencia y Tecnología.* 2024;4:1018.
13. Khan S, Shahnaz M, Jehan N, Rehman S, Shah MT, Din I. Drinking water quality and human health risk in Charsadda district, Pakistan. *J Clean Prod.* 2019;208:1188-97.
14. Okumu SO, Mwangi SN, Njagi ENM, Wandiga SO. Environmental implications of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) proliferation and its control in Lake Victoria. *Environ Monit Assess.* 2018;190(6):351.
15. López-Morales CA, Sánchez-Cerón L, Romero-Fernández MG. Rural water management in Latin America: role of affordable technologies in sustainable agriculture. *J Rural Stud.* 2020;77:197-206.
16. López ME, Sánchez FG, Romero CJ. Evaluating the long-term effects of hybrid wastewater treatment technologies on rural agricultural soils. *Environ Sci Technol.* 2021;55(8):4864-73.
17. Rezanía S, Ponraj M, Din MFM, Songip AR, Sairan FM, Chelliapan S. The diverse applications of water hyacinth with main focus on sustainable energy and production for new era: an overview. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2014;41:943-54.
18. Seguil LD, Vergara AJ, Morales ER. Application of lime in heavy metal removal from industrial wastewater: a critical review. *J Environ Chem Eng.* 2022;10(1):106489.
19. Zhang Z, Chen H, Zhang W, Tian X. Decentralized wastewater treatment technologies in rural China: current status and perspectives. *J Clean Prod.* 2021; 319:128580.

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Alfredo Lesvel Castro Landin.

Curación de datos: Ángel Fortunato Bernal Alavá.

Análisis formal: Dunia Lisbet Domínguez Gálvez.

Investigación: Alfredo Lesvel Castro Landin.

Metodología: Ángel Fortunato Bernal Alavá.

Administración del proyecto: Alfredo Lesvel Castro Landin.

Validación: Dunia Lisbet Domínguez Gálvez.

Visualización: Dunia Lisbet Domínguez Gálvez.

Redacción - borrador original: Julio Cesar Pino Tarragó.
Redacción - revisión y edición: Julio Cesar Pino Tarragó.