




Métodos de remoción de sulfatos y cloruros en aguas residuales: revisión sistemática

Methods for removing sulfates and chlorides from wastewater: A systematic review

Edinson Fabián Monroy Ávila ¹, David Ricardo Díaz Guevara², Fernando Fernández Romero ³ y Dora Luz Gómez Aguilar ⁴

Fecha de Recepción: 9 de junio de 2025

Fecha de Aceptación: 17 de septiembre de 2025


Cómo citar: E. Monroy-Ávila, D. Díaz-Guevara, F. Fernández-Romero, F., y D. Gómez-Aguilar, "Métodos de remoción de sulfatos y cloruros en aguas residuales: revisión sistemática", *Tecnura*, 29(85), 173-202. <https://doi.org/10.14483/22487638.23708>


Resumen


Este estudio tiene como objetivo revisar las técnicas convencionales y emergentes para la remoción de aniones sulfatos y cloruros en aguas residuales, por medio de una metodología cualitativa basada en una revisión sistemática de contenido, a partir de bases de datos como Latindex, Scopus y Ebsco. Los resultados muestran que los métodos de adsorción, como el uso de carbón activado, zeolitas y resinas de intercambio iónico, son los más empleados, debido a su simplicidad operativa y eficacia en el tratamiento de grandes volúmenes de agua. Adicionalmente, las técnicas de biorremediación con algas y bacterias han mostrado ser una alternativa viable con menor impacto ambiental. En términos de eficiencia, quimisorción y electrocoagulación se destacan por lograr tasas de remoción superiores al 90 % de estos iones. Estas tecnologías emergentes están siendo cada vez más adoptadas, e impulsadas por normativas ambientales y avances en materiales adsorbentes, lo cual las posiciona como soluciones limpias y eficientes para el tratamiento de aguas residuales. Se concluye que, entre 2003 y 2024, la investigación sobre sulfatos ha sido más frecuente que sobre cloruros, y que los métodos más comunes para tratar aguas residuales con estos iones son adsorción, precipitación, quimisorción y electrocoagulación.

Palabras clave: ion sulfato, ion cloruro, técnicas de remoción, aguas residuales.

¹Ingeniero ambiental con Maestría en Gobierno, Políticas Públicas y Desarrollo Territorial. Docente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, sede Tunja, Boyacá . Correo electrónico: ingenierofabianm@gmail.com

²Estudiante de la Universidad Santo Tomás. Miembro del grupo de investigación CONRHI . Correo electrónico: davidricardodiaz04@gmail.com

³Licenciado en Química y magíster en Docencia de las Ciencias Naturales. Docente de la Facultad de Ciencias y Educación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y miembro del grupo de investigación Intercitec . Correo electrónico: jfernandezr@udistrital.edu.co

⁴Licenciada en Química y doctora en Desarrollo Sostenible. Docente de la Facultad de Ciencia y Tecnología, de la Universidad Pedagógica Nacional . Correo electrónico: dgomez@pedagogica.edu.co

Abstract

This study aims to review conventional and emerging techniques for the removal of sulfate and chloride anions from wastewater, using a qualitative methodology based on a systematic content review from databases such as Latindex, Scopus, and Ebsco. The results show that adsorption methods, such as the use of activated carbon, zeolites, and ion exchange resins, are the most widely employed due to their operational simplicity and effectiveness in treating large volumes of water. Additionally, bioremediation techniques with algae and bacteria have proven to be a viable alternative with lower environmental impact. In terms of efficiency, chemisorption and electrocoagulation stand out for achieving removal rates of over 90 % for these ions. These emerging technologies are being increasingly adopted, driven by environmental regulations and advances in adsorbent materials, positioning them as clean and efficient solutions for wastewater treatment. It is concluded that, between 2003 and 2024, research on sulfates has been more frequent than on chlorides, and the most common methods for treating wastewater with these ions are adsorption, precipitation, chemisorption, and electrocoagulation.

Keywords: Utilization of solid waste, wood resources, organic agglomerate, pellets, biological material.

Introducción

La regulación de los niveles de sulfatos y cloruros en las aguas residuales está contemplada en la Resolución 1256 de 2021, expedida en desarrollo del Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Decreto 1076 de 2015), que compila y racionaliza la normativa ambiental en Colombia, y que establece los límites máximos permitidos de estas sales en actividades agrícolas e industriales: 500 mg/L para iones de sulfato, y 300 mg/L para cloruros (1,2). Estas sales provienen principalmente de actividades productivas como la minería de carbón, actividades de metales, en la industria química-petroquímica y en el procesamiento de alimentos y detergentes (3).

Diversas actividades industriales y agrícolas generan aguas residuales con altas concentraciones de cloruros, los cuales están alterando los ecosistemas acuáticos (4,5). El procesamiento de hidrocarburos, la producción de fertilizantes, la agricultura, la industria agroalimentaria, y las plantas de desalación de agua en zonas costeras, incrementan aún más la concentración de cloruros, y agudizan el impacto ambiental (6,7).

Los sulfatos en aguas residuales provienen de múltiples fuentes, derivados del uso de detergentes, productos de limpieza y desechos orgánicos (8,9). En el sector industrial, la textilería y el curtido de pieles emplean grandes cantidades de sales sulfatadas en procesos de teñido y tratamiento de cuero; mientras que la minería, especialmente la extracción de carbón y metales, genera drenajes ácidos con altas concentraciones de sulfatos por la oxidación de minerales sulfurados, como la piritita (10,11). Asimismo, la industria química y petroquímica libera estos

compuestos durante la refinación y producción de ácidos. Además, procesos naturales como la erosión de rocas sedimentarias ricas en sulfatos también intensifican su presencia. Estas descargas afectan la calidad del agua y plantean desafíos en su tratamiento, lo cual requiere estrategias avanzadas para su remoción y mitigación.

Los aniones sulfatos y cloruros participan en diversas reacciones cuando se encuentran en las aguas residuales, los cuales afectan la calidad de agua, los organismos y los ecosistemas que entran en contacto con ella (12,13). Así, por ejemplo, para los sulfatos se encuentran reacciones de reducción que producen sulfuro de hidrógeno, que al interaccionar con oxígeno producen ácido sulfúrico. Estos compuestos hacen que las propiedades fisicoquímicas del agua cambien y produzcan una alta toxicidad para la vida acuática (14). En el caso de los cloruros, aumentarían la salinidad del agua, lo cual alteraría el equilibrio osmótico de los organismos y causaría daños ecosistémicos irreversibles.

Por otra parte, la liberación de estos compuestos en aguas residuales constituyen un reto en su tratamiento, debido a su complejidad derivada de la alta estabilidad química (15). Este problema se agrava con la presencia de metales pesados, los cuales pueden formar complejos con sulfatos y cloruros, lo cual dificulta su eliminación por métodos tradicionales y aumentando la toxicidad del agua (16).

En contraste, dentro de las técnicas tradicionales más utilizadas se encuentran: la precipitación química, la coagulación, la ósmosis, la electrodiálisis y el intercambio iónico; mientras que en las tecnologías emergentes están: la bioadsorción que se consolida como una alternativa prometedora especialmente por su capacidad de remover simultáneamente sulfatos, cloruros y metales pesados de manera eficiente (17–19), además de ofrecer las ventajas de operación a bajo costo (20), el uso de membranas, los sistemas en biorreactores y la combinación de métodos tradicionales, con técnicas como la adsorción electrostática.

Estos métodos descritos se han destacado por su versatilidad y capacidad para ser aplicados a diferentes tipos de aguas residuales, incluyendo aquellas que provienen de actividades de la minería y la industria del curtido, las cuales presentan niveles superiores al 64 % en remoción de metales pesados (21). En los últimos años, la investigación sobre métodos de tratamiento de aguas residuales ha avanzado significativamente; algunos autores han impulsado la necesidad de analizar contaminantes específicos como los sulfatos y cloruros, ya que al implementar tratamientos avanzados de aguas residuales se potencia un desarrollo tecnológico que da lugar a un mayor grado de remoción de contaminantes en el agua (10,22–24).

Todas estas tecnologías han mejorado de manera significativa el análisis de aguas residuales y han aportado a las áreas de investigación que promueven la remoción de diversos compuestos. No obstante, en la actualidad son pocos los estudios que muestran el desarrollo de los diversos métodos en la remoción de los iones sulfatos y cloruros, lo cual se convierte en un insumo para la construcción de tecnologías innovadoras y efectivas. Por tanto, la presente investigación se ubica en el estudio en aguas residuales, y tiene como finalidad analizar y categorizar las investigaciones que asocian diversos métodos de remoción de iones sulfatos y cloruros en aguas residuales, publicados en diversas bases de datos entre 2003 y 2024. Para ello se examinaron distintos métodos disponibles, sus eficiencias relativas y sus aplicaciones específicas donde los desafíos ambientales requieren soluciones innovadoras y adaptadas (25,26). La revisión buscó sintetizar el estado actual del conocimiento y proporcionar una base para futuras investigaciones en este campo.

El aporte de esta revisión al área de la ingeniería ambiental y el tratamiento de aguas residuales radica en ofrecer una revisión exhaustiva de las técnicas convencionales y emergentes para la remoción de sulfatos y cloruros. A través de un análisis sistemático de la literatura entre 2003 y 2024, el artículo identifica los métodos más eficaces, como la precipitación química, la adsorción y las tecnologías emergentes como la bioadsorción y la electrocoagulación. Este enfoque permite comparar su eficiencia, costos operativos y condiciones óptimas, a la vez que les brinda a los profesionales del área herramientas clave para optimizar los tratamientos de aguas residuales.

De este modo, el presente manuscrito constituye un aporte novedoso al campo del tratamiento de aguas residuales, ya que representa la primera revisión sistemática que compara de manera integral los métodos de remoción de sulfatos y cloruros en conjunto. Además, en este trabajo se recurre a un análisis bibliométrico por medio del mapeo informacional bibliográfico (MIB), lo que permite no solo identificar las técnicas más eficaces y las tendencias emergentes en la remoción de estos contaminantes, sino también evaluar de forma cuantitativa y cualitativa la evolución de la investigación en este campo, desde 2003 hasta 2024. Esta metodología combinada ofrece una visión más amplia y detallada de las estrategias para el tratamiento de aguas residuales, y proporciona una base sólida para futuras investigaciones y el desarrollo de soluciones más innovadoras y sostenibles.

Metodología

La metodología aplicada en esta investigación fue de tipo cualitativa, basada en una revisión sistemática de contenido; para ello se utilizó la estrategia de mapeamiento informacional bibliográfico (MIB), la cual permite rastrear el contenido más relevante de una obra científica

para organizar y sistematizar las tendencias conceptuales e identificar los vacíos en un campo de estudio específico (27, 28). La estructura metodológica se organizó en tres etapas de refinamiento progresivo, las cuales se ilustran en la figura 1. Este proceso facilitó la detección y clasificación de datos relevantes sobre los iones objeto de estudio; además, permitió un análisis riguroso y focalizado en el que los hallazgos se articularon de manera coherente con la información previamente recopilada.

El MIB se desarrolló en cuatro etapas: (a) determinación de palabras clave; (b) búsqueda en las bases de datos especializadas por medio de filtros y criterios de inclusión y exclusión; (c) organización de la información obtenida y su categorización; y, (d) correlación y análisis de resultados.

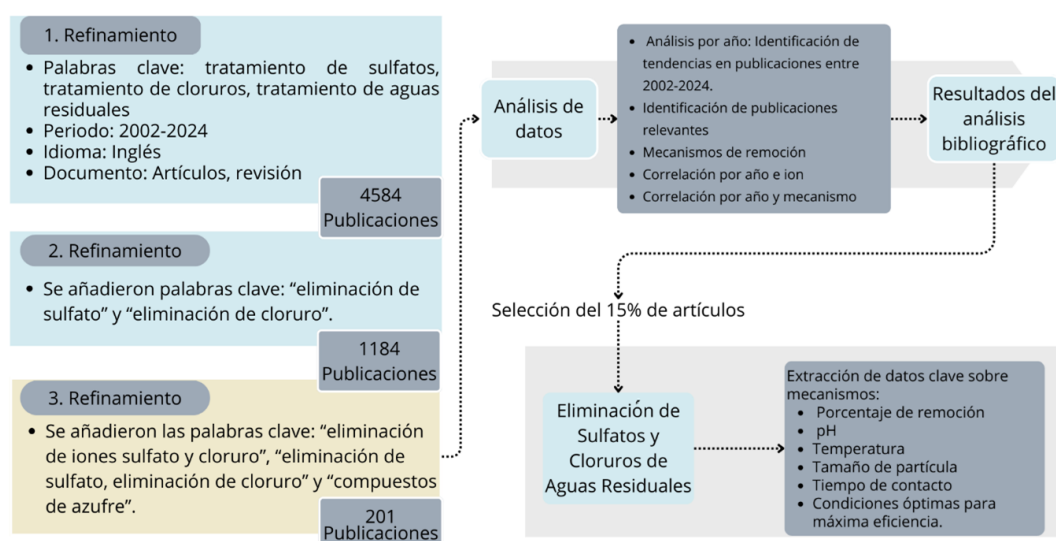


Figura 1. Diseño metodológico

Fuente: autores.

En la primera etapa de refinamiento, se realizó una búsqueda amplia con términos generales como "treatment of sulfates", "treatment of chlorides" y "wastewater treatment". Los criterios incluyeron artículos publicados entre 2003 y 2024, para obtener 4584 publicaciones. Este conjunto inicial proporcionó un panorama general sobre los métodos de tratamiento utilizados en aguas residuales, con enfoque tanto en sulfatos como en cloruros y a partir de una gran variedad de contextos.

En la segunda etapa, la búsqueda se enfocó en términos más específicos como "sulfate removal" y "chloride removal"; así, el número de publicaciones se redujo a 1184. Esta etapa

delimitó los resultados para abordar directamente las tecnologías y mecanismos relacionados con la remoción de estos iones, excluyendo otros tratamientos de aguas residuales que no están directamente relacionados con sulfatos y cloruros.

En la tercera fase de refinamiento, se emplearon palabras clave aún más específicas como "removal of sulfate ions and chloride ions", "sulfate elimination", "chloride elimination" y "Sulfur Compounds". Esto permitió detectar investigaciones detalladas que analizan soluciones técnicas avanzadas o aplicaciones específicas; así, el conjunto final se redujo a 201 publicaciones. Esta fase se enfocó en los trabajos más relevantes, detallados y especializados para una comprensión profunda de los avances en este campo.

Después de completar el MIB, se realizó un análisis de datos estructurado para profundizar en las tendencias y características de los estudios sobre la remoción de sulfatos y cloruros. Este estudio incluyó la identificación de tendencias en publicaciones entre 2003 y 2024, el filtrado de estudios relevantes y la clasificación de los principales mecanismos de remoción utilizados. De igual manera, se efectuó la correlación entre los años y los tipos de iones tratados, así como entre los años y los mecanismos empleados. Finalmente, del total de 201 artículos, se seleccionó el 15 %, correspondiente a 31 artículos de los más relevantes, tomando en cuenta criterios como mecanismos, porcentajes de remoción, condiciones de pH, temperatura, tamaño de partícula y parámetros óptimos para lograr la máxima eficiencia en los procesos.

Resultados

El procesamiento de las publicaciones—sobre la remoción de iones de cloruros y sulfatos en aguas residuales— revela un interés creciente en esta área de investigación. Durante los primeros años del periodo analizado (2003–2012), el número de publicaciones es bajo, con un promedio de dos artículos anuales. Este ritmo lento podría estar relacionado con la atención limitada que recibía este tema en ese momento, o con restricciones tecnológicas que dificultaban el desarrollo de métodos efectivos para abordar la problemática.

A partir de 2013, se observa un aumento significativo en el número de artículos publicados, y alcanzó su punto más alto en 2021 con 24 publicaciones. Este incremento coincide con una mayor conciencia global sobre la importancia del tratamiento de aguas residuales y la implementación de normativas ambientales más estrictas. Entre 2016 y 2021, el número de publicaciones se mantiene consistentemente alto, lo cual señala un auge en la investigación y desarrollo de tecnologías para la remoción de estos contaminantes. De 2024, se reportaron 22 publicaciones, lo que indica que la investigación en esta área continuará siendo prioritaria.

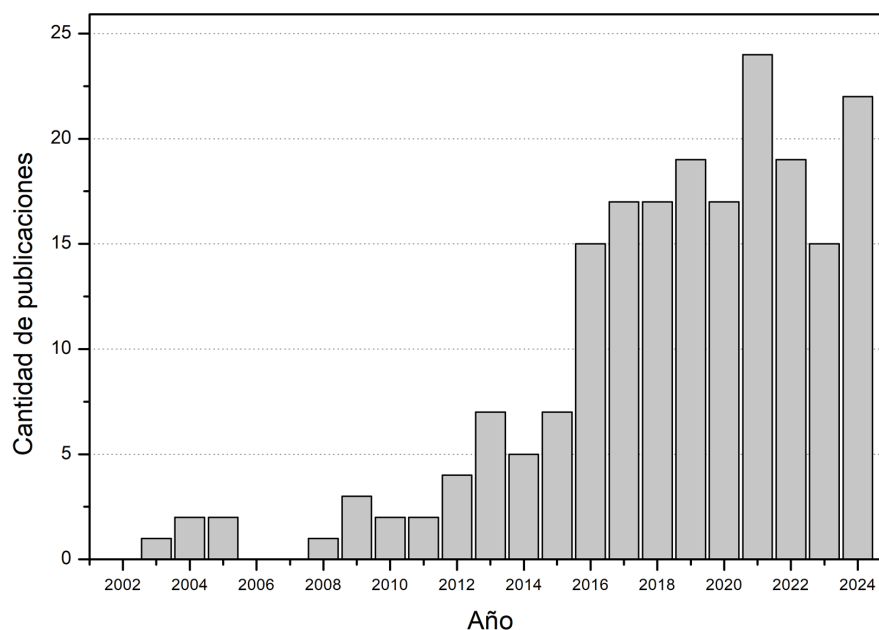


Figura 2. Análisis de tendencias en publicaciones por año

Fuente: autores.

La remoción de iones de cloruros y sulfatos se presenta de manera diferenciada en las investigaciones analizadas, lo cual evidencia una variación en las prioridades y enfoques para el tratamiento de estos contaminantes.

De las 201 publicaciones revisadas, solo 53 (26,4 %) reportan la remoción de cloruros, mientras que 148 (73,6 %) no incluyen esta remoción como parte del enfoque principal. Esto indicaría que los cloruros, aunque relevantes como contaminantes en ciertas aplicaciones, no son el objetivo principal en la mayoría de los estudios. Es posible que la menor proporción de investigaciones sobre cloruros se deba a la percepción de que estos son menos perjudiciales en comparación con los sulfatos, o que existen métodos menos complejos para su remoción.

En contraste, la remoción de sulfatos se reporta en 139 artículos, cifra que representa un 69,2 % del total; mientras que solo 62 artículos (30,8 %) no estudian esta remoción. Esto lleva a analizar que existe un mayor interés en los sulfatos, debido a su impacto significativo en la calidad del agua y la corrosión de infraestructura. Además, los sulfatos son un desafío técnico más complejo.

En general, la remoción de sulfatos supera ampliamente a la de cloruros en las investigaciones revisadas, como se presenta en la Figura 3. Esto subraya la percepción de los sulfatos

como contaminantes prioritarios en contextos industriales y de aguas residuales. Por otro lado, los cloruros, aunque importantes, parecen ser abordados en investigaciones más específicas o como parte de estrategias integradas.

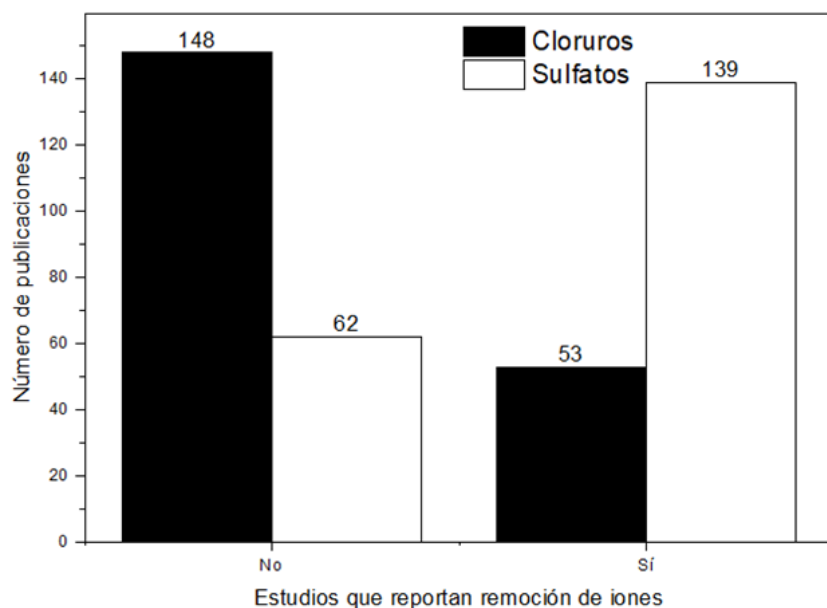


Figura 3. Publicaciones que reportan remoción de iones

Fuente: autores.

La remoción de iones de sulfatos y cloruros en aguas residuales entre los años 2003 y 2024 se ha centrado principalmente en los mecanismos de precipitación y adsorción, estos representan más del 70 % de las publicaciones analizadas. Según la Figura , estos mecanismos son los más usados debido a su eficiencia, disponibilidad de materiales, y adaptabilidad a diferentes tipos de agua contaminada.

Por otro lado, los biorreactores también han ganado relevancia, y ocupan aquí el tercer lugar con un 26,3 % de los reportes; una señal de que las biotecnologías están cumpliendo un papel importante en la remoción de contaminantes, especialmente en sistemas que buscan sostenibilidad y menor impacto ambiental.

El mecanismo de precipitación encabeza la lista con un 37,5 % de los reportes, reflejo de su amplia aceptación en la industria y la investigación. Su efectividad para remover sulfatos y cloruros, junto con su bajo costo relativo, lo posicionan como una solución predominante, especialmente en aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes. Igualmente, la adsorción se posiciona como el segundo mecanismo más reportado (35,0 %), gracias a la investi-

gación creciente sobre materiales innovadores como biocarbones, nanoestructuras, y adsorbentes modificados, que han mejorado significativamente la capacidad y eficiencia de remoción.

Los mecanismos de absorción y ósmosis son de los menos reportados, según el análisis de publicaciones, con apenas un 2,5 %. En contraste, las técnicas de filtración (18,8 %) y el uso de membranas (8,8 %) se consideran opciones más robustas en escenarios específicos, como la remoción selectiva de iones o el tratamiento de aguas con composiciones químicas complejas.

La predominancia de la precipitación y la adsorción refleja la confianza en estos métodos por parte de la industria y los investigadores. No obstante, los estudios recientes también muestran un interés creciente en optimizar técnicas emergentes, como la electrocoagulación y el uso de membranas combinadas con otros procesos, lo que demuestra que los mecanismos tradicionales combinados pueden ser alternativas altamente eficientes para la remoción de estos contaminantes.

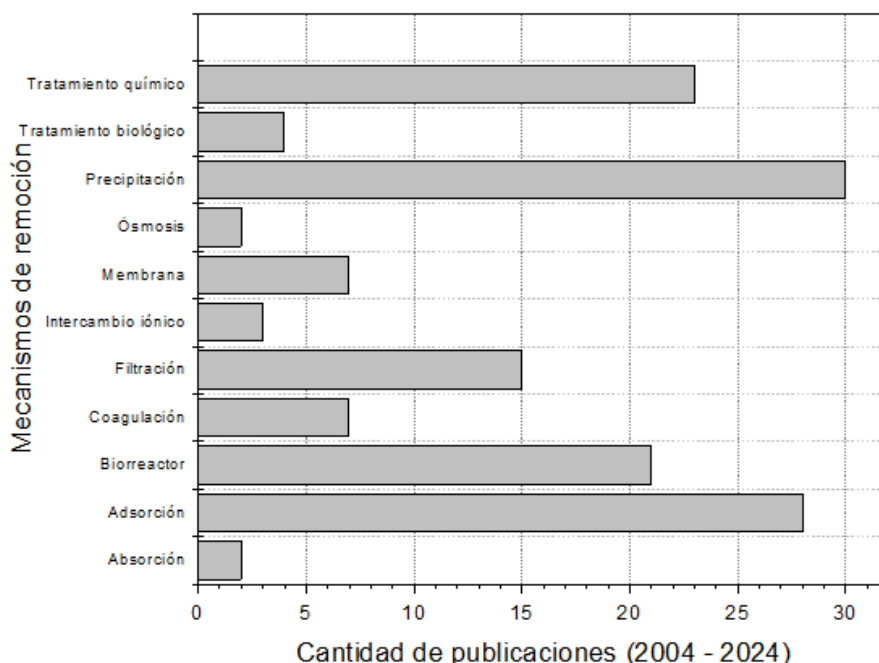


Figura 4. Publicaciones anuales sobre mecanismos de remoción de sulfatos y cloruros (2003-2024)

Fuente: autores.

A lo largo de los años, el número de estudios enfocados en la remoción de sulfatos ha sido consistentemente mayor que aquellos dirigidos a los cloruros. Esto subraya la mayor atención y prioridad que se le da a los sulfatos como contaminantes en el tratamiento de aguas residua-

les, probablemente debido a sus efectos más críticos en términos de corrosión, eutrofización, y su desafío técnico para ser removidos.

Desde 2003 hasta 2024, ambos tipos de estudios muestran un incremento en la cantidad de investigaciones (Figura 5); en el caso de los cloruros, a partir de 2021 se observa un aumento significativo con 9 publicaciones, y alcanzó su pico en 2024 con 10 estudios reportados. Por su parte, las publicaciones de sulfatos muestran un crecimiento más pronunciado a partir de 2016, con cifras que alcanzan los dos dígitos, con un máximo de 18 estudios en 2021. Esto refleja un interés en mejorar las tecnologías de remoción para estos iones.

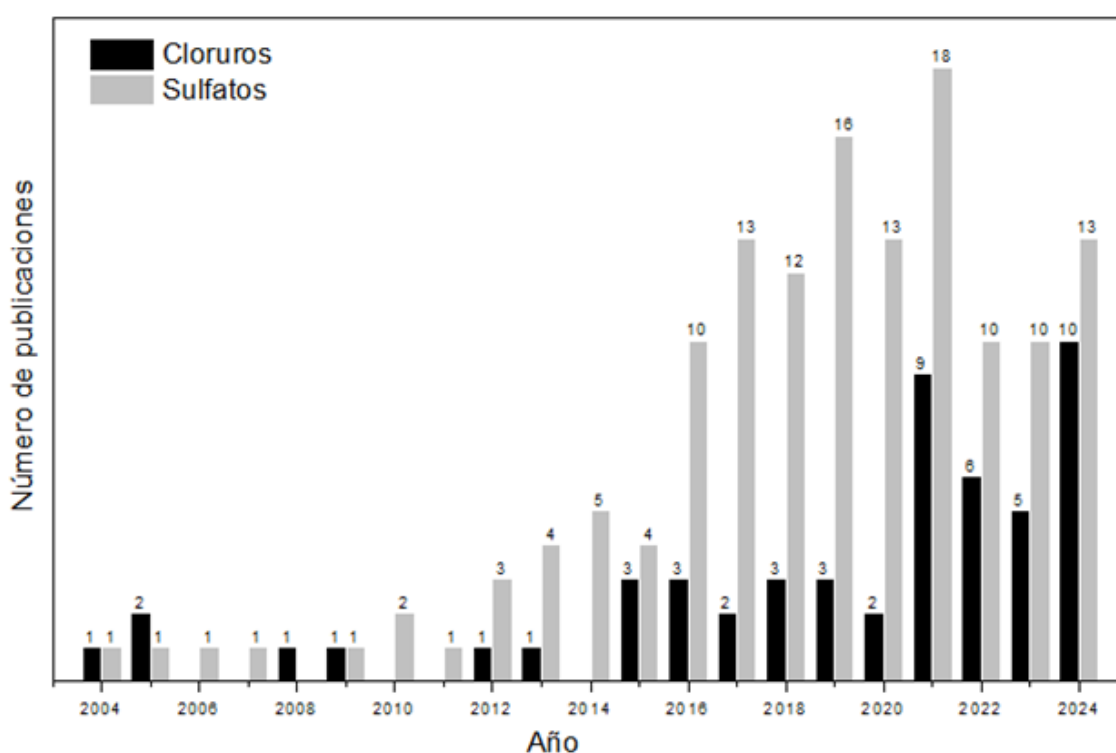


Figura 5. Número de publicaciones por año de cloruros y sulfatos

Fuente: autores.

En los primeros años (2003–2010), el número de estudios es limitado, con varios años sin reportes para cloruros (2006, 2007, 2011). Esto señalaría un menor interés en este periodo o una falta de recursos tecnológicos adecuados para abordar la remoción de estos contaminantes.

La evolución en la cantidad de estudios reportados sugiere un enfoque creciente hacia la optimización de tecnologías para la remoción de sulfatos, y en menor medida, cloruros. Esto es indicativo del avance en técnicas como la adsorción, precipitación y biotecnologías para

tratar estos iones de manera eficiente. Con relación a lo anterior, se observa que la remoción de cloruros se convierte en una oportunidad en futuras investigaciones; debido a su menor representación en los estudios, podría limitar el desarrollo de tecnologías específicas para este contaminante.

El presente análisis sobre los mecanismos de remoción de sulfatos en aguas residuales, de acuerdo con los datos recopilados entre 2003 y 2024, revela datos importantes en la evolución de las tecnologías y enfoques con relación a los avances tecnológicos; por su parte, las necesidades ambientales han influido en la adopción y diversificación de estrategias para abordar la problemática de los sulfatos en cuerpos de agua contaminados.

En los primeros años del periodo analizado (2003-2012), los estudios enfocados en la remoción de sulfatos son escasos y están limitados a tecnologías tradicionales como la precipitación, la adsorción y la filtración. Este comportamiento podría atribuirse a la menor atención que se le daba a este contaminante en ese momento, o a las limitaciones tecnológicas y económicas existentes para desarrollar procesos eficientes.

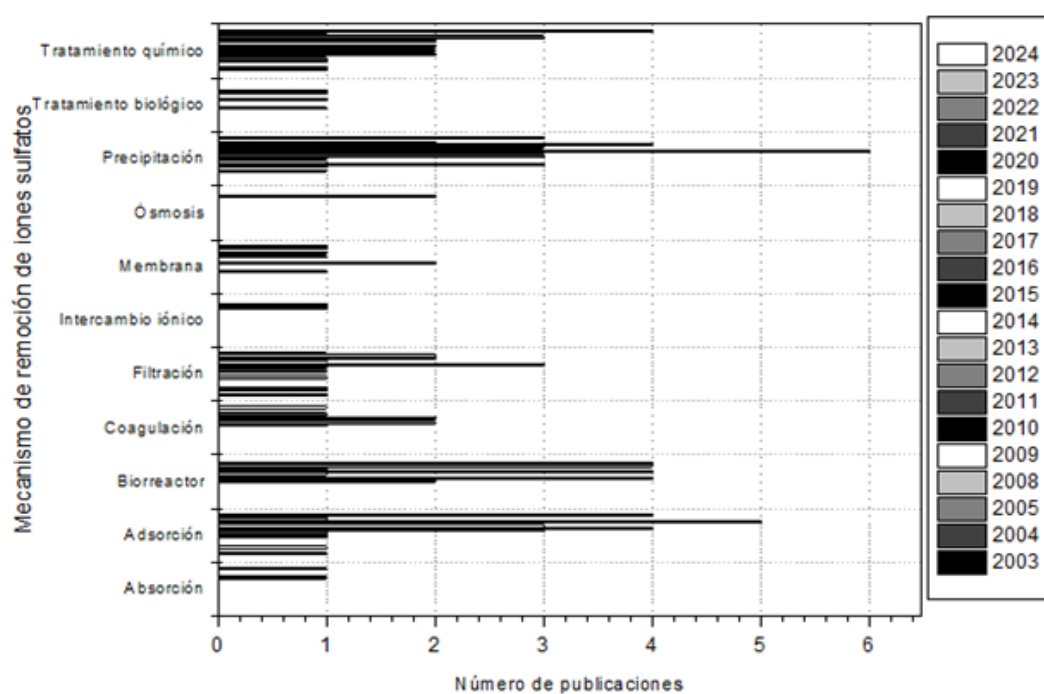


Figura 6. Número de publicaciones de mecanismos de remoción de iones sulfatos

Fuente: autores.

Entre 2016 y 2024, se registra un aumento significativo en la cantidad de publicaciones relacionadas con la precipitación y la adsorción: los mecanismos más reportados. La precipitación, utilizada ampliamente desde los primeros años, se consolida como un método efectivo para la remoción de sulfatos en altas concentraciones. Este mecanismo destaca en 2019 y 2021, donde se observan picos significativos de reportes. Su simplicidad operativa, bajo costo y eficacia, lo convierten en una opción confiable para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en escenarios industriales. La adsorción muestra un incremento, con un pico en 2022 al registrar 5 reportes de estudios. Este aumento puede atribuirse al desarrollo de nuevos materiales adsorbentes, como biocarbones, zeolitas modificadas y otros materiales nanoestructurados que han mejorado la capacidad de remoción y la eficiencia del proceso. Esta técnica es particularmente atractiva debido a su versatilidad, ya que puede adaptarse a una amplia gama de composiciones de agua residual.

Otro mecanismo de gran interés es el uso de biorreactores, cuya presencia en los reportes aumenta significativamente a partir de 2012. Estos sistemas se destacan por su capacidad de tratar los sulfatos de manera sostenible mediante la acción de microorganismos específicos. En los años más recientes, los biorreactores se consolidan como una tecnología prometedora; dado que, según las investigaciones, se han producido hasta 4 estudios anuales en varios años clave. Su adopción está vinculada a la creciente demanda de procesos más ecológicos y sostenibles en el tratamiento de aguas.

Algunas técnicas, como la absorción, la ósmosis y el intercambio iónico, muestran una menor representación en los datos analizados, con solo unos pocos reportes a lo largo del periodo. Estas, aunque útiles en contextos específicos, parecen tener limitaciones en su aplicación generalizada, ya sea por costos operativos, requisitos técnicos o disponibilidad de materiales. Sin embargo, su presencia en la literatura sugiere que estas técnicas podrían desempeñar un papel complementario en sistemas híbridos de tratamiento.

En los años más recientes (2019–2024), se observa una diversificación en los enfoques. Los estudios muestran una creciente tendencia a integrar métodos tradicionales, como la precipitación y los tratamientos químicos, con tecnologías avanzadas como membranas y biorreactores. Esta combinación tiene el potencial de mejorar la eficiencia de remoción y ampliar las aplicaciones de los tratamientos en diferentes contextos de aguas residuales.

El uso de tecnologías mixtas promete ofrecer soluciones más completas, adaptadas a diferentes escenarios y necesidades. Este análisis refuerza la importancia de continuar explorando e innovando en estrategias de tratamiento que no solo sean efectivas, sino además sostenibles y escalables a nivel global.

El análisis de los datos sobre la remoción de cloruros en aguas residuales entre 2003 y 2024 (Figura 7) muestra una evolución clara en el desarrollo y aplicación de diferentes mecanismos para abordar este contaminante. A lo largo de las dos últimas décadas, se observa una transición desde enfoques tradicionales hacia estrategias más diversificadas y sostenibles, lo cual supone un esfuerzo continuo por optimizar los tratamientos en función de las necesidades específicas.

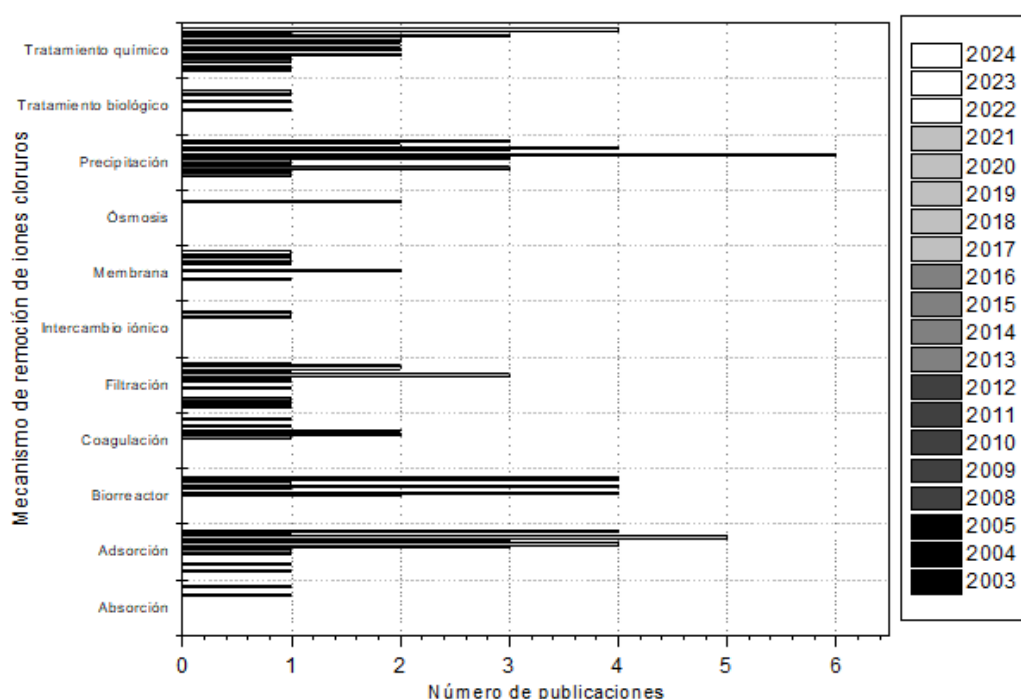


Figura 7. Número de publicaciones de mecanismos de remoción de cloruros

Fuente: autores.

En los primeros años del periodo analizado (2003-2012), los reportes relacionados con la remoción de cloruros son limitados y se concentran principalmente en métodos convencionales como la adsorción, la filtración y la precipitación. Sin embargo, a partir de 2013, se registra un incremento sostenido en la cantidad de estudios, con un punto máximo en 2021 y 2024, años que destacan por la diversificación de los mecanismos empleados.

En cuanto a la precipitación, se observó que de 2019 a 2021 se reportó la mayor cantidad de estudios para este método, el sigue siendo una opción confiable debido a su eficacia para remociones masivas y su bajo costo operativo. La filtración, a pesar de ser menos reportada

en comparación con otros métodos tradicionales como la precipitación y los tratamientos químicos, mantiene una presencia constante en la literatura científica, debido a su aplicabilidad en contextos específicos. Su persistente relevancia puede atribuirse a su carácter ampliamente conocido y estandarizado, lo que favorece su integración en diversas aplicaciones tecnológicas y garantiza su eficacia en el tratamiento de aguas residuales, incluso a lo largo del tiempo.

En la Figura 8, se observa que, para cloruros, los procesos destacados incluyen la adsorción química y la ósmosis inversa, cada una con un documento. La quimisorción también se utilizan con un estudio cada una, lo cual sugiere que los procesos químicos son relevantes para este ion.

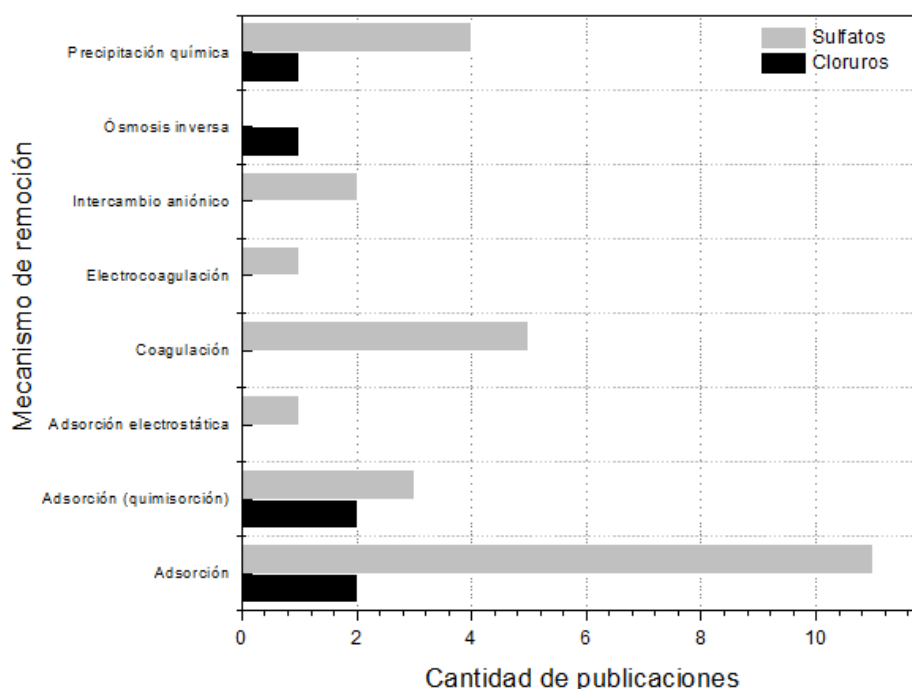


Figura 8. Cantidad de publicaciones de mecanismos de remoción

Fuente: autores.

En cuanto a los sulfatos, hay una mayor diversidad y cantidad de estudios registrados. Los mecanismos principales incluyen la coagulación, con cinco estudios, y la adsorción quimisorción, con dos casos, evidencia de su efectividad en la remoción de este ion. Además, se documentan estudios de intercambio aniónico (2 estudios) y electrocoagulación (1 estudio), lo que subraya la flexibilidad de técnicas aplicadas. La precipitación química también es prominente con cuatro estudios, lo que refuerza su importancia en procesos de remoción, mientras que la adsorción en sulfatos presenta 14 estudios. En conjunto, los datos muestran que la inves-

tigación y las aplicaciones se centran más en sulfatos, debido a su mayor prevalencia o impacto ambiental, y resaltan la técnica de adsorción.

Luego de revisar los 33 artículos, se identificó la remoción en función del mecanismo, este análisis se presenta en la Figura 9, donde se destacan que los más eficientes fueron la quimisorción y la electrocoagulación, con porcentajes de eficiencia del 92 % y 91 %, respectivamente. Estas técnicas sobresalen por su capacidad para eliminar contaminantes con alta precisión, lo que las hace ideales en aplicaciones en las que se requiere un grado máximo de pureza. Asimismo, la adsorción química y el intercambio aniónico también muestran eficiencias elevadas (84,5 % y 78,5 %), lo que evidencia su efectividad en la interacción química con compuestos específicos. La ósmosis inversa, con una eficiencia del 77,8 %, se mantiene como una opción robusta, especialmente en sistemas donde la remoción de iones o compuestos disueltos es esencial.

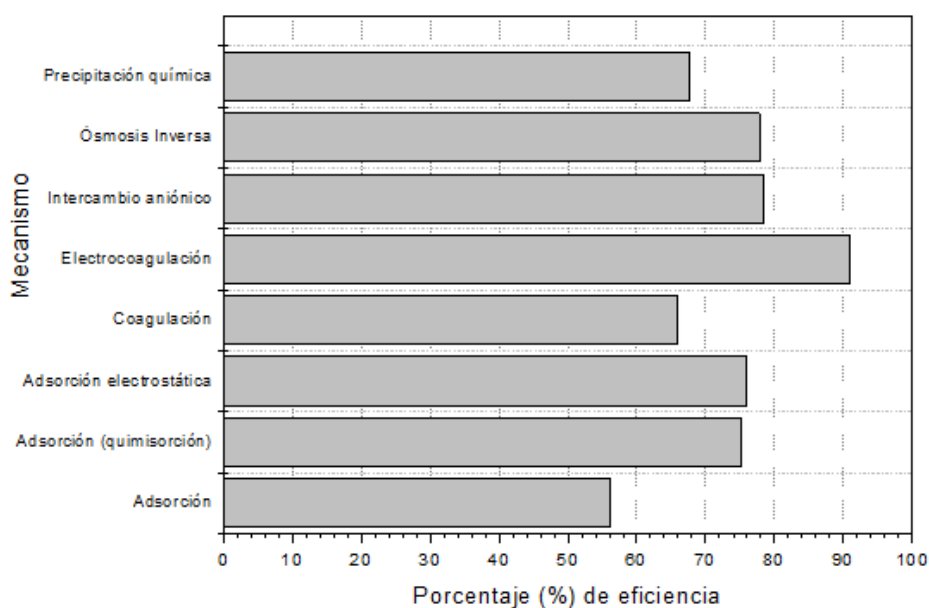


Figura 9. Porcentaje de eficiencia de mecanismos

Fuente: autores.

Por otro lado, la adsorción presenta la menor eficiencia (56,1 %), lo que podría deberse a variables dependientes o factores como el tamaño de partícula o el pH. Métodos como la coagulación y la precipitación química tienen eficiencias moderadas (66 % y 67,6 %, respectivamente), por lo que constituyen etapas preliminares o complementarias en sistemas de tratamiento más complejos. Los métodos especializados, o que involucran interacciones químicas específicas, tienden a ser más efectivos, mientras que los métodos más generales ofrecen mayor adaptabili-

dad a diferentes escenarios. Esto resalta la importancia de elegir el mecanismo adecuado según los objetivos y las características del agua a tratar.

En cuanto al tratamiento de materiales, los adsorbentes modificados y químicos son los más utilizados para la remoción de cloruros (Figura 10). Esto resalta las modificaciones específicas y los tratamientos químicos en la optimización de los procesos de interacción con este ion. Por otro lado, los adsorbentes sin modificar y los combinados (una mezcla de modificados y sin modificar) tienen menor representación, con solo un caso cada uno. Esto podría deberse a su eficacia limitada en la remoción de cloruros o a una menor exploración de estos métodos en investigaciones previas.

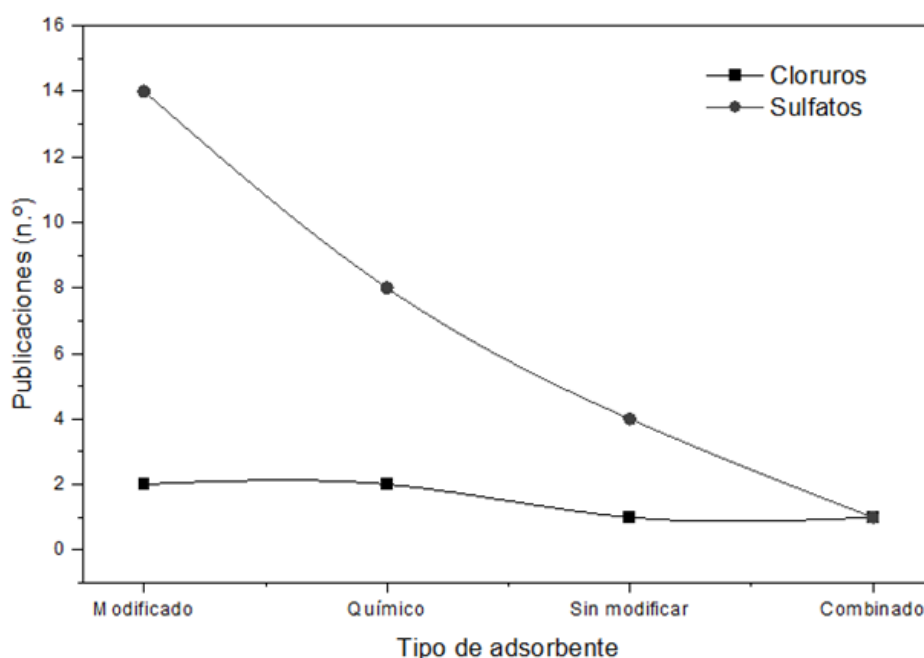


Figura 10. Número de publicaciones de tipo de adsorbente

Fuente: autores.

En el caso de los sulfatos, los adsorbentes modificados dominan con 14 estudios registrados, lo que evidencia su alta efectividad para este ion. Los adsorbentes químicos también tienen una participación significativa con 8 estudios; es decir que ambos enfoques son esenciales para maximizar la eficiencia del tratamiento. Los adsorbentes sin modificar tienen menor uso, con 4 estudios, mientras que los combinados se documentan en un único estudio, lo que sugiere que su potencial aún podría explorarse más ampliamente.

Al analizar los mecanismos de remoción y los materiales utilizados, se evidencia la predominancia de la adsorción como técnica principal, aplicada en 9 estudios, asociados principalmente a tamaños de partículas de 1-2 mm y materiales "sin modificar", o combinaciones de "sin modificar y modificado". Este enfoque demuestra la relevancia de la adsorción en procesos que requieren alta superficie específica. Asimismo, la adsorción química destaca en estudios más específicos, el empleo de materiales como bentonita modificada con sodio (Na) y polvo activado por ácido fosfórico (H_3PO_4), mientras que la adsorción electrostática y la quimisorción se limitan a aplicaciones puntuales con materiales como el carbón activado impregnado con potasio (K) o modificado (FeAC). Por otro lado, técnicas como la coagulación, electrocoagulación y la precipitación química se asocian principalmente a materiales naturales, resinas macroporosas y modificados, y se destacan por su flexibilidad en diferentes aplicaciones.

Mecanismo como la adsorción sobresale por su versatilidad, y es empleada en soluciones salinas (7 estudios), aguas sindióticas (3 estudios) y otros medios como agua residual. Por su parte, la adsorción química y electrostática se orientan a aplicaciones específicas como agua residual industrial y solución salina. En contraste, la coagulación y la precipitación química se centran en la remoción de contaminantes específicos en aguas residuales y sintéticas, respectivamente. Técnicas como el intercambio aniónico y la ósmosis inversa tienen aplicaciones relevantes en aguas salinas e industriales. Estos resultados mencionan la importancia de seleccionar el mecanismo adecuado y combinar técnicas químicas y físicas, según el tipo de agua y el contaminante objetivo, para así optimizar los procesos de remoción.

El análisis de los parámetros de remoción muestra la relevancia de la adsorción como el mecanismo más versátil en distintos contextos operativos. En términos de temperatura, la adsorción cubre un rango amplio (20 °C a 70 °C), con una mayor concentración en 25 °C, lo que demuestra su adaptabilidad a condiciones térmicas variadas. Su capacidad para operar tanto en tiempos cortos como prolongados, desde 7 minutos hasta 1440 minutos, muestra su eficiencia en diferentes escenarios de contacto. Además, la adsorción es prominente en un rango amplio de tamaños de partícula, especialmente entre 1-2 mm y 3-4 mm. En cuanto al pH, su adaptabilidad va desde valores ácidos (3) hasta básicos (13), y es más frecuente en el rango neutro a ligeramente alcalino (pH 6-7), lo que evidencia su capacidad de operar en diversas condiciones químicas.

Por su parte, otros mecanismos presentan aplicaciones más especializadas en parámetros específicos. La adsorción química y la adsorción electrostática se limitan a temperaturas controladas (como 26 °C), tiempos puntuales (20 y 220 minutos, respectivamente), tamaños específicos (3,4 nm para adsorción química), y pH definidos (3 y 6,4). La coagulación y la precipitación química son más efectivas en rangos moderados de temperatura (25 °C), tiempos intermedios

(8-220 minutos), y valores de pH entre 4,5 y 6, lo cual muestra su utilidad en condiciones específicas. Por otro lado, técnicas como el intercambio aniónico y la ósmosis inversa se concentran en rangos térmicos de 20-30 °C y pH neutro, mientras que la electrocoagulación opera en tiempos definidos (100 minutos) y pH específicos, lo cual es indicio de su enfoque en contaminantes especializados.

En general, los parámetros más efectivos para los mecanismos estudiados se encuentran en rangos específicos, como temperaturas entre 25-30 °C, tiempos de contacto de 60-120 minutos, tamaños de partícula de 1-4 mm, y pH entre 5 y 7. Esto evidencia que la selección del mecanismo debe estar alineada con las características del agua a tratar y los contaminantes a remover. Aunque la adsorción es el mecanismo más adaptable, los métodos más especializados como la adsorción química, la electrocoagulación y la precipitación química son cruciales para optimizar procesos en condiciones controladas. La combinación de técnicas químicas y físicas son herramientas claves para maximizar la eficiencia en el tratamiento de aguas.

Por otra parte, al analizar las instituciones que más han contribuido a la investigación sobre la remoción de sulfatos y cloruros, hay un marcado liderazgo de universidades y laboratorios de renombre internacional. Según la Figura 11, la Universidad de Oulu (Oulun Yliopisto) en Finlandia, encabeza la lista con 12 estudios, probablemente debido a su enfoque en tecnologías avanzadas y sostenibles para la gestión de aguas residuales en climas fríos. En el caso latinoamericano, Brasil también se posiciona como un actor clave con la Universidad de São Paulo (7 documentos) y la Universidad Federal de Ouro Preto (6 documentos), con un interés en la protección de ecosistemas locales y el manejo de efluentes de la minería. Por otro lado, instituciones como el Laboratorio Nacional de Oak Ridge (6 documentos) en Estados Unidos, y la Universidad de Jyväskylä (6 documentos), en Finlandia, destacan en el desarrollo de tecnologías innovadoras, incluyendo biotecnología y procesos químicos.

En China, la Academia de Ciencias y el Ministerio de Educación han impulsado investigaciones que abordan tanto la contaminación industrial como la gestión de recursos hídricos, y se destacan con 4 documentos cada uno. Estas instituciones reflejan un enfoque estratégico hacia soluciones tecnológicas avanzadas para problemas ambientales críticos. Además, la Universidad Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho y otras instituciones en Brasil y Finlandia contribuyen con enfoques regionales, mientras que los resultados de estas investigaciones tienen aplicaciones globales.

Por otra parte, según la Figura 12, el análisis por países muestra que China lidera la investigación sobre la remoción de sulfatos y cloruros, con 32 documentos publicados, lo cual constituye una muestra de su compromiso con el desarrollo de tecnologías avanzadas para

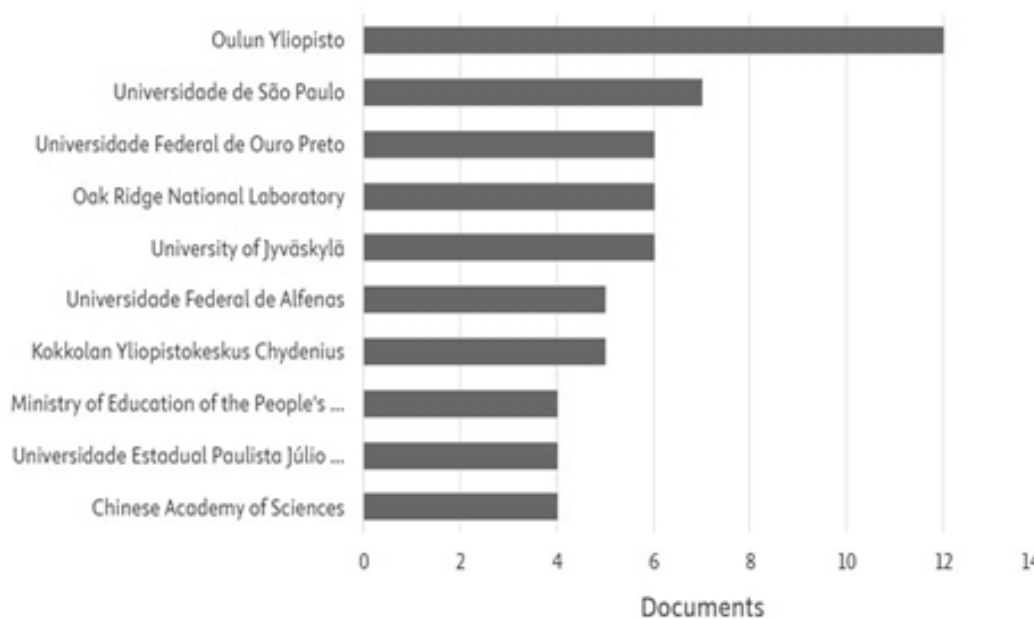


Figura 11. Publicaciones por institución

Fuente: autores

abordar la contaminación industrial. Estados Unidos sigue de cerca con 29 publicaciones, respaldado por su fuerte capacidad científica y tecnológica, impulsada por laboratorios como Oak Ridge y universidades de prestigio. Brasil ocupa el tercer lugar con 20 documentos con por su enfoque en soluciones para el manejo de efluentes mineros y agrícolas.

Finlandia, con 16 documentos, resalta por su enfoque en investigación ambiental y biotecnologías sostenibles, mientras que Reino Unido (14 documentos) y Sudáfrica (13 documentos) aportan en áreas específicas relacionadas con tratamiento de agua y tecnologías de adsorción. España y Australia, con 12 y 10 documentos respectivamente, reflejan un interés en abordar desafíos relacionados con la calidad del agua y la gestión de recursos en sus territorios. Finalmente, Francia, Alemania y Chile contribuyen con entre 6 y 8 documentos, lo que representa un aporte global y regional en esta área, especialmente en el desarrollo de tecnologías adaptadas a escenarios específicos, como drenajes ácidos y aguas residuales industriales.

De acuerdo con la metodología diseñada, y una vez analizada la información sobre los mecanismos más eficientes, se seleccionaron y revisaron los artículos que emplearon bioadsorbentes (Tabla 1).

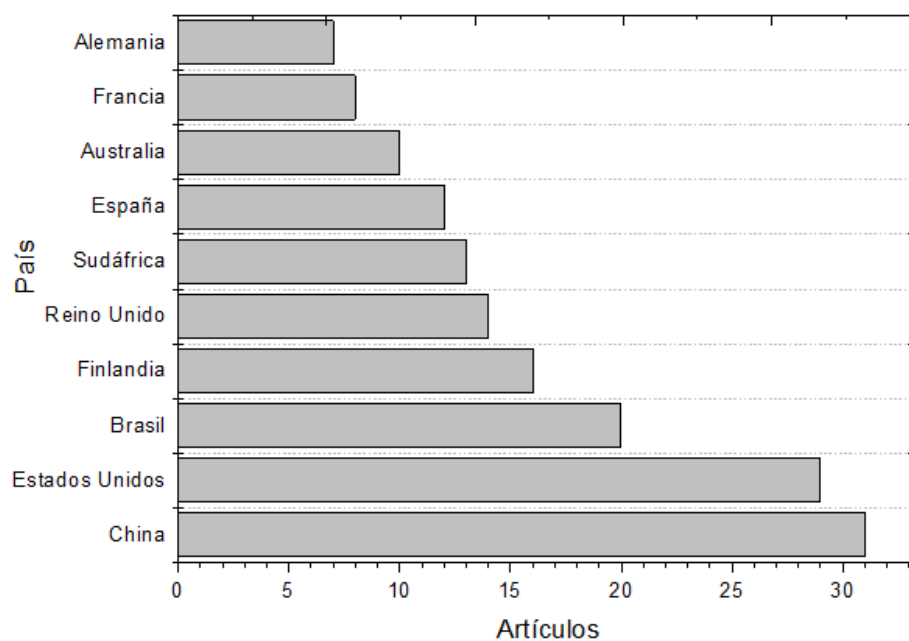


Figura 12. Publicaciones por país

Fuente: autores

Tabla 1. Eficiencia de adsorbentes de biomasa en la eliminación de contaminantes

Biomasa	Tipo de adsorbente	eficiencia (%)	Temperatura (°C)	Tiempo de contacto (min)	Dosis de adsorbente. (g/l)	pH	Cita
Caolín jordano modificado con BaCl ₂	modificado	45	25	3600	No reporta	5,3	(29)
Biocarbón modificado con CaCl ₂ derivado de algas	modificado	95	25-50	30-150	0,1-0,5	5,0	(30)
Carbón activado	modificado	16	V. independiente	120			(31)
Paja de arroz	sin modificar y modificado	74	25	120	2	6,4	(32)
Bagazo de caña de azúcar	modificado		V. independiente	5-10.	2-3.	<10	(33)
Fibras de fique	sin modificar y modificado	34	20	45	10	8	(34)

Biochar producido a partir de bagazo de caña	sin modificar	52	V. Independiente	84		8,1	(35)
Semillas crudas de palmera datilera	modificado	25	25	120	10	3,5	(36)
Carbón activado derivado de la paja de arroz	modificado	48	30	90	0,02-0,067	5	(37)

Fuente: autores

En virtud de lo anterior, se analiza cómo la eficiencia de adsorción varía entre los diferentes adsorbentes, siendo el “biocarbón modificado con CaCl_2 derivado de algas” el adsorbente más eficiente en el proceso de remoción. Sin embargo, es necesario mantener ciertas condiciones como: temperatura, tiempo de contacto, dosis de adsorbente y pH, para lograr una remoción adecuada.

Discusión

El análisis de la remoción de sulfatos y cloruros en aguas residuales durante las últimas dos décadas pone de manifiesto un panorama en constante evolución, en el que las prioridades han ido cambiando de métodos tradicionales a enfoques más sostenibles e innovadores. Este proceso ha estado impulsado por la necesidad de cumplir normativas ambientales más estrictas, el creciente impacto de las actividades industriales y el desarrollo de tecnologías avanzadas.

Para avanzar en el conocimiento sobre la remoción de sulfatos y cloruros, es necesario enfocar las investigaciones futuras en áreas clave que aborden las limitaciones de los métodos actuales y exploren nuevas oportunidades tecnológicas. Algunas recomendaciones incluyen:

- Investigar nuevos adsorbentes, como biocarbones modificados, compuestos híbridos y materiales nanoestructurados, que mejoren la eficiencia y reduzcan los costos de los procesos de adsorción.
- Explorar la combinación de tecnologías tradicionales y avanzadas, como la integración de membranas con biorreactores o la combinación de adsorción con precipitación.
- Estudiar métodos que utilicen subproductos industriales o desechos orgánicos como materiales para la remoción de contaminantes.

La remoción de sulfatos y cloruros en aguas residuales es un desafío complejo que requiere enfoques diversificados. Mientras que los métodos tradicionales, como la precipitación y los

tratamientos químicos, siguen siendo relevantes; las tecnologías emergentes, como biorreactores y membranas, están marcando el camino hacia soluciones más sostenibles y específicas.

La adsorción se ha consolidado como uno de los mecanismos más investigados y efectivos, especialmente con el desarrollo de materiales avanzados como biocarbones, zeolitas y adsorbentes modificados. Su flexibilidad para adaptarse a diversas composiciones de aguas residuales y su capacidad para ofrecer altas tasas de remoción la posicionan como una de las tecnologías más prometedoras para abordar los desafíos asociados con estos contaminantes.

La precipitación de cloruros mediante el uso de cloruro cuproso ha demostrado ser una técnica eficiente en aguas residuales de alta salinidad, especialmente en presencia de cationes como el hierro y el cromo (38). Por otro lado, (39) y (40) manifestaron que los adsorbentes elaborados a partir de residuos agrícolas, como el carbón derivado de bananos, han mostrado una alta capacidad de adsorción de cloruros, superando incluso a alternativas comerciales. En el caso de contaminantes orgánicos, la polarización de bentonitas con sodio ha incrementado significativamente la capacidad de adsorción de sulfato de laurilo sódico, para así optimizar su remoción en soluciones salinas (41).

El uso de bacterias reductoras de sulfato (SRB, por su sigla en inglés) se ha posicionado como una alternativa sostenible para la regeneración de resinas aniónicas y la remoción de sulfatos en biorreactores de flujo continuo. Se demostró que estas bacterias no solo regeneran resinas saturadas, sino que también evitan la generación de salmueras residuales (42, 43). Además, el uso de vinaza o lactato como donador de electrones ha permitido reducir sulfatos y precipitar metales pesados, lo cual incrementa el pH de los efluentes ácidos (44, 45). En el ámbito de la fitorremediación, especies como *Typha latifolia* y *Carex riparia* han mostrado alta capacidad para acumular cloruros, lo que las posiciona como candidatas ideales para sistemas de remediación pasiva (46).

La electrodiálisis selectiva de aniones monovalentes (S-ED) ha sido optimizada para la remoción específica de cloruros en aguas residuales de desulfurización, mejorando la eficiencia energética y la reutilización de estos efluentes (47). En paralelo, desarrollaron un sistema de celdas electroquímicas de tres compartimentos que permite la desalinización de aguas contaminadas, al tiempo que produce cloro como subproducto valioso para procesos de desinfección (48).

Los residuos industriales y agroalimentarios han emergido como recursos económicos para el tratamiento de aguas residuales. Autores validaron el uso de conchas marinas y carbonato de bario (BaCO_3) para eliminar sulfatos en sistemas de drenaje ácido de minas, permitiendo así la escalabilidad de este enfoque (49). De manera similar, otros autores demostraron que las

tabletas de vitamina C desechadas pueden ser reutilizadas para la remoción de cloruros mediante un proceso redox eficiente (50). Por otro lado, sistemas combinados, como las barreras reactivas permeables (PRB, por su sigla en inglés) con hidróxido férrico, han mostrado remociones de sulfatos y metales superiores al 95 %, planteando de esta forma una solución integral para el tratamiento de suelos y aguas en áreas mineras (51).

La optimización de parámetros operativos, como la temperatura, pH y tiempo de reacción, sigue siendo fundamental para maximizar la eficiencia de estos tratamientos. Ensayos a escala piloto han demostrado que sistemas como los adsorbentes de carbón activado y tecnologías de biorremediación pueden ser implementados en operaciones industriales con bajos costos operativos. No obstante, se requiere mayor investigación para integrar estos enfoques en esquemas circulares de economía sostenible, para reducir el impacto ambiental y aumentar la recuperación de subproductos valiosos.

La diversidad de tecnologías y enfoques para el tratamiento de aguas residuales contaminadas por sulfatos y cloruros evidencia el avance significativo en el desarrollo de soluciones innovadoras y sostenibles. Desde el uso de materiales derivados de residuos hasta procesos combinados de biorremediación y electroquímica, estas estrategias ofrecen alternativas viables para abordar una problemática ambiental crítica. La investigación futura debe enfocarse en la escalabilidad, sostenibilidad económica y reducción de residuos secundarios, para garantizar su aplicación eficiente a nivel industrial y comunitario.

En cuanto a los sulfatos, los materiales modificados son claramente predominantes, con 14 casos registrados, lo que demuestra la importancia de las modificaciones en los absorbentes para interactuar eficazmente con este ion. Aunque, los materiales sin modificar también son empleados en cuatro de las publicaciones, los cuales reflejan una mayor flexibilidad en comparación con los cloruros. Por otro lado, los materiales combinados (modificados y sin modificar) solo se documentan en un caso, lo cual permite evidenciar menos investigación sobre esta estrategia. De este modo, los resultados subrayan que las modificaciones en los materiales son clave para maximizar la eficiencia en la remoción de ambos iones, observándose que para la mitigación de los sulfatos son más adaptables a diferentes tipos de materiales.

Conclusiones

La integración de métodos convencionales y emergentes para el tratamiento de aguas residuales es clave para mejorar la eficiencia en la remoción de sulfatos y cloruros. Según los resultados, la combinación de técnicas como la precipitación química y la adsorción con tecnologías avanzadas como la bioadsorción y la electrocoagulación puede ofrecer soluciones más

completas y sostenibles. Esta integración no solo optimiza el tratamiento, sino que también reduce los impactos ambientales y el cumplimiento de las normativas más estrictas de calidad del agua.

La investigación futura debe enfocarse en el desarrollo y la optimización de adsorbentes avanzados y biotecnologías para la remoción de sulfatos y cloruros. Los resultados indican que los biocarbones modificados y los materiales nanoestructurados tienen un gran potencial para mejorar la eficiencia de remoción, especialmente en aguas residuales complejas. Se recomienda fomentar la investigación sobre estos materiales, así como la combinación de biorreactores y membranas para crear procesos más sostenibles y económicamente viables en el tratamiento de aguas residuales.

Al realizar la revisión documental entre 2003 y 2024, se observa un menor porcentaje de investigación de iones cloruros en comparación a los iones sulfatos. Es posible que esto se deba a que los cloruros se consideran menos perjudiciales en comparación con los sulfatos y que, además, para estos existen métodos menos complejos para su remoción.

Los métodos de adsorción, como el uso de carbón activado, zeolitas, resinas de intercambio iónico, precipitación química y ósmosis inversa, son los más empleados debido a su simplicidad operativa y eficacia en el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales contaminadas con sulfatos y cloruros. Sin embargo, las tecnologías emergentes como la quimisorción y la electrocoagulación, que presentan una alta eficiencia de remoción superior al 90 % para estos iones, ofrecen un gran potencial para ser adoptadas en el futuro por las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), debido a su capacidad para mejorar los procesos de remoción con mayor eficiencia y menor impacto ambiental.

El mecanismo de precipitación se reporta dentro de unas de las tecnologías tradicionales para remover cloruros y sulfatos con amplia aceptación en la industria y la investigación, en los cuales los picos más significativos se evidenciaron entre 2019 y 2021. Lo anterior radica en su efectividad y el bajo costo relativo, lo cual lo posicionan como una solución predominante, especialmente en aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 1256 de 2021. *“Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones”*, Bogotá, 2021. Disponible en <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>

-
- [2] Presidencia de la República de Colombia, *Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible - Gestor Normativo*, Bogotá, 2015. Disponible en <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- [3] Castro, G., Medina, P., & Peraza, C. V. (2009). Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la Sierrita de Ticul, Yucatán [Artículo de investigación en línea]. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 13(1), 49–58. https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen13/origen_sulfatos.pdf
- [4] J. D. Bolaños-Alfaro, G. Cordero-Castro, y G. Segura-Araya, “Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica)”, *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 30, n.º 4, p. 15, dic. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>
- [5] M. Cañedo-Argüelles *et al.*, “Salinisation of rivers: an urgent ecological issue”, *Environmental Pollution*, vol. 173, pp. 157–167, feb. 2013. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.011>
- [6] F. D. Yoris, *Evaluación del uso de algodón funcionalizado con quitosano para remoción de cloruros en agua*, jun. 20, 2024. Bogotá: Universidad de los Andes. Disponible en <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/79cd1437-d0d4-4bc6-a409-3428de920961>
- [7] S. Lattemann, y T. Höpner, “Environmental impact and impact assessment of seawater desalination”, *Desalination*, vol. 220, n.º 1–3, pp. 1–15, mzo. 2008, DOI: <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2007.03.009>
- [8] N. E. Ortiz-Penagos, J. Ayala-Esquivel, A. J. León-Luque *et al.*, “Extraction and recovery of sulphides from tanneries wastewater”, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 36, n.º 2, pp. 285–297, jul. 2018, DOI: <https://doi.org/10.14482/inde.36.2.10033>
- [9] W. A. Mendoza Correa, “Fotocatálisis para la degradación de detergentes en aguas residuales”, trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú, 2019. Acceso: sep. 13 de 2025. Disponible en <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/7920>
- [10] M. Ding, y H. Zeng, “A bibliometric analysis of research progress in sulfate-rich wastewater pollution control technology”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 238, p. 113626, jun. 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2022.113626>
- [11] A. Larraguibel, A. Navarrete-Calvo, S. García, V. F. Armijos, y M. A. Caraballo, “Exploring sulfate and metals removal from Andean acid mine drainage using CaCO₃”

- rich residues from agri-food industries and witherite (BaCO_3), *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123450>
- [12] M. Pedrozo-Martínez *et al.*, “Las construcciones costeras: su durabilidad ante el impacto ambiental”, *Revista Pensamiento Transformacional*, vol. 39, n.º 9, pp. 26–46, ago. 2024, DOI: <https://doi.org/10.63526/pt.v3i9.73>
- [13] Núñez-Galeano, L. (2024). Análisis bibliográfico de los sistemas de remoción de cloruros en aguas residuales desde el año 2010 hasta la actualidad [Trabajo de grado en línea]. Disponible en <http://hdl.handle.net/11349/39059>
- [14] Osorio-Rivera, M. A., Carrillo-Barahona, W. E., Negrete-Costales, J. H., Loor-Lalvay, X. A., & Riera-Guachichullca, E. J. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. Polo del Conocimiento: Revista Científico-Profesional, 6(3), 228-245. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7926905.pdf>
- [15] Díaz-Suárez, V., & Páez-Pérez, C. (2006). Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. Acta Nova, 3(2), 308–322. Disponible en <https://www.academia.edu/download/36407400/v3.n2.diaz.pdf>
- [16] Rubí-Juárez, H., Soto-Padilla, M. Y., & Domínguez-Acosta, M. (2022). Electrocoagulación de iones de metales pesados en aguas residuales: Una revisión. CULCYT: Cultura Científica y Tecnológica, 19(2), 28-42. <https://doi.org/10.20983/culcyt.2022.2.3.2>
- [17] S. Dey, G. T. N. Veerendra, A. V. Phani Manoj *et al.*, “Synthesis of various types of green biosorbents materials for removals of sulphates from contaminated water for better aquatic environments”, *Waste Management Bulletin*, vol. 2, n.º 4, pp. 76–94, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.09.006>
- [18] Z. He, X. Wang, Y. Luo *et al.*, “Effects of suspended particulate matter from natural lakes in conjunction with coagulation to tetracycline removal from water”, *Chemosphere*, 2021, vol. 277, ago. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130327>
- [19] X. Hu, F. Zhu, L. Kong *et al.*, “Sulfate radical-based removal of chloride ion from strongly acidic wastewater: Kinetics and mechanism”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 410, may. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124540>
- [20] Cañizares-Villanueva, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. La Microbiología, 6(3), 1–14.* Disponible en <https://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2000/mi003f.pdf>
- [21] E. F. Monroy-Ávila, M. C. Echavarría-Pedraza, y D. L. Gómez-Aguilar, “Diseño y validación de un sistema de adsorción de cromo hexavalente en efluentes de curtiembre usando

- cáscara de naranja y salvado de trigo”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 12, n.º 3, may.-jun., pp. 1-31, 2021. Acceso 05 abr. 2025. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7915870&info=resumen&idioma=ENG>
- [22] K. Sathya, K. Nagarajan, G. Carlin Geor Malar, S. Rajalakshmi, y P. Raja Lakshmi, “A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources”, *Applied Water Science*, vol. 12, n.º 4, p. 70, abr. 2022, DOI: <https://doi.org/10.1007/S13201-022-01594-7>
- [23] G. Divyapriya, S. Singh, C. Martínez-Huitle *et al.*, “Treatment of real wastewater by photoelectrochemical methods: an overview”, *Chemosphere*, vol. 276, art. 130188, ag. 2021. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521006573>
- [24] Ortega-Ramírez, N., & Sánchez-Rodríguez, C. (2021). Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(2), 171-188. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-81702021000200121&script=sci_arttext
- [25] Sánchez Proaño, R. (2021). Los desafíos en el tratamiento comunitario de aguas residuales. En Cachipuendo Ulcuango, C. (Coord.), *Agua para la gente: experiencias de gestión comunitaria del agua en el Ecuador* (pp. 86-137). Editorial Universitaria Abya-Yala. Disponible en <https://pure.ups.edu.ec/es/publications/los-desaf%C3%ADos-en-el-tratamiento-comunitario-de-aguas-residuales>
- [26] Vammen, K. (2015). Desafíos del agua urbana en las Américas: Perspectivas de las Academias de Ciencias. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(3). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-54722015000300009&script=sci_arttext
- [27] C. F. André, “A prática da pesquisa e mapeamento informacional bibliográfico apoiados por recursos tecnológicos: Impactos na formação de professores”, tesis doctoral, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2009. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.48.2009.tde-15122009-095048>
- [28] Fernández-Romero, F., & Molina-Andrade, A. (2021). Relaciones entre migración, enseñanza de las ciencias, contexto, diferencia y diversidad cultural: mapeamiento informacional bibliográfico. En *Actas electrónicas del XI Congreso Internacional en Investigación en Didáctica de las Ciencias 2021: Aportaciones de la educación científica para un mundo sostenible* (pp. 1711–1714). Revista Enseñanza de las Ciencias. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9884093>

- [29] B. Hudaib, "Treatment of real industrial wastewater with high sulfate concentrations using modified Jordanian kaolin sorbent: batch and modelling studies", *Heliyon*, vol. 7, n.º 11, 2021.
- [30] B. Tian *et al.*, "Adsorption of sulfate ions from water by CaCl₂-modified biochar derived from kelp", *RSC Sustainability*, vol. 1, n.º 4, pp. 898–913, 2022.
- [31] Criollo Criollo, J. I. (2020). Investigación de la remoción de sulfatos en aguas residuales de la industria textil por métodos físico-químicos [Trabajo de titulación, Universidad San Francisco de Quito]. Quito. <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/9280>
- [32] W. Cao, Z. Dang, X.-Q. Zhou *et al.*, "Removal of sulphate from aqueous solution using modified rice straw: Preparation, characterization and adsorption performance", *Carbohydrate Polymers*, vol. 85, n.º 3, pp. 571–577, 2011, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.03.016>
- [33] D. R. Mulinari, y M. L. C. P. da Silva, "Adsorption of sulphate ions by modification of sugarcane bagasse cellulose", *Carbohydrate Polymers*, vol. 74, n.º 3, pp. 617–620, 2008, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.04.014>
- [34] Agudelo-Valencia, R. N. (2014). Evaluación de la remoción de sales por medio del uso de fibras de *Furcraea bedinghausii* (fique) y fibras de fique modificadas químicamente [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/ac823ddd-aea4-4336-97b2-1d200efb7489>
- [35] Cantor-Forero, A. V., & Castañeda-Domínguez, L. S. (2018). Evaluación del biochar elaborado a partir de bagazo de caña en filtros con retro lavado para la adsorción y desorción de aniones (fosfatos, sulfatos y nitratos) en aguas potenciadas [Trabajo de grado, Universidad de La Salle]. Scribd. <https://es.scribd.com/document/621981547/Evaluacion-Del-Biochar-Elaborado-a-Partir-de-Bagazo-de-Cana-en-Fi>
- [36] S. Koumaiti, K. Riahi, F. Ounaies *et al.*, "Kinetic modelling of liquid-phase adsorption of sulfate onto raw date palm seeds", *Journal of Environmental Science and Engineering*, vol. 5, n.º 12, 2011.
- [37] E. Farahmand, B. Rezai, F. D. Ardejani *et al.*, "Kinetics, equilibrium, and thermodynamic studies of sulphate adsorption from aqueous solution using activated carbon derived from rice straw", *Bulgarian Chemical Communications*, vol. 47, n.º 1, pp. 72–81, 2015.
- [38] K. Gao, J. Lu, X. Wang *et al.*, "Effect of cations on the removal rate of chloride ions and mechanism analysis in high-salt wastewater", *Water Science and Technology*, vol. 83, n.º 9, pp. 2232–2241, 2021, DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.098>

- [39] P. G. De Souza, T. M. de Queiroz, y J. W. P. Carvalho, "Characterization and evaluation of the adsorptive capacity of charcoals prepared with bananas", *Revista Virtual de Química*, vol. 12, n.º 4, pp. 840–851, 2020, DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20200067>
- [40] Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 18(34), 109-123. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/3442/344234336010.pdf>
- [41] R. Mohadi, Y. M. Hakim, R. D. Astuti, I. Royani, y M. Mardiyanto, "Pillarization of Sumatera Bentonite by sodium-assisted as effective adsorbent of anionic surfactants sodium lauryl sulphate (SLS) waste", *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, vol. 18, n.º 1, pp. 48–58, 2023, DOI: <https://doi.org/10.9767/bcrec.16500>
- [42] H. Virpiranta, T. Leiviskä, S. Taskila *et al.*, "Bioregeneration of sulfate-laden anion exchange resin", *Water Research*, vol. 224, art. 119110, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119110>
- [43] D. E. Álvarez-Márquez, "Principales microorganismos sulfato reductores (MSR) de reactores anaerobios alimentados con efluentes ácidos, una revisión bibliográfica", *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 24, no. 1, pp. 62–76, jun. 2022, DOI: <https://doi.org/10.15446/REV.COLOMB.BIOTE.V24N1.100963>
- [44] E. W. Nogueira, L. A. Gouvêa de Godoi, L. N. Marques-Yabuki *et al.*, "Sulfate and metal removal from acid mine drainage using sugarcane vinasse as electron donor: performance and microbial community of the down-flow structured-bed bioreactor", *Bioresource Technology*, vol. 330, art. 124968, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124968>
- [45] Valdivia-Tejada, F. (2017, enero). Bioprecipitación de metales pesados utilizando bacterias reductoras de sulfato (BRS) para su aplicación en un biorreactor sulfidogénico. Arequipa: Universidad Católica de Santa María. Disponible en: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/6016>
- [46] M. Schück, y M. Greger, "Chloride removal capacity and salinity tolerance in wetland plants", *Journal of Environmental Management*, vol. 308, art. 114553, abr. 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114553>
- [47] X. Tian, D. Yue, T. Hou *et al.*, "Separation of chloride and sulfate ions from desulfurization wastewater using monovalent anions selective electrodialysis", *Membranes (Basel)*, vol. 14, no.º 4, mzo. 2024, DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes14040073>
- [48] G. Puggioni *et al.*, "Combining electro-bioremediation of nitrate in saline groundwater with concomitant chlorine production," *Water Research*, vol. 206, art. 117736, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117736>

- [49] A. Larraguibel, A. Navarrete-Calvo, S. García *et al.*, "Exploring sulfate and metals removal from Andean acid mine drainage using CaCO_3 -rich residues from agri-food industries and witherite (BaCO_3)", *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, art. 123450, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123450>
- [50] X. Wang *et al.*, "Analysis of the chloride ion removal mechanism from simulated wastewater by discarded vitamin tablets", *Water Science and Technology*, vol. 86, n.º 10, pp. 2483–2494, nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2022.355>
- [51] Y. Fan, L. Tu, C. Liao *et al.*, "An enhanced electrokinetic/waste $\text{Fe}(\text{OH})_3$ permeable reactive barrier system for soil remediation in sulfide mine areas", *Sustainability*, vol. 14, n.º 22, nov. 2022, DOI: <https://doi.org/10.3390/su142215342>

