

Evaluación comparativa de tecnologías de remediación para optimizar la calidad de aguas grises en economía circular

Comparative evaluation of remediation technologies to optimize greywater quality within a circular economy framework

Alejandro González Barbosa¹   Aaron Guerrero Campanur²  Erick Rodolfo López Almanza¹ 

¹ Tecnológico Nacional de México/ITS de Abasolo, México.

² Tecnológico Nacional de México/ITS de Uruapan, México

Resumen

Introducción: las aguas grises contienen contaminantes que alteran el equilibrio ecológico, reducen la disponibilidad de agua para usos productivos y limitan el acceso a este recurso en diversas regiones. Su tratamiento es esencial para mitigar impactos ambientales y fomentar la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Objetivo: comparar la eficiencia de la electrorremediación (ER), fitorremediación (PR) y electrofitorremediación (EPR) en el tratamiento de aguas grises bajo un enfoque de economía circular en la comunidad de Los Otates, Huanímaro, Guanajuato.

Metodología: se trataron aguas grises mediante sistemas de ER, PR y EPR, utilizando *Zantedeschia aethiopica* en PR y EPR. Se analizaron quince parámetros fisicoquímicos, incluyendo fosfatos, nitratos, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica. La eficacia del tratamiento se evaluó mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA).

Resultados: la PR alcanzó la mayor reducción del ICA (59,59%), seguida por la EPR (40,32%) y la ER (27,4%). Los procesos electrocinéticos generaron coágulos de hidróxidos de hierro y aluminio, que favorecieron la remoción de contaminantes. Los cristales de oxalato de calcio extraídos de *Z. aethiopica* se reutilizaron con fines insecticidas, reforzando el concepto de economía circular.

Conclusiones: la fitorremediación fue la tecnología más eficaz para mejorar la calidad de las aguas grises, mientras que los procesos electrocinéticos aportaron mecanismos complementarios de remoción. La combinación de tratamiento y aprovechamiento de subproductos respalda la gestión hídrica sostenible, contribuyendo a la restauración ambiental y al mejoramiento de las condiciones de vida en comunidades vulnerables.

Palabras clave: aguas Grises, Contaminantes Ambientales, *Zantedeschia aethiopica*, Oxalato de Calcio, Calidad del Agua.

Abstract

Introduction: greywater contains contaminants that disrupt ecological balance, reduce water availability for productive uses, and limit access to water in certain regions. Treating this wastewater is essential to reduce environmental impacts and promote sustainable resource management.

Objective: to compare the efficiency of electroremediation (ER), phytoremediation (PR), and electro-phytoremediation (EPR) for greywater treatment under a circular economy approach in Los Otates, Huanímaro, Guanajuato.

Methodology: greywater was treated using ER, PR, and EPR systems, with *Zantedeschia aethiopica* applied in PR and EPR. Fifteen physicochemical parameters were analyzed, including phosphates, nitrates, dissolved oxygen, pH, and electrical conductivity. Treatment performance was assessed through the Water Quality Index (WQI).

Results: PR achieved the highest WQI reduction (59.59%), followed by EPR (40.32%) and ER (27.4%). Electrokinetic processes produced iron and aluminum hydroxide coagulates, which enhanced contaminant removal. Calcium oxalate crystals recovered from *Z. aethiopica* were repurposed for insecticidal applications, reinforcing the circular economy concept.

Conclusions: Phytoremediation was the most effective technology for improving greywater quality, while electrokinetic processes provided additional removal mechanisms. The combination of treatment and resource recovery supports sustainable water management, contributing to environmental restoration and improved living conditions in vulnerable communities.

Keywords: greywater, Environmental Pollutants, *Zantedeschia aethiopica*, Calcium Oxalate, Water Quality

¿Cómo citar?

González A, Guerrero A, López ER. Evaluación comparativa de tecnologías de remediación para optimizar la calidad de aguas grises en economía circular. Ingeniería y Competitividad, 2025 27;(2):e-20514687

<https://doi.org/10.25100/iyc.v27i2.14687>

Recibido: 16-01-25

Evaluado: 11-03-25

Aceptado: 24-07-25

Online: 12-09-25

Correspondencia

erick.la@abasolo.tecnm.mx



¿Por qué se realizó?

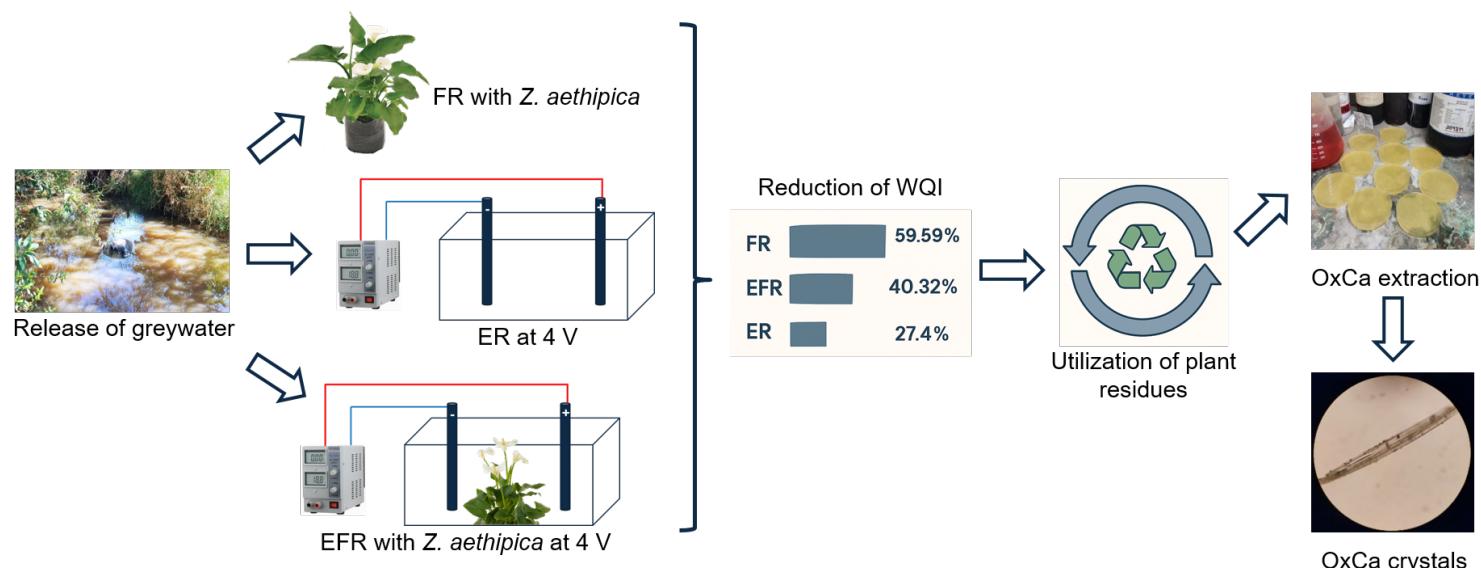
Este estudio se realizó para evaluar y comparar tres tecnologías (electrorremediación (ER), fitorremediación (FR) y electrofitorremediación (EFR)) para el tratamiento de aguas grises bajo un enfoque de economía circular, con el objetivo de mejorar la calidad del agua, promover prácticas sostenibles y explorar la reutilización de la biomasa vegetal tratada en comunidades vulnerables.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los resultados más relevantes mostraron que la FR, utilizando *Zantedeschia aethiopica*, logró la mayor eficiencia al reducir el Índice de Calidad del Agua (ICA) en un 59,59%, seguida de la EFR con una reducción del 40,32% y la ER con un 27,4%. Los procesos electrocinéticos produjeron flóculos de hidróxido de hierro y aluminio, esenciales para la eliminación de contaminantes. Además, se extrajeron cristales de oxalato de calcio de *Z. aethiopica* y se reutilizaron para uso insecticida, lo que refuerza el modelo de economía circular.

¿Qué aportan estos resultados?

Estos resultados demuestran el gran potencial de estas tecnologías (en particular, la fitorremediación) para el tratamiento de aguas grises, promoviendo a la vez la gestión sostenible de los recursos. También destacan el valor añadido de integrar los principios de la economía circular, donde la biomasa tratada puede reutilizarse para obtener beneficios económicos y ambientales, contribuyendo así a la mejora de la calidad ambiental y al bienestar de las comunidades vulnerables.



Introducción

El aumento constante de la población mundial ha traído consigo una creciente demanda de agua y, en consecuencia, un aumento de la contaminación de los recursos hídricos, lo que afecta su calidad y disponibilidad para el consumo humano. La contaminación del agua abarca alteraciones físico-químicas y biológicas de sus parámetros originales, lo que conduce a la degradación de las masas de agua y las hace tóxicas tanto para el medio ambiente como para la salud humana (1).

La industrialización y el progreso han generado un mayor consumo de agua tanto en las actividades productivas como en la vida cotidiana, mientras que los desechos sintéticos y los residuos humanos afectan negativamente la calidad de los cuerpos de agua dulce (2). Las aguas residuales que se originan en actividades domésticas, industriales y comunitarias contienen residuos líquidos y sólidos y pueden mezclarse con aguas superficiales, subterráneas o pluviales (3).

Las llamadas aguas grises provienen de duchas, bañeras, fregaderos de ropa, lavabos y fregaderos de cocina; su reutilización puede representar entre el 43% y el 70% del volumen actualmente desecharido como aguas residuales (5). Aunque contiene niveles más bajos de contaminación fecal en comparación con las aguas negras, aún presenta riesgos para la salud debido a la presencia de compuestos químicos y microorganismos patógenos (4).

Las aguas residuales se caracterizan físicamente por su contenido total de sólidos, olor, temperatura, densidad, color y turbidez (3). La materia orgánica biodegradable también afecta el color, el olor y el sabor del agua, además de promover la proliferación de microorganismos patógenos (6). Los contaminantes como el nitrógeno, el fósforo, el carbono y el oxígeno disuelto afectan la estabilidad de los ecosistemas acuáticos y la salud humana, siendo el nitrógeno y el fósforo los principales contribuyentes a la eutrofización (4).

En México, la regulación de las aguas residuales se basa en la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos y la Ley Nacional de Aguas, complementada con normas oficiales como la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la NOM-127-SSA1-2021, que establecen límites para los contaminantes. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) utiliza el Índice de Calidad del Agua (ICH) para evaluar la calidad del agua, una herramienta que expresa este parámetro de manera simplificada a través de un único valor numérico que resume la condición del agua en función de varios parámetros. Su propósito es facilitar la interpretación de la calidad del agua a través de una escala de 0 a 100 para su correcta clasificación (8).

El país enfrenta serios problemas relacionados con la contaminación de ríos, lagos y aguas subterráneas, ya que solo el 47,5% de las aguas residuales reciben un tratamiento adecuado, lo que genera impactos negativos en la salud pública y el medio ambiente (7). En Guanajuato, estos problemas se ven agravados por el crecimiento de la población, la actividad industrial y la infraestructura insuficiente, que intensifican la contaminación del suelo y los cuerpos de agua (9).

La electrorremediación y la fitorremediación son técnicas innovadoras para el tratamiento de aguas residuales. La electrorremediación utiliza energía eléctrica para inducir procesos fisicoquímicos y electroquímicos que permiten la eliminación de contaminantes. La fitorremediación utiliza plantas para eliminar o contener contaminantes del medio ambiente a través de mecanismos como la

fitoestabilización, la fitoestimulación, la fitovolatilización, la fitodegradación, la fitofiltración y la fitoextracción (10).

Zantedeschia aethiopica es una planta semiacuática originaria del sur y este de África, notable por su potencial en procesos de fitorremediación, mostrando alta capacidad para retener arsénico en estudios comparativos con otras especies. Además de su función ornamental, esta planta tiene aplicaciones potenciales como agente antialgas, bioinsecticida y en sistemas de humedales construidos diseñados para el tratamiento de aguas residuales (4).

El rápido crecimiento humano y económico, combinado con el uso inadecuado del agua, ha causado un grave deterioro de los ambientes acuáticos debido a la descarga de toneladas de sustancias biológicamente activas sin considerar sus efectos. Las aguas residuales y las aguas grises contienen contaminantes que afectan negativamente a los ecosistemas al modificar propiedades como la toxicidad, el color, el olor y el sabor del agua. Las aguas grises constituyen entre el 50% y el 80% del total de aguas residuales domésticas y no incluyen orina ni heces. A menudo se da de alta sin tener en cuenta las repercusiones ambientales (11-13).

A nivel mundial, México es el segundo mayor generador de aguas residuales y grises después de China y enfrenta serios problemas debido al tratamiento insuficiente de estas aguas. Un volumen indeterminado de agua contaminada no se recoge y termina perdido en los desagües o descargado ilegalmente, transportando patógenos, metales pesados, residuos de productos de higiene y pesticidas (45). Las fuentes de agua como los ríos y los acuíferos no pueden absorber o neutralizar esta carga contaminante, lo que las hace incapaces de mantener la vida acuática y preservar el equilibrio ecológico (14).

En Guanajuato, la contaminación de los ríos por descargas industriales y domésticas ha limitado el acceso al agua para las actividades productivas, y en algunas regiones, las aguas superficiales prácticamente no están disponibles. En la comunidad de Otates, municipio de Huanímaro, las aguas grises se descargan directamente en un arroyo local, lo que afecta el equilibrio ecológico y presenta riesgos para la salud humana.

La actividad humana ha introducido una amplia variedad de compuestos orgánicos, muchos de ellos altamente tóxicos, en los ecosistemas acuáticos, causando una contaminación significativa. El manejo inadecuado de las aguas grises y las aguas residuales fomenta la proliferación de microorganismos patógenos que pueden causar enfermedades como diarrea y gastroenteritis. Estos patógenos pueden provenir tanto de humanos como de animales infectados, que pueden ser portadores enfermos o asintomáticos (15).

Un reto importante en la gestión de las aguas grises radica en su mezcla con las aguas residuales y el tratamiento homogéneo que se da en las plantas de tratamiento. Este enfoque ignora el hecho de que las aguas grises, que tienen niveles más bajos de contaminantes, son más fáciles de tratar y reciclar. Aunque contiene microorganismos, son necesarias evaluaciones diferenciadas de riesgos para la salud, especialmente para el agua de viviendas multifamiliares (16).

Para garantizar un tratamiento eficiente y sostenible de las aguas grises, se requieren tecnologías alternativas que permitan su reutilización o vertido con buena calidad, minimizando el consumo de

energía y la generación de contaminantes secundarios (17). En este contexto, la fitorremediación surge como una solución prometedora y de bajo costo. Este método utiliza plantas para degradar, asimilar o desintoxicar metales pesados y otros contaminantes. A diferencia de las tecnologías convencionales, la fitorremediación no requiere energía adicional, es económica y ha demostrado ser eficaz para reducir la carga contaminante de las aguas residuales domésticas (18).

Entre las plantas con mayor potencial de fitorremediación se encuentra el lirio de cala (*Zantedeschia aethiopica*), una especie acuática que sobresale en procesos de fitoextracción y fitoestabilización. Varios estudios han demostrado que esta planta actúa como un adsorbente natural, eficiente y económico para metales pesados como el manganeso y funciona notablemente en el tratamiento de aguas residuales domésticas (19).

Por ejemplo, *Z. aethiopica* se ha utilizado para eliminar el arsénico del agua utilizando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal con alimentación por lotes a bajas concentraciones de arsénico ($34 \pm 11 \mu\text{g} / \text{L}$), determinando que la presencia de la planta aumentó la retención de arsénico en aproximadamente un 20% (33).

De manera similar, *Z. aethiopica*, junto con *Canna indica*, se ha estudiado en humedales artificiales a escala de laboratorio para reducir la materia orgánica (DBO, DQO y coliformes termotolerantes), con valores de reducción que oscilan entre el 85% y el 90% (34).

Además, se utiliza de forma ornamental en jardines residenciales, así como en jardines y parques públicos. También se puede utilizar como planta en maceta para embellecer patios o espacios interiores (35).

Otro uso importante identificado para *Z. aethiopica* es como bioinsecticida, debido a la presencia de compuestos químicos como el oxalato de calcio, que puede servir como mecanismo de defensa contra los herbívoros. Los cristales de oxalato de calcio se forman dentro de células especializadas llamadas idioblastos. Estos cristales están presentes en casi todas las partes de la planta, incluidas raíces, hojas, tallos, frutos, semillas, órganos florales, anteras y nódulos radiculares (36, 37).

Zantedeschia irrita la piel al contacto de manera similar a otros miembros de la familia *Araceae*, debido a la presencia de cristales de oxalato de calcio (CaOx) en forma de ráfidos (formas en forma de aguja). Los cristales de CaOx están involucrados en funciones como la regulación del pH celular, la percepción de la gravedad, el soporte mecánico y la defensa de las plantas contra los herbívoros. Los cristales en forma de aguja perforan mecánicamente a los animales que los consumen, y este efecto se ve reforzado por las toxinas proteolíticas. Se ha observado que algunas plantas producen CaOx como una respuesta de defensa inducida (23-25).

Otro uso potencial de *Z. aethiopica* es como bioindicador de la contaminación ambiental, específicamente Cr^{VI}, mostrando efectos fisiológicos inespecíficos como la inhibición y reducción del crecimiento a concentraciones de 300 mg/kg y 200 mg/kg de Cr^{VI} (38).

Se han identificado dos cicloartanos y diez esteroles en *Z. aethiopica*, junto con tres lignanos y diez fenilpropanoides, que han mostrado una buena actividad antialgal para algunos compuestos aromáticos en ensayos (39). Por lo tanto, su uso representa una alternativa viable para avanzar hacia un manejo más sostenible de las aguas contaminadas.

La economía circular es un enfoque estratégico destinado a maximizar el uso de recursos y minimizar la generación de residuos a través de la reutilización, el reciclaje y la valorización de materiales, promoviendo la regeneración de los sistemas naturales y el uso eficiente de materiales y energía (28, 29). Este modelo contrasta significativamente con el paradigma lineal tradicional de "extraer, producir y desechar", ya que prioriza la creación de circuitos cerrados que favorezcan la sostenibilidad y reduzcan el impacto ambiental (30, 31).

Se caracteriza por ser un sistema económico que reemplaza el modelo lineal incorporando prácticas como la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en todos los niveles de la cadena de producción y consumo. Su objetivo es lograr un desarrollo sostenible que beneficie a las generaciones presentes y futuras mediante el fomento de la calidad ambiental, el crecimiento económico y la equidad social (42).

La integración de la economía circular en la gestión de aguas residuales no solo contribuye a la recuperación de ecosistemas degradados, sino que también crea oportunidades económicas al transformar los residuos en recursos utilizables, promoviendo prácticas sostenibles y equitativas en las comunidades afectadas (32).

El propósito de esta investigación fue comparar las tecnologías de electrorremediación, fitorremediación y electrofitorremediación para el tratamiento de aguas grises de un arroyo en la comunidad de Los Otates, Huanímaro, Guanajuato, bajo un enfoque de economía circular, evaluando la reducción de cargas de compuestos orgánicos disueltos a través de estas técnicas, integrando *Zantedeschia aethiopica*, y utilizando de forma sostenible las plantas utilizadas después del tratamiento, promoviendo su reutilización dentro de los esquemas de economía circular.

Materiales y métodos

Muestreo de aguas grises

El estudio se realizó utilizando aguas grises de un arroyo de la comunidad de Los Otates, en el municipio de Huanímaro, Guanajuato, ubicado en la zona norte del municipio. Las aguas residuales domésticas de las actividades de limpieza doméstica en la comunidad fluyen hacia este arroyo. Entre las actividades que generan más aguas residuales domésticas se encuentran la lavandería y el lavado de platos; estas actividades se identificaron durante las visitas de reconocimiento. Por lo tanto, se realizó un muestreo representativo siguiendo el procedimiento descrito en la norma técnica PROY-NMX-AA-003-2019.

Preparación de *Z. aethiopica*

Para preparar las plantas de *Z. aethiopica*, se utilizaron ejemplares jóvenes de la especie y se colocaron en recipientes plásticos de 60 cm de altura y 25 cm de diámetro. Los recipientes se llenaron con agua sin sumergir completamente las plantas, para fomentar el desarrollo de raíces y rizomas. No se agregó tierra ni sustrato. Las plantas se mantuvieron en contenedores durante 30 días, y el agua se cambió cada dos semanas para garantizar un desarrollo adecuado.

Caracterización fisicoquímica del agua

Los siguientes parámetros del agua recolectada se determinaron utilizando el kit Backpack Lab de HANNA Instruments®: fosfatos, nitratos, CO₂, dureza total y oxígeno disuelto (OD). Para los parámetros pH, potencial de oxidación-reducción (ORP), % de saturación de oxígeno disuelto, concentración de oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), conductividad absoluta, resistividad, sólidos disueltos totales (TDS), salinidad y turbidez, se utilizó el dispositivo multiparamétrico HI9829 de HANNA Instruments®. Los valores de los parámetros se registraron para su análisis.

Diseño del tratamiento

Se establecieron los siguientes tratamientos: fitorremediación (PR), electrorremediación (ER) y la combinación de ambos, electrofitorremediación (EPR). Para el proceso de PR, los especímenes de *Z. aethiopica* *previamente preparados* se colocaron en acuarios de vidrio, que se llenaron con 2,3 litros de las aguas grises recolectadas y se colocaron en un ambiente libre de perturbaciones externas a temperatura ambiente. El tratamiento se realizó por triplicado y se mantuvo durante cinco días, monitoreando la condición física de las plantas. La Figura 1 muestra el sistema radicular y rizoma en contacto con las aguas grises durante el proceso de PR.



Figura 1. Sistema radicular y rizoma en contacto con aguas grises durante el proceso de fitorremediación. **Fuente:** Elaboración propia.

Para el proceso de ER, se utilizó una fuente de alimentación KEYSIGHT®, pinzas de cocodrilo, acuarios, electrodos de aluminio de 12,5 x 2,5 cm y 2,3 litros de aguas grises recogidas por acuario. Los electrodos se conectaron en paralelo con pinzas de cocodrilo y se mantuvieron sumergidos a un tercio de su profundidad en las aguas grises, con una corriente de 4 V suministrada en intervalos de 2 horas por día. El voltaje se mantuvo constante, el tratamiento se realizó por triplicado y duró cinco días. La Figura 2 muestra la configuración del tratamiento de emergencias.



Figura 2. Proceso de electrorremediación en funcionamiento, mostrando contacto con la corriente eléctrica y los electrodos, así como cambios iniciales en el agua. **Fuente:** Elaboración propia.

Para el proceso EPR se utilizó una fuente de alimentación KEYSIGHT®, pinzas de cocodrilo, acuarios, electrodos de aluminio de 12,5 x 2,5 cm, ejemplares de *Z. aethiopica* previamente acondicionados y 2,3 litros de aguas grises recogidas por acuario. Los electrodos se conectaron en paralelo utilizando las pinzas de cocodrilo y se aplicó una corriente de 4 V durante 2 horas al día, manteniendo tanto las plantas como los electrodos sumergidos a un tercio de su profundidad en las aguas grises. El tratamiento se realizó por triplicado y duró cinco días. La Figura 3 muestra la configuración del tratamiento EPR.



Figura 3. Configuración de los elementos en el proceso de electrofitorremediaciación. **Fuente:** Autores

Monitoreo de *Zantedeschia aethiopica*

Durante los tratamientos PR y EPR, se analizaron los cambios en el color de las hojas. Las hojas completamente desarrolladas de las plantas acondicionadas se seleccionaron como controles debido a su color estable y se utilizaron como referencia. La observación regular de las hojas permitió identificar cualquier cambio en el color, lo que podría indicar posibles problemas con la salud de la planta.

También se realizaron recuentos periódicos de hojas en los *especímenes de Z. aethiopica* utilizados en los tratamientos. Se registró el número de hojas visibles completamente desarrolladas en cada planta, y las hojas subdesarrolladas se monitorearon e incluyeron en el conteo una vez que alcanzaron el desarrollo completo. Este seguimiento ayudó a evaluar la adaptación y la salud de las plantas.

La visualización de las raíces se realizó inspeccionando el número y el estado general de las raíces durante los períodos de tratamiento. Las plantas fueron examinadas en busca de signos de desprendimiento, rotura, pudrición y crecimiento de nuevas raíces. Esta evaluación se llevó a cabo al principio y al final de cada tratamiento para monitorear el desarrollo y la salud de las raíces.

Observación de coagulados

Después de completar los tratamientos electrocinéticos (ER y EPR), se monitoreó la formación de coagulación con un microscopio Zuzi® y las imágenes se registraron con el software ISCapture®.

Se seleccionaron y observaron coagulados representativos de cada tratamiento electrocinético con un aumento de 40x, y se realizó documentación fotográfica.

Cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA)

Para calcular el ICM se utilizó la metodología propuesta para el Índice de Brown (43). Esta es una variación del índice NSF (*National Sanitation Foundation*), que utiliza nueve parámetros y una media geométrica ponderada para resumir y simplificar toda la información disponible sobre la calidad del agua en un solo valor numérico (40). Este índice se desarrolló para determinar el ICM de ríos y arroyos (41), lo que lo hace adecuado para este estudio. Además, el Índice de Brown permite utilizar un mayor número de parámetros en el cálculo del WQI, por lo que se adaptó a los quince parámetros fisicoquímicos analizados en este estudio: pH, EC, TDS, dureza total, nitratos, fosfatos, turbidez, CO₂, DO, mVpH, ORP, % DE SATURACIÓN DE DO, conductividad absoluta, resistividad y salinidad.

Los valores de referencia estándar para estos parámetros se establecieron de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la NOM-127-SSA1-2021. El valor WQI resultante se comparó con una escala que va de cero a más de cien, como se ilustra en la Tabla 1, clasificando la calidad del agua en niveles que van desde excelente, bueno, pobre, muy pobre hasta no apto para el consumo humano. Este procedimiento se llevó a cabo para cada uno de los tratamientos.

Tabla 1. Valores del Índice de Calidad del Agua propuestos por Brown (44).

Gama	Estado
0-25	Excelente
26-50	bien
51-75	pobre
76-100	Pobretón
100	Inseguro para el consumo

Extracción de oxalato de calcio de *Z. aethiopica*

Después de completar los tratamientos PR y EPR, se recolectaron 300 g de partes frescas de *Z. aethiopica*, como hojas, tallos y rizomas, que se sabe que acumulan CaOx. A continuación, se molieron hasta obtener una pasta homogénea, que se mezcló con 500 mL de agua destilada y se agitó durante 30 minutos a temperatura ambiente. La mezcla se filtró para separar los sólidos de la solución líquida y se concentró a 300 ml a 50 °C utilizando una caldera doble. Para precipitar el CaOx, el pH de la solución concentrada se ajustó a 4-5 utilizando ácido acético glacial y ácido nítrico concentrado. La solución ajustada se dejó reposar en placas de Petri durante 24 horas a temperatura ambiente para permitir la formación de cristales de CaOx. Los cristales formados se observaron bajo un microscopio Zuzi® con un aumento de 50x y las imágenes se registraron utilizando el software ISCapture®.

Resultados y discusión

Resultados de WQI después de los tratamientos

De acuerdo con la caracterización de las aguas grises se detectó un alto nivel de contaminantes orgánicos, comprometiendo el equilibrio ecológico. Los niveles de nitrato y fosfato excedieron los límites establecidos por la normativa ambiental mexicana hasta en un 400%. Estos contaminantes promueven el crecimiento de algas al reducir los niveles de oxígeno en el agua y causar eutrofización.

En la Tabla 2 se muestran los resultados del ICM antes y después de los tratamientos. El ICA del agua no tratada (241,97) indica una calidad del agua muy deficiente y altos niveles de contaminación, lo que significa que no es apta para el consumo humano. Después del proceso de RE, se observó una disminución en el ICM, alcanzando un valor de 175,65. En el caso de la RP, el ICM disminuyó a 97,77, cambiando la clasificación de agua no apta para el consumo humano a agua muy pobre. Finalmente, la combinación de ambos procesos, EPR, resultó en un WQI de 144.39. Los tres tratamientos muestran mejoras, aunque sigue habiendo una contaminación significativa, que excede la escala de ponderación de Brown. Sin embargo, estos valores son notablemente más bajos que el WQI del agua no tratada.

Tabla 2. Resultados de WQI después de los tratamientos

Resultados generales de WQI					
PARÁMETROS	Valor estándar	Control (sin tratar)	Sala de emergencias	PR	EPR
pH	8,5 unidades de pH	6.61	8.6	7.46	7.72
EC	300 μ S/cm	1171.28	1478.33	1050	1055
TDS	1000 mg/L	584.142	740.33	523.6	528
Dureza total	500 mg/L	157.52	108.3	178	170
Nitratos	11 mg/L	30.95	10	10	10
Fosfatos	1 mg/L	4.61	3.3	3	5
Turbidez	3 NTU	42.428	31.33	1.9	4.7
CO ₂	10 mg/L	90.47	0	51	43.8
Oxígeno disuelto	6 mg/L	4.75	1.82	4.6	2.25
mVpH	8,5 unidades de pH	31.91	25.83	2.466	4.1
ORP	200 mV	64.68	77.9	71.2	66.83
% de saturación de D.O.	80 %	31.7	31.7	31.7	31.7
Conductividad absoluta	50 μ S/cm	864.14	1422	786.6	1046
Resistividad	0,5 mil Ω ·cm	0.00087	0.0007	0.00093	0.000936
Salinidad	0,99 g/L	0.58	0.74	0.52	0.52
WQI		241.97	175.65	97.77	144.39

Fuente: Autores

En la Figura 4 se muestran los porcentajes finales de cada uno de los tratamientos desarrollados. Se puede observar que el tratamiento de RP logró la mayor reducción de WQI (59,6%), seguido de EPR con una disminución de 40,33% y finalmente ER con una reducción de 27,41%.

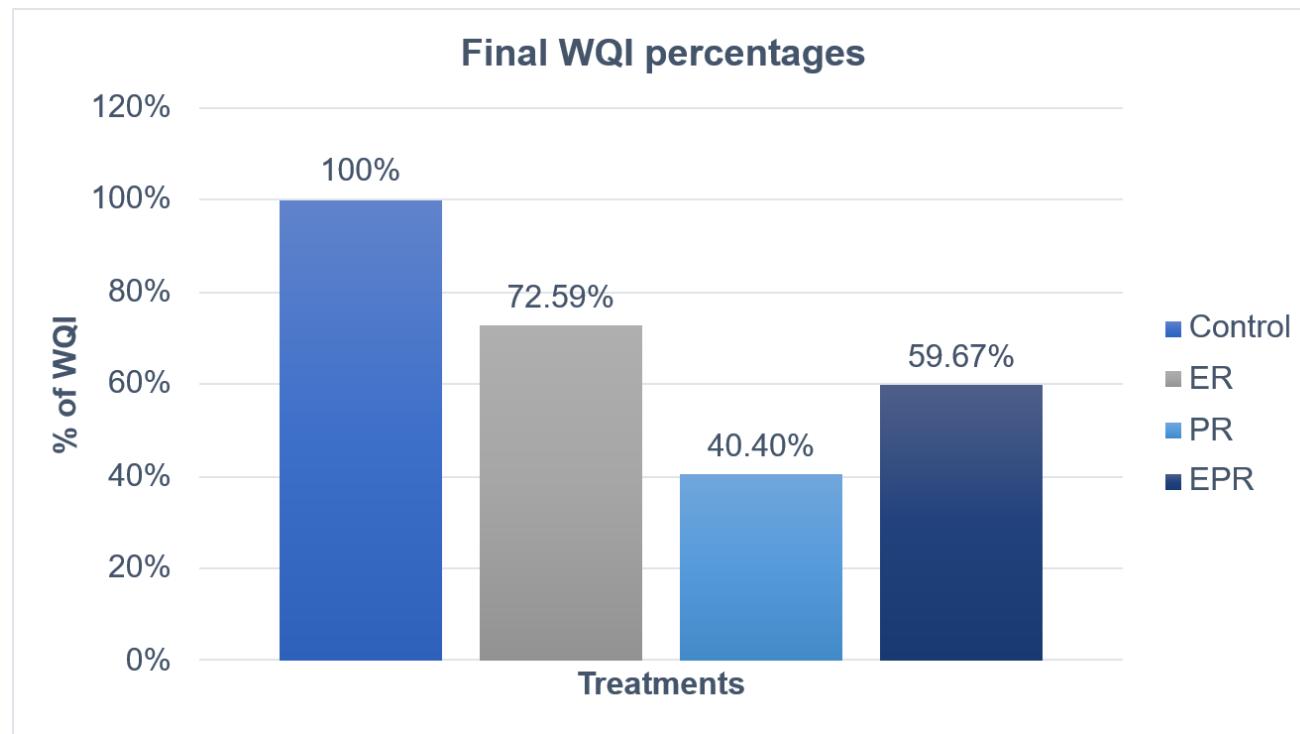


Figura 4. Porcentaje final para cada uno de los tratamientos desarrollados. **Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo con estos resultados, el proceso de RP es el más adecuado, ya que mostró una reducción del 59,59% en el ICM en comparación con el agua no tratada, seguido por el tratamiento EPR, con una disminución del 40,32%, y finalmente, el RE logró una reducción del 27,4% en el IC. Sin embargo, algunos parámetros, como pH, CE, conductividad absoluta, TDS, dureza, ORP, resistividad y salinidad, mostraron aumentos significativos.

En el caso del aumento del pH, esto puede deberse a la formación de hidróxidos metálicos durante los procesos electrocinéticos, debido a las reacciones asociadas con el desgaste de los electrodos (20). Además, el pH puede aumentar en aguas residuales ácidas pero disminuir en aguas alcalinas (21), mientras que el aumento de la CE y la conductividad absoluta en el RE podría atribuirse a la presencia de electrolitos como NaCl o CaCl₂, la generación de iones o la electrólisis de sales disueltas (20).

El aumento de TDS en el proceso ER puede deberse a la generación de iones, que, cuando se agregan al agua como sólidos disueltos, son producidos por la corriente eléctrica aplicada a los electrodos de aluminio. Asimismo, la formación de coagulados puede contribuir al aumento de sólidos disueltos. Por otro lado, el aumento de la dureza total y el ORP podría ser el resultado de la liberación de iones de aluminio (22), que pueden reaccionar con otras especies químicas en el agua, como el calcio y el magnesio.

Del mismo modo, el aumento de la resistividad podría atribuirse a la formación de hidróxidos de aluminio, que pueden reaccionar con los iones de calcio y magnesio presentes en el agua. Además, un aumento en el pH puede estar directamente relacionado con un aumento en este parámetro. Finalmente, la formación de coagulados podría tener un efecto concentrador sobre las sales del agua, lo que explica el aumento de la salinidad.

Resultados del monitoreo de *Zantedeschia aethiopica*

El color de las hojas pasó de un verde vibrante y brillante en los controles no tratados, lo que indica una buena salud de la planta, a una ligera pérdida de color y brillo después del proceso de RP, aunque no se observaron cambios significativos. Después de EPR, las hojas adquirieron un tono verde más profundo con brillo reducido y mayor saturación en un tono verde mate, lo que sugiere un debilitamiento debido a la exposición a ambos tratamientos. Estos cambios se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cambios en la coloración de las plantas a lo largo de los procesos.

Evidencia del color de las hojas después de los tratamientos.			
Registro fotográfico			
Proceso	Untreated	PR	EPR

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el recuento de hojas de las plantas utilizadas en los tratamientos al final de los procesos mostró variaciones significativas, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Variables en el número de hojas a lo largo de los procesos.

Proceso	Número de hojas en especímenes de <i>Zantedeschia aethiopica</i>		
	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3
Control	3	3	4
Después de PR	2	3	3
Antes de EPR	1	4	3

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a las raíces, los cambios se documentan en la Tabla 5. Las raíces registradas en los especímenes de control parecían sanas, de color blanco y grosor firme. Sin embargo, después del tratamiento PR, hubo una reducción en el número de raíces sanas y se observó un cambio de

color, volviéndose amarillento. Por otro lado, con el tratamiento EPR, aunque el número de raíces disminuyó inicialmente al inicio del proceso, las raíces restantes mostraron adaptabilidad al final del tratamiento, desarrollando un mayor número de nuevas raíces.

Tabla 5. Cambios en las raíces a lo largo de los procesos

Cambios de raíz durante los procesos			
Registro fotográfico	Untreated	PR	EPR
Proceso	Untreated	PR	EPR
			

Fuente: Elaboración propia

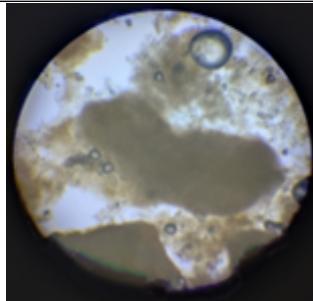
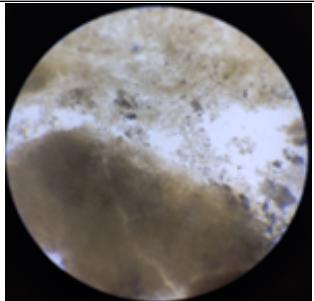
Resultados de coagulación

En las Tablas 5 y 6 se muestran los coagulados obtenidos después de los procesos ER y EPR, junto con detalles estructurales de su morfología. Los coagulados generados exhibieron una estructura irregular y amorfía, con tonos de color que van desde el marrón rojizo hasta el blanco grisáceo. Esta coloración se atribuye a la presencia de iones de hierro y aluminio, respectivamente. En ambos procesos, ER y EPR, predominó el color blanco grisáceo, lo que probablemente se deba al desgaste de los electrodos de aluminio utilizados durante los tratamientos. Tabla 7.

Es importante tener en cuenta que los coagulados más comunes generados en los procesos electrocinéticos son los hidróxidos de hierro y aluminio. Estos iones, liberados durante las reacciones, forman largas cadenas de polihidróxidos, que juegan un papel fundamental en la eliminación de contaminantes presentes en el agua (26).

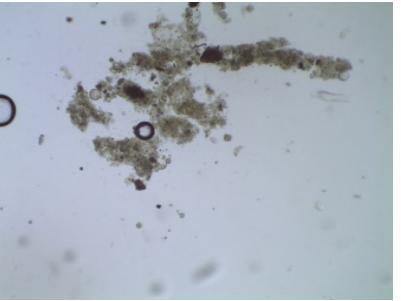
La eliminación de contaminantes ocurre principalmente a través de dos mecanismos: la complejación química, donde los contaminantes se unen a los hidróxidos, y la atracción electrostática, que permite la captura de partículas cargadas (27).

Tabla 6. Coagulados generados después de la RE.

Coagula como resultado de la sala de emergencias			
Repetición	1	2	3
Registro de aumento de 40x			
Características	Formas redondas y agrupadas, predominantemente de color blanco grisáceo	Racimos grandes con estructura débil, predominantemente de color marrón rojizo	Múltiples estructuras pequeñas con alta firmeza, de color marrón rojizo y blanco grisáceo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Coagulados generados después de EPR.

Coagula como resultado de EPR			
Repetición	1	2	3
Registro de aumento de 40x			
Características	Pocas formas conglomeradas, predominantemente de color blanco grisáceo	Uniones pequeñas y débiles, predominantemente de color blanco grisáceo	Estructuras pequeñas y dispersas, de color marrón rojizo y blanco grisáceo

Fuente: Elaboración propia.

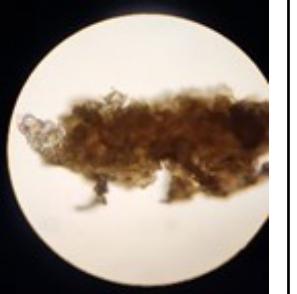
Obtención de CaOx

Después de la extracción de CaOx se obtuvo una solución líquida ligeramente turbia con cristales suspendidos visibles. Las características de estos cristales se detallan en la Tabla 8, donde se identifica la formación de estructuras con diversas morfologías, incluyendo estiloides, rápidos y drusas, que exhiben formas alargadas y esféricas.

La Figura 5 ilustra el material particulado predominante, compuesto principalmente por cristales más pequeños. Esta complejidad en las estructuras cristalinas sugiere variabilidad en

los mecanismos de formación y crecimiento de cristales, que pueden estar influenciados por las condiciones utilizadas durante el proceso de extracción.

Tabla 8. Cristales de CaOx

Cristales resultantes			
Recipientes	1	2	3
Registro de aumento de 50x			
Características	Cristales con forma de aguja similar al raphides (sabers)	Cristales estiloides	Cristales agrupados con forma de drusa

Fuente: Elaboración propia.

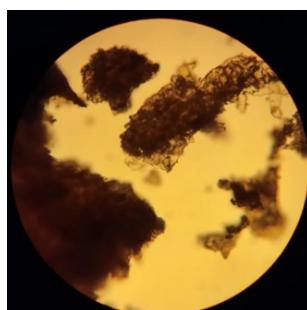


Figura 5. Cristales de CaOx con formas drusas. **Fuente:** Elaboración propia.

Conclusiones

Esta investigación permitió una comparación exhaustiva de las tecnologías de electrorremediación, fitorremediación y electrofitorremediación para el tratamiento de aguas grises bajo un enfoque de economía circular.

Los resultados mostraron que la fitorremediación con *Zantedeschia aethiopica* fue la técnica más efectiva, reduciendo el índice de calidad del agua en casi un 60%. Este hallazgo se alinea con estudios anteriores que destacan el potencial de las plantas para eliminar contaminantes de las aguas residuales (34, 35).

La eficiencia de la fitorremediación en este estudio puede explicarse por la capacidad intrínseca de *Z. aethiopica* para adsorber y asimilar metales pesados y otros compuestos orgánicos. Investigaciones anteriores han demostrado que las plantas con alta biomasa y sistemas radiculares

bien desarrollados pueden actuar como filtros naturales y agentes de extracción (23). Sin embargo, la variabilidad natural en el crecimiento y la salud de las plantas podría conducir a diferencias en el rendimiento del proceso, lo que podría afectar la reproducibilidad en condiciones reales si los parámetros para el acondicionamiento de las plantas no están estandarizados y controlados.

Del mismo modo, la combinación de técnicas en electrofitorremediación también demostró ser efectiva, mostrando un rendimiento intermedio entre los tratamientos individuales. Esta combinación aprovecha el potencial sinérgico de ambos métodos; Sin embargo, la interacción entre la corriente aplicada y la viabilidad de la planta podría presentar desafíos que deben considerarse para aplicaciones en el mundo real. Algunos estudios indican que la exposición prolongada a corrientes eléctricas puede inducir estrés en la biomasa vegetal, afectando la capacidad de absorción de contaminantes (20). Por lo tanto, es necesario optimizar los parámetros operativos como la intensidad y la frecuencia de la corriente para minimizar los efectos adversos en el proceso.

Por otro lado, la electrorremediación mostró resultados más limitados en términos de eficiencia, pero no menos relevantes. Este menor rendimiento puede deberse en parte al desgaste de los electrodos de aluminio, que pueden liberar iones que reaccionan con otros compuestos en el agua, influyendo en parámetros como la dureza, el ORP y la salinidad. Investigaciones anteriores han demostrado que la degradación de los electrodos puede generar subproductos indeseables y limitar la aplicación a gran escala de esta tecnología (22, 26).

Más allá de los resultados técnicos esta investigación demuestra que la adopción de tecnologías sostenibles como ER, PR y EPR no solo ayuda a mitigar la contaminación del agua, sino que también genera impactos económicos y sociales positivos en comunidades de recursos limitados. En este sentido, la economía circular promueve modelos de producción centrados en el uso eficiente de los recursos y la regeneración de los sistemas naturales a través de circuitos cerrados (31). Esta visión se ve reforzada por el argumento de que la descentralización tecnológica fomenta la equidad social y el empoderamiento de la comunidad (29), destacando el papel clave de las soluciones circulares en la educación ambiental y la transición hacia modelos de desarrollo resilientes y sostenibles (32).

Además, la utilización sostenible de las plantas utilizadas en estos procesos sienta las bases para su reutilización en marcos de economía circular, fortaleciendo el potencial de estas tecnologías como alternativas ecológicas y sostenibles para la gestión de aguas residuales.

La implementación de estas técnicas no solo contribuirá a mejorar la calidad del agua, sino que también promoverá prácticas más responsables y sostenibles para abordar la contaminación del agua en comunidades vulnerables como Los Otates en Huanímaro, Guanajuato. Las técnicas desarrolladas en esta investigación podrían implementarse en sistemas modulares como unidades de tratamiento adaptadas a los volúmenes de agua generados en las comunidades. Además, estos sistemas podrían integrarse con fuentes de energía renovables, como paneles solares, para alimentar sistemas de tratamiento electrocinético y reducir la dependencia de la energía convencional.

Asimismo, se podría involucrar a los miembros de la comunidad a través de talleres de capacitación centrados en el mantenimiento y monitoreo de los sistemas de tratamiento para fomentar la autogestión de las aguas grises. En este contexto, se podrían incluir módulos sobre economía

circular, destacando la reutilización de la biomasa utilizada en tratamientos para producir bioinsecticidas y generar beneficios económicos para los miembros de la comunidad. Estos hallazgos subrayan la importancia de continuar explorando enfoques innovadores que integren los principios de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Erick Rodolfo López Almanza, Alejandro González Barbosa Curación de datos, Conceptualización – Ideas, Análisis formal, Adquisición de financiación. Aarón Guerrero Campanur, Investigación, Metodología: Alejandro González Barbosa. Administración de proyectos. Recursos, Supervisión, Visualización – Preparación.

Financiación: no declara. Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

Referencias

1. Bashir I, Lone F, Ahmad R, Mir S, Dar Z, Ahmad S. Preocupaciones y amenazas de contaminación en los ecosistemas acuáticos. En: Rehman R, Ahmad R, Qadri H, editores. Biorremediación y Biotecnología [Internet]. Springer Nature Switzerland AG; 2020 [citado el 18 de agosto de 2025]. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0_1
2. Ejiohuo O, Onyeaka H, Akinsemolu A, Nwabor OF, Siyanbola KF, Tamasiga P, et al. Garantizar la pureza del agua: mitigar los riesgos ambientales y salvaguardar la salud humana. Biología y seguridad del agua [Internet]. 20 de diciembre de 2024 [citado el 18 de agosto de 2025]; 4(2):100341. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2024.100341>
3. Manasa RL, Mehta A. Aguas residuales: fuentes de contaminantes y su remediación. En: Gothandam K, Ranjan S, Dasgupta N, Lichtfouse E, editores. Biotecnología ambiental. Vol. 2. Química ambiental para un mundo sostenible, vol 45. Cham: Springer; 2020 [citado el 18 de agosto de 2025]. págs. 197–219. https://doi.org/10.1007/978-3-03-38196-7_9
4. Van de Walle A, Kim M, Alam MK, Wang X, Wu D, Dash SR, et al. La reutilización de aguas grises como un facilitador clave para mejorar la gestión de las aguas residuales urbanas. Ciencia Ambiental y Ecotecnología [Internet]. 1 de octubre de 2023 [citado el 18 de agosto de 2025]; 16:100277. <https://doi.org/10.1016/j.jese.2023.100277>
5. Bautista MI, Rodríguez DA, Castañeda IE, González M, Escalante JE. Tratamiento de aguas grises para viviendas de interés social popular. Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI [Internet]. 2023 Nov 20 [cited 2025 Aug 18]; 11(Especial3):151-6. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial3.11509>
6. Li B, Feng L, Chouari R, Samoili S, Giannakis S. Los metales traza inducen riesgo microbiano y resistencia antimicrobiana en la biopelícula en el agua potable. npj Agua limpia [Internet]. 3 de febrero de 2025 [citado el 18 de agosto de 2025]; 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-025-00436-8>
7. Tabla-Vázquez CG, Chávez-Mejía AC, Orta Ledesma MT, Ramírez-Zamora RM. Tratamiento de aguas residuales en México. En: Recursos hídricos mundiales [Internet]. Cham: Springer; 2020 [citado el 19 de agosto de 2025]. https://doi.org/10.1007/978-3-03-40686-8_8
8. Kumar D, Kumar R, Sharma M, Awasthi A, Kumar M. Índices globales de calidad del agua: desarrollo, implicaciones y limitaciones. Avances del entorno total [Internet]. 1 de marzo de 2024 [citado el 19 de agosto de 2025]; 9:200095. <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2023.200095>

9. Barrantes Barrantes EA, Cartín Nuñez M. Eficacia del tratamiento de aguas residuales de la Universidad de Costa Rica en la Sede de Occidente, San Ramón, Costa Rica. *UNED Research Journal* [Internet]. 2017 Mar 14 [cited 2025 Aug 15]; 9(1):193-7. <http://dx.doi.org/10.22458/urj.v9i1.1697>
10. Awa SH, Hadibarata T. Eliminación de metales pesados en suelos contaminados mediante un mecanismo de fitorremediación: una revisión. *Contaminación del agua, el aire y el suelo* [Internet]. 21 de enero de 2020 [citado el 15 de agosto de 2025]; 231(2). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4426-0>
11. Wang F, Xiang L, Sze-Yin Leung K, Elsner M, Zhang Y, Guo Y, et al. Contaminantes emergentes: una perspectiva de una sola salud. *La innovación* [Internet]. 1 de julio de 2024 [citado el 15 de agosto de 2025]; 5(4):100612. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100612>
12. Khajvand M, Mostafazadeh AK, Drogui P, Tyagi RD. Gestión de aguas grises: impacto ambiental, tratamiento, recuperación de recursos, reciclaje de agua y descentralización. *Ciencia y Tecnología del Agua* [Internet]. 28 de julio de 2022 [citado 15 de agosto de 2025]; 86(5):909-37. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.226>
13. Budeli P, Sibali LL. Reutilización de aguas grises: perfil de contaminantes, implicaciones para la salud y soluciones sostenibles. *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública* [Internet]. 7 de mayo de 2025 [citado el 21 de agosto de 2025]; 22(5):740. <https://doi.org/10.3390/ijerph22050740>
14. Chakraborty SK. Contaminación y perturbación de los ríos: perspectivas y procesos. En: *Ecología fluvial*. Vol. 2. Cham: Springer; 2021 [citado el 15 de agosto de 2025]. págs. 443-530. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53941-2_5
15. Velázquez-Chávez L, Ortiz-Sánchez I, Chávez-Simental J, Pámanes-Carrasco G, Carrillo-Parra A, Pereda-Solís M. Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP Revista especializada en ciencias químico-biológicas* [Internet]. 2022 Jan 1 [cited 2025 Aug 18]; 25:1-13. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>
16. Perez C, Maquera C. Tratamiento de aguas grises automotrices con lechos filtrantes de cáscara de maíz y bagazo. *Sciencevolution* [Internet]. 2024 Dec 5 [cited 2025 Aug 21]; 4(12):170-80. <https://doi.org/10.61325/ser.v4i12.140>
17. Silva JA. Tratamiento y reutilización de aguas residuales para la gestión sostenible de los recursos hídricos: una revisión sistemática de la literatura. *Sostenibilidad* [Internet]. 1 de enero de 2023 [citado el 22 de agosto de 2025]; 15(14):1-31. <https://doi.org/10.3390/su151410940>
18. Ansari A, Naeem M, Gill S, AlZuaibr F. Fitorremediación de aguas contaminadas: una tecnología ecológica basada en la aplicación de macrófitos acuáticos. *La Revista Egipcia de Investigación Acuática* [Internet]. 1 de diciembre de 2020 [citado el 20 de agosto de 2025]; 46(4):371-6. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2020.03.002>
19. Nuñez E, Saboya N, Cruz M. Fitorremediación a través de las especies palustre y flotantes, *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domésticas en el área de la región natural Quechua-Cajamarca. *Revista de Investigación Ciencia Tecnología y Desarrollo* [Internet]. 18 de diciembre de 2019 [citado el 21 de agosto de 2025]; 5(2). <https://doi.org/10.17162/rictd.v5i2.886>
20. Rodríguez Díaz YJ, Fuentes Guevara MD, Beleño Díaz ÓD, Montoya Armenta LH. Electrocoagulación como proceso de tratabilidad de aguas residuales de una planta de lácteos y lácteos. *Tecnura* [Internet]. 2021 Jan 1 [cited 2025 Aug 21]; 25(67):26-39. <https://doi.org/10.14483/22487638.15769>
21. Ebba M, Asaithambi P, Alemayehu E. Desarrollo del proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales: optimización mediante metodología de superficie de respuesta.

- Heliyon [Internet]. mayo de 2022 [citado el 20 de agosto de 2025]; 8(5):E09383. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09383>
22. Kashi G. Proceso de electrocoagulación/flotación para eliminar el cobre de un ambiente acuoso. Informes científicos [Internet]. 16 de agosto de 2023 [citado el 21 de agosto de 2025]; 13(1):13334. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40512-y>
23. Tawfik E, Fathy M, Albalawi D, Aljuaid B, Eldin D, Mahmoud S, et al. Identificación molecular del cultivo de Zantedeschia con determinación de sus actividades morfométricas y metabólicas para la aclimatación mediterránea. Plantas [Internet]. 3 de septiembre de 2022 [citado el 15 de agosto de 2025]; 11(17):2311. <https://doi.org/10.3390/plants11172311>
24. Nakata P. Avances en nuestra comprensión de la formación y función de cristales de oxalato de calcio en las plantas. Ciencia de las plantas [Internet]. junio de 2003 [citado el 20 de agosto de 2025]; 164(6):901–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00120-1)
25. Retana Sánchez K, Castro Zúñiga O, Blanco Meneses M. Determinación de la presencia de cristales de oxalato de calcio asociados a la enfermedad abiótica conocida como “Mancha Blanca” en *Hylocereus costaricensis*. Agronomía Costarricense [Internet]. 2019 Jul 1 [cited 2025 Aug 21]; 43(2). <https://doi.org/10.15517/rac.v43i2.37950>
26. Solís-Marcial OJ, Talavera-López A, Ruelas-Leyva JP, Hernández-Maldonado JA, Nájera-Bastida A, Zárate-Gutiérrez R, et al. Clarificación del agua de proceso minero mediante electrocoagulación. Minerales [Internet]. 17 de abril de 2024 [citado 21 de agosto de 2025]; 14(4):412. <https://doi.org/10.3390/min14040412>
27. Boinpally S, Kolla A, Kainthola J, Kodali R, Vemuri J. Una revisión del estado del arte de la tecnología de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales. Ciclo del agua [Internet]. Enero de 2023 [citado el 20 de agosto de 2025];4. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>
28. Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken NMP, Hultink EJ. La economía circular: ¿un nuevo paradigma de sostenibilidad? Revista de Producción Más Limpia [Internet]. 1 de febrero de 2017 [citado el 21 de agosto de 2025]; 143(1):757–68. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
29. Kirchherr J, Reike D, Hekkert M. Conceptualización de la economía circular: un análisis de 114 definiciones. Recursos, Conservación y Reciclaje [Internet]. diciembre de 2017 [citado el 21 de agosto de 2025]; 127(1):221–32. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
30. Ghisellini P, Cialani C, Ulgiati S. Un repaso a la economía circular: la transición esperada hacia una interacción equilibrada de los sistemas medioambientales y económicos. Revista de Producción Más Limpia [Internet]. febrero de 2016 [citado el 21 de agosto de 2025]; 114(7):11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
31. Korhonen J, Nuur C, Feldmann A, Birkie SE. La economía circular como concepto esencialmente controvertido. Revista de Producción Más Limpia [Internet]. febrero de 2018 [citado el 21 de agosto de 2025]; 175(175):544–52. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111>
32. Bocken NMP, de Pauw I, Bakker C, van der Grinten B. Diseño de productos y estrategias de modelos de negocio para una economía circular. Revista de Ingeniería Industrial y de Producción [Internet]. 26 de abril de 2016 [citado 21 de agosto de 2025]; 33(5):308–20. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
33. Zurita F, Del Toro-Sánchez CL, Gutierrez-Lomelí M, Rodriguez-Sahagún A, Castellanos-Hernandez OA, Ramírez-Martínez G, et al. Estudio preliminar sobre el potencial de eliminación de arsénico mediante mesocosmos construidos de flujo subsuperficial. Ingeniería Ecológica [Internet]. octubre de 2012 [citado el 21 de agosto de 2025]; 47:101–4. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.018>

34. Sandoval L, Zamora-Castro S, Vidal-Álvarez M, Marín-Muñiz J. Papel de las plantas de humedales y el uso de plantas con flores ornamentales en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales: una revisión. *Ciencias Aplicadas* [Internet]. 17 de febrero de 2019 [citado 21 de agosto de 2025]; 9(4):685. <https://doi.org/10.3390/app9040685>
35. Maroyi A. *Zantedeschia aethiopica* (L.) Spreng.: una revisión de sus usos medicinales, fitoquímica y actividades biológicas. *Revista Asiática de Investigación Farmacéutica y Clínica* [Internet]. 24 de junio de 2019 [citado 21 de agosto de 2025]; 12(8):30–6. <https://doi.org/10.22159/ajpcr.2019.v12i18.34353>
36. Paiva ÉAS. ¿Los cristales de oxalato de calcio protegen contra la herbivoría? *Naturwissenschaften* [Internet]. 27 de mayo de 2021 [citado 21 de agosto de 2025]; 108(3):24. <https://doi.org/10.1007/s00114-021-01735-z>
37. Franceschi VR, Nakata PA. Oxalato de calcio en plantas: formación y función. *Revisión anual de biología vegetal* [Internet]. junio de 2005 [citado el 21 de agosto de 2025]; 56(1):41–71. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144106>
38. Beltrán-Dávalos A, Rosero-Erazo C, Cargua F, Echeverría M. Potencial de *Zantedeschia aethiopica* L. para la rehabilitación de suelos contaminados con cromo hexavalente en zonas alto andinas de Ecuador. *Acta Agronómica* [Internet]. 2019 [cited 2025 Aug 21]; 68(2):92–8. <https://doi.org/10.15446/acag.v68n2.77859>
39. Tsiftsoglou OS, Stefanakis MK, Lazari DM. Componentes químicos aislados de los rizomas de *Helleborus odorus* subsp. *cyclophyllus* (Ranunculaceae). Sistemática bioquímica y ecología [Internet]. 30 de abril de 2018 [citado 21 de agosto de 2025]; 79:8–11. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2018.04.010>
40. Méndez-Zambrano PV, Arcos-Logroño JP, Cazorla-Vinueza XR. Determinación del índice de calidad del agua (NSF) del río Copuено ubicado en Cantón Morona. Dominio de las Ciencias [Internet]. 2020 Jun 25 [cited 2025 Aug 21]; 6(2):734–46. <https://doi.org/10.23857/dc.v6i2.1245>
41. Pérez JI, Nardini AG, Galindo AA. Análisis comparativo de índices de calidad del agua aplicados al río Ranchería, La Guajira-Colombia. *Información Tecnológica* [Internet]. 2018 Jun [cited 2025 Aug 21]; 29(3):47–58. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000300047>
42. Chirumalla K, Balestrucci F, Sannö A, Oghazi P. La transición de una economía lineal a una circular a través de un marco de preparación multinivel: un estudio exploratorio en la industria de fabricación de vehículos pesados. *Revista de Innovación y Conocimiento* [Internet]. 24 de agosto de 2024 [citado el 21 de agosto de 2025]; 9(4):100539. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100539>
43. Uddin MdG, Nash S, Olbert AI. Una revisión de los modelos de índice de calidad del agua y su uso para evaluar la calidad del agua superficial. *Indicadores ecológicos* [Internet]. marzo de 2021 [citado el 2 de septiembre de 2025]; 122(107218):107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
44. Marrón AW. El papel del gobierno en el fomento de la investigación en la industria. *Revista Australiana de Administración Pública* [Internet]. 1 de diciembre de 1970 [citado el 3 de septiembre de 2025]; 29(4):339–55. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8500.1970.tb00199.x>
45. Abou-Shady A, Saboor Siddique M, Yu W. Una revisión crítica del progreso reciente en la reutilización mundial del agua durante 2019-2021 y las perspectivas para superar futuras crisis del agua. *Entornos* [Internet]. 14 de septiembre de 2023 [citado el 2 de septiembre de 2025]; 10(9):159–9. <https://doi.org/10.3390/environments10090159>