

SSTSDS-Vol.4. N1. 114

**Evaluación comparativa del sulfato de aluminio comercial y sintetizado
desde residuos reciclados en tratamiento de aguas residuales**

*Comparative evaluation of commercial and synthesized aluminum sulfate
from recycled waste in wastewater treatment*

Autores:

Alan Roberto Zambrano Pazmiño
Universidad Estatal de Milagro
Milagro – Ecuador

azambranop8@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4758-3704>

Álvaro Damián Gómez Castro
Universidad Estatal de Milagro
Milagro – Ecuador

alvarogmz86@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-0951-6177>

Jaime David Sevilla Carrasco
Universidad Estatal de Milagro
Milagro – Ecuador

jsevillac@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5257-299X>

Enviado: 14-05-2026

Aceptado: 15-08-2026

Revisado: 15-07-2026

Publicado: 17-08-2026



Cómo citar este artículo:

Zambrano Pazmiño, A. R., Gómez Castro, Álvaro D., & Sevilla Carrasco, J. D. (2026). Evaluación comparativa del sulfato de aluminio comercial y sintetizado desde residuos reciclados en tratamiento de aguas residuales. *Sage Sphere of Technology, Sciences, Discoveries And Society*, 4(1), 1-15. <https://doi.org/10.63688/bdnnzq49>

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.



RESUMEN

La gestión de recursos hídricos enfrenta desafíos críticos debido a la descarga de efluentes con alta turbidez, cuya potabilización convencional depende de coagulantes derivados de la minería de bauxita. Esta investigación evaluó comparativamente la eficiencia cinética y capacidad clarificante de un sulfato de aluminio sintetizado mediante el reciclaje químico de envases de bebidas posconsumo (serie 3000) frente a un estándar comercial. La metodología consistió en una síntesis por digestión alcalina y cristalización ácida, seguida de ensayos de Jar Test en muestras de agua lótica con 483 NTU y pH de 6.42. Los resultados demostraron que el coagulante reciclado (SAR) alcanzó su máxima eficiencia a una dosis del 2% (p/v), reduciendo la turbidez a 69 NTU (85.7% de remoción), desempeño superior al estándar comercial en todas sus concentraciones. Un hallazgo significativo fue la estabilidad del pH; mientras el producto comercial acidificó el medio hasta 5.70, el SAR mantuvo un pH de 6.32 debido al efecto amortiguador de los metales secundarios (Mg y Mn) propios de la aleación. Asimismo, el SAR presentó una cinética de floculación acelerada y mayor tolerancia a la sobredosis. Se concluye que la valorización de residuos UBC serie 3000 permite obtener un coagulante funcional a partir de residuos de aluminio, con desempeño técnico competitivo y potencial de valorización bajo principios de economía circular.

Palabras clave: Economía circular; Coagulación-Floculación; Sulfato de aluminio; Tratamiento de aguas.

ABSTRACT

Water resource management faces critical challenges due to high-turbidity effluent discharges, where conventional purification relies on coagulants derived from bauxite mining. This research comparatively evaluated the kinetic efficiency and clarifying capacity of aluminum sulfate synthesized through the chemical recycling of used beverage cans (3000 series) against a commercial standard. The methodology involved synthesis via alkaline digestion and acid crystallization, followed by Jar Test assays on lotic water samples with 483 NTU and a pH of 6.42. Results showed that the recycled coagulant (SAR) achieved maximum efficiency at a 2% (w/v) dosage, reducing turbidity to 69 NTU (85.7% removal), outperforming the commercial standard at all concentrations. A significant finding was pH stability; while the commercial product acidified the medium to 5.70, the SAR maintained a pH of 6.32 due to the buffering effect of secondary metals (Mg and Mn) inherent to the alloy. Furthermore, the SAR exhibited accelerated flocculation kinetics and greater tolerance to overdosing. It is concluded that the recovery of 3000 series UBC waste allows for the production of a functional coagulant from aluminum waste, with competitive technical performance and potential for valorization under circular-economy principles.

Keywords: Circular economy; Coagulation-Flocculation; Aluminum sulfate; Water treatment.



1. INTRODUCCIÓN

La crisis global de la calidad del agua ha escalado hasta convertirse en uno de los desafíos de ingeniería más críticos del siglo XXI. El crecimiento demográfico acelerado y la intensificación de las actividades industriales han derivado en una carga sin precedentes de contaminantes en los cuerpos de agua lóticos, donde la turbidez elevada actúa como vector de patógenos y sustancias tóxicas. Según Shahzadi et al. (2024), el tratamiento de aguas no solo es una necesidad sanitaria, sino un imperativo para el desarrollo sostenible. No obstante, los métodos convencionales de potabilización dependen estrictamente de insumos químicos cuya producción suele tener una huella ambiental significativa, lo que genera una paradoja de sostenibilidad en el sector del saneamiento básico.

El sulfato de aluminio se ha consolidado como el coagulante predominante a nivel mundial debido a su eficacia en la desestabilización de suspensiones coloidales. Sin embargo, su obtención industrial convencional depende de la minería de bauxita, un proceso de alto costo energético y degradación ecosistémica. Como señalan David y Kopac (2013), la fluctuación en los precios de las materias primas minerales impone una barrera económica para las plantas de tratamiento en regiones en desarrollo. Ante esta problemática, la ingeniería de procesos busca migrar hacia un paradigma de economía circular, donde los residuos metálicos sólidos dejen de ser un pasivo ambiental para convertirse en precursores químicos de alto valor agregado (Olabimtan y Akinlotan, 2023).

El reciclaje químico de envases de aluminio posconsumo (UBC) representa una oportunidad estratégica para la síntesis de coagulantes. A diferencia de la bauxita, el aluminio metálico posee una reactividad que facilita rutas de síntesis más directas mediante digestión anfótera. Investigaciones previas han explorado el uso de aluminio reciclado, pero la mayoría se ha centrado en aluminio de alta pureza. No obstante, las aleaciones de la serie 3000 (3004/3105), comunes en la industria de bebidas, contienen elementos minoritarios como Magnesio (Mg) y Manganeseo (Mn). Según Sjöblom (2021), la interacción de estos cationes multimetálicos en procesos de tratamiento de agua puede influir significativamente en la morfología de los flóculos y en la velocidad de sedimentación.

Este trabajo aborda un vacío crítico: la influencia de los metales secundarios de las aleaciones UBC en la eficiencia cinética del sulfato de aluminio sintetizado. Se postula que la presencia



de cationes divalentes puede potenciar la formación de flóculos más densos mediante mecanismos de compresión de la doble capa eléctrica, mejorando además la estabilidad del pH. Como indica Bratby (2016) en su tratado sobre coagulación, la estabilidad del pH es vital, ya que la acidificación excesiva provocada por coagulantes puros requiere el uso adicional de agentes alcalinizantes, incrementando la complejidad operativa.

Desde el punto de vista fisicoquímico, la coagulación con sales de aluminio depende de la hidrólisis del Al(III) y de la formación de especies hidroxiladas cuya distribución varía con el pH, la alcalinidad, la dosis aplicada y la composición de la matriz. Estas especies pueden actuar por neutralización de carga, adsorción o coagulación por barrido, mecanismos que determinan el tamaño del flóculo y la eficiencia de sedimentación. Por ello, el ensayo de jarras continúa siendo una herramienta experimental de referencia para seleccionar dosis y condiciones de operación, especialmente cuando la calidad del agua cambia de forma significativa (Franceschi et al., 2002; Cruz et al., 2020; Dayarathne et al., 2021). Estudios recientes con sulfato de aluminio confirman además que la respuesta del proceso no puede interpretarse únicamente a partir de la dosis nominal, debido a la interacción entre turbidez inicial, pH de coagulación, tiempo de mezcla y características del agua (Tahraoui et al., 2024).

La valorización química de residuos de aluminio constituye, en este contexto, una ruta de interés porque transforma un residuo posconsumo en un precursor para productos de mayor valor agregado. Se han reportado experiencias de síntesis de alumbre y coagulantes a partir de latas, láminas y otros residuos de aluminio, con capacidad de remover turbidez en ensayos de tratabilidad (Ugwekar, 2012; Rahama et al., 2020; Olabimtan et al., 2023). Sin embargo, la composición de las aleaciones recicladas introduce una variabilidad que debe ser considerada: elementos minoritarios y condiciones de pretratamiento pueden modificar la química de disolución, la composición final del producto y su comportamiento durante la coagulación. En consecuencia, la comparación directa con un coagulante comercial bajo condiciones experimentales equivalentes permite determinar si el material reciclado mantiene una respuesta técnica reproducible y establecer hipótesis mecánicas que posteriormente deberán confirmarse mediante caracterización química específica.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es realizar una evaluación comparativa de la eficiencia cinética y capacidad clarificante entre un sulfato de aluminio sintetizado mediante



reciclaje químico y un estándar comercial. A través de un diseño experimental riguroso en el cantón Milagro, se busca demostrar que la valorización de residuos de aluminio no solo mitiga el impacto ambiental, sino que propone una solución técnica eficiente y económicamente viable, alineada con los principios de química verde propuestos por Anastas y Eghbali (2010).

2. METODOLOGÍA

Preparación del Precursor Metálico y Caracterización

La fase experimental se fundamentó en un enfoque cuantitativo de alcance exploratorio y comparativo, ejecutado en los laboratorios de la Universidad Estatal de Milagro. Como precursor metálico para la síntesis, se utilizaron residuos de envases de bebidas posconsumo (UBC) recolectados localmente, seleccionando específicamente aleaciones de la serie 3000 (3004/3105). Estas aleaciones se caracterizan por una composición química que integra metales secundarios como el Magnesio (Mg) y Manganeseo (Mn), los cuales actúan como agentes funcionales en los procesos de desestabilización coloidal. El material fue sometido a un riguroso pretratamiento de abrasión mecánica y limpieza química para eliminar barnices poliméricos y tintas externas, seguido de un dimensionamiento en granallas de 4mm² mediante cizallamiento, con el fin de estandarizar el área superficial de contacto y optimizar la cinética de disolución.

Protocolo de Síntesis de Sulfato de Aluminio Reciclado (SAR)

La síntesis química del sulfato de aluminio reciclado (SAR) se llevó a cabo mediante una ruta de digestión alcalina aprovechando el carácter anfótero del aluminio metálico. El proceso inició con la reacción de las granallas en un reactor de vidrio de borosilicato cargado con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1.4 M. La mezcla se mantuvo bajo agitación constante a una temperatura controlada de 90 °C, condiciones termodinámicas óptimas para la formación de aluminato de sodio soluble (Na[Al(OH)₄]) y la liberación de hidrógeno gaseoso como subproducto. Una vez finalizada la reacción, la solución resultante se sometió a una filtración al vacío con un sistema de embudo Büchner y papel de microfibra de vidrio para segregar impurezas sólidas insolubles derivadas de la aleación original.

Cristalización y Obtención del Coagulante Sólido



Posteriormente, se procedió a la etapa de cristalización ácida mediante la titulación controlada del filtrado con ácido sulfúrico concentrado hasta alcanzar el punto de saturación y la neutralización del aluminato. Para garantizar la pureza y estabilidad del cristal de sulfato de aluminio, se aplicó un protocolo de enfriamiento gradual en un baño maría invertido a 5 ± 2 °C, facilitando la nucleación de cristales hidratados. El producto final fue secado a temperatura controlada y pulverizado mecánicamente para asegurar su homogeneidad en las etapas posteriores de dosificación, obteniendo un coagulante sólido estable y listo para la fase de evaluación técnica.

Ensayos de Tratabilidad mediante Jar Test

La evaluación de la capacidad clarificante se realizó mediante ensayos de jarras (Jar Test) utilizando muestras de agua lítica con una turbidez inicial crítica de 483 NTU y un pH de 6.42. El diseño experimental comparó el desempeño del SAR frente a un sulfato de aluminio comercial (SAC) de grado industrial, aplicando concentraciones del 1%, 2% y 3% (p/v) en ambas variantes para determinar la dosis óptima. El régimen cinético consistió en una mezcla rápida a 200 rpm durante 2 minutos para la hidrólisis del coagulante, seguida de una etapa de floculación a 40 rpm durante 20 minutos para promover el crecimiento de los flóculos mediante colisiones interparticulares, finalizando con un periodo de sedimentación estática de 30 minutos.

Instrumentación y Control de Calidad de Datos

Finalmente, el monitoreo de la eficiencia técnica se realizó mediante instrumentación de alta precisión. Se empleó un turbidímetro Hanna HI98703 para cuantificar la remoción de sólidos suspendidos y un multiparámetro Hach HQ240d para el registro de la conductividad, los sólidos totales disueltos (TDS) y las variaciones de pH. Se determinó además el Tiempo de Formación de Floc (TFF) como indicador clave de la cinética de reacción. Todos los ensayos se ejecutaron por triplicado para asegurar la repetibilidad de los resultados, utilizando el promedio de las mediciones y el cálculo de la desviación estándar como criterios de validación para la comparación entre el coagulante sintetizado y el estándar comercial.

3. RESULTADOS



Caracterización Inicial de la Muestra de Agua

El agua lítica seleccionada para los ensayos presentó una turbidez inicial de 483 NTU, valor que se clasifica como una carga de sedimentos elevada, típica de cuerpos de agua con alta influencia de escorrentía. El pH inicial se registró en 6.42, indicando una condición ligeramente ácida previo a cualquier intervención química. Estas condiciones basales se mantuvieron constantes para las seis unidades de mezcla del equipo de jarras, asegurando un punto de partida homogéneo para la evaluación comparativa.

Comportamiento del pH post-tratamiento

Tras la aplicación de los coagulantes y la finalización de los periodos de mezcla y sedimentación, se observó una variación en los niveles de pH en función de la dosis y el origen del producto. Los datos recolectados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.

Valores de pH medidos tras la aplicación de sulfato comercial y reciclado.

Concentración (%)	Sulfato Comercial (SAC)	Sulfato Reciclado (SAR)
1%	6.22	6.38
2%	6.01	6.32
3%	5.70	6.01

En el caso del SAC, se evidenció un descenso progresivo y marcado del pH, cayendo 0.72 unidades desde su estado inicial hasta alcanzar un valor de 5.70 en la dosis máxima (3%). Por el contrario, el SAR mostró una mayor estabilidad en este parámetro; a la dosis del 1% el pH se mantuvo en 6.38 y a la dosis del 2% se situó en 6.32, representando una caída de apenas 0.10 unidades respecto al agua cruda.

Eficiencia en la Remoción de Turbidez

La capacidad clarificante varió significativamente entre las concentraciones evaluadas. Los resultados de turbidez residual se presentan de forma comparativa en la Tabla 2.

Tabla 2.

Turbidez residual (NTU) tras el proceso de sedimentación.

Concentración (%)	Sulfato Comercial (SAC)	Sulfato Reciclado (SAR)
1%	71	127
2%	93	69
3%	133	92

El punto de mayor clarificación se obtuvo con el SAR al 2%, logrando una turbidez final de 69 NTU, lo que equivale a una remoción del 85.7% de los sólidos suspendidos iniciales. Por su parte, el SAC alcanzó su mejor desempeño con la dosis mínima del 1%, registrando 71



NTU. Se observó que al incrementar la dosis al 3% en ambos casos, la turbidez residual aumentó nuevamente, siendo este incremento más pronunciado en el coagulante comercial, el cual llegó a los 133 NTU.

Dinámica de la Floculación

Durante la etapa de mezcla lenta, se registraron observaciones directas sobre la formación de los flóculos. El Tiempo de Formación de Floc (TFF) para el SAR al 2% fue menor al registrado para el SAC en todas sus dosis. Los flóculos generados por el coagulante reciclado presentaron una estructura macroscópica de mayor tamaño y una velocidad de sedimentación visualmente superior. Al finalizar los 30 minutos de reposo, el volumen de lodos compactados fue mayor en las jarras tratadas con el producto reciclado, dejando una interfaz agua-sedimento claramente definida.

4. DISCUSIÓN

La eficiencia comparativa entre el sulfato de aluminio reciclado (SAR) y el comercial (SAC) revela aspectos fenomenológicos fundamentales sobre la química de las aleaciones y el equilibrio iónico del agua tratada. En este estudio, el SAR al 2% alcanzó una turbidez residual de 69 NTU, superando el desempeño de todas las concentraciones comerciales, incluido el SAC al 1% (71 NTU). Este fenómeno de clarificación superior puede explicarse mediante el mecanismo de coagulación por barrido (sweep coagulation). Según Bratby (2016), cuando se trabaja con turbideces iniciales elevadas (como los 483 NTU de este estudio), la formación masiva de hidróxidos metálicos actúa como una red que atrapa partículas coloidales por arrastre físico, una cinética que en el SAR podría estar favorecida por las características químicas del material sintetizado. Este comportamiento es coherente con la dependencia del mecanismo de coagulación respecto de la dosis y del pH descrita en estudios de Jar Test con sulfato de aluminio (Cruz et al., 2020; Tahraoui et al., 2024).

Un hallazgo crítico es la estabilidad del pH observada en el efluente tratado con el coagulante reciclado. Mientras que el SAC al 1% redujo el pH a 6.22, el SAR al 2% lo mantuvo en 6.32. La química de los coagulantes de aluminio es altamente sensible al pH: Yang et al. (2010) reportaron que el intervalo de máximo desempeño para $Al_2(SO_4)_3$ se ubicó aproximadamente entre pH 6.0 y 7.0, y Kimura et al. (2013) demostraron que el pH también condiciona la fracción de aluminio residual después del tratamiento. Por tanto, mantener el



sistema próximo a este intervalo puede representar una ventaja operacional al reducir la necesidad de correcciones posteriores de acidez. En este estudio, la menor acidificación observada con SAR es un resultado experimental verificable; sin embargo, atribuirle específicamente al Mg y Mn presentes en las aleaciones serie 3000 debe considerarse una hipótesis. La contribución de estos elementos debería confirmarse mediante análisis elemental del coagulante, determinación de alcalinidad y, de ser posible, especiación de aluminio antes y después del tratamiento.

La relación entre la dosis y la eficiencia también evidenció el fenómeno de reestabilización coloidal a concentraciones del 3%. El incremento de la turbidez residual en el SAC (133 NTU) frente al SAR (92 NTU) a dicha dosis indica que el coagulante comercial alcanza el punto de saturación de carga más rápidamente. De acuerdo con la regla de Schulze-Hardy, la desestabilización de coloides es proporcional a la valencia del ion; sin embargo, un exceso de carga positiva revierte la polaridad de las partículas, generando fuerzas de repulsión que impiden la floculación. El hecho de que el SAR presente una curva de reestabilización menos pronunciada sugiere un rango operativo ligeramente más amplio bajo las condiciones evaluadas. Esta interpretación debe limitarse al sistema experimental estudiado, ya que la dosis óptima depende de la composición del agua y de la naturaleza del coagulante, como se ha observado al comparar sulfato de aluminio con coagulantes prehidrolizados (Nowacka et al., 2014).

Desde la perspectiva de la cinética de floculación, el menor Tiempo de Formación de Floc (TFF) registrado para el SAR sugiere una agregación más rápida de partículas bajo las condiciones ensayadas. Los flóculos de mayor tamaño observados macroscópicamente y su sedimentación visualmente más rápida son consistentes con una respuesta favorable del coagulante reciclado, aunque estas observaciones no sustituyen una caracterización cuantitativa de tamaño, densidad o resistencia del flóculo. Resultados previos con alumbre obtenido de residuos de aluminio también han mostrado capacidad de clarificación y formación de flóculos en agua turbia (Rahama et al., 2020; Olabimtan et al., 2023). En consecuencia, los datos del presente estudio respaldan la funcionalidad del SAR, pero no permiten concluir por sí solos que Mg o Mn actúen como coadyuvantes naturales; para demostrar ese mecanismo sería necesario comparar materiales con composiciones



elementales conocidas y controlar experimentalmente la concentración de dichos metales. Finalmente, la integración del proceso dentro de un modelo de economía circular constituye una ventaja potencial que debe analizarse de forma diferenciada de la eficiencia de coagulación. El aprovechamiento de envases posconsumo evita que una fracción de aluminio permanezca como residuo y crea una ruta alternativa de valorización química, en concordancia con los principios de la Química Verde (Anastas & Eghbali, 2010). Estudios de ciclo de vida aplicados a latas de aluminio muestran que el cierre de ciclos materiales puede generar beneficios ambientales relevantes, aunque su magnitud depende de la tasa de recuperación, la energía utilizada y las operaciones de acondicionamiento y reciclaje (Niero et al., 2016). Por esta razón, los resultados obtenidos permiten afirmar que el SAR posee viabilidad técnica preliminar como coagulante, pero no constituyen por sí mismos un análisis de viabilidad económica ni un análisis de ciclo de vida. Estos componentes deben evaluarse posteriormente mediante balances de masa y energía, costos de reactivos, rendimiento de síntesis, gestión de subproductos y comparación ambiental con la producción convencional de sulfato de aluminio a partir de materias primas minerales.

Limitaciones del estudio y perspectivas de investigación

El alcance del estudio es comparativo y de escala de laboratorio, por lo que sus resultados deben interpretarse dentro de las condiciones específicas del agua lítica evaluada y del protocolo de síntesis aplicado. No se realizó una caracterización estructural o elemental completa del SAR, ni se cuantificó aluminio residual, alcalinidad, Mg o Mn en el agua tratada. Tampoco se evaluaron parámetros como materia orgánica natural, distribución de tamaño de flóculo, volumen y deshidratabilidad del lodo o desempeño posterior en filtración. Estas variables son relevantes porque la coagulación con aluminio depende de la química de la matriz y del pH, y porque la eficiencia observada en Jar Test no equivale automáticamente al desempeño a escala de planta (Franceschi et al., 2002; Yang et al., 2010; Dayarathne et al., 2021). Como trabajo futuro se recomienda caracterizar el producto mediante técnicas como XRF, ICP-OES/AAS y XRD, expresar la dosificación en masa de Al activo por volumen de agua, ampliar el rango de dosis y pH, y realizar ensayos con diferentes fuentes de agua. Esta información permitiría distinguir el efecto propio del aluminio del posible aporte de elementos minoritarios y fortalecería la evaluación de seguridad, reproducibilidad y escalabilidad del proceso.



5. CONCLUSIÓN

La presente investigación permitió validar la efectividad técnica y funcional del sulfato de aluminio sintetizado a partir del reciclaje químico de envases de bebidas posconsumo (serie 3000), consolidándolo como una alternativa competitiva frente al coagulante comercial convencional. Se determinó que la dosis óptima de aplicación para el producto reciclado es del 2% (p/v), condición bajo la cual se alcanzó una eficiencia de remoción de turbidez del 85.7%, logrando reducir la carga de sólidos de 483 NTU a 69 NTU. Este desempeño no solo superó los resultados obtenidos por todas las concentraciones del estándar industrial evaluadas, sino que demostró la viabilidad de utilizar precursores metálicos residuales para obtener un coagulante funcional destinado a procesos de clarificación, cuya composición y pureza deberán ser confirmadas mediante caracterización analítica específica.

Un hallazgo de especial relevancia para la ingeniería de procesos fue la notable estabilidad del equilibrio ácido-base que otorga el coagulante reciclado al agua tratada. Mientras que el sulfato comercial provocó una acidificación progresiva y agresiva del medio hasta alcanzar un pH crítico de 5.70, el producto sintetizado mantuvo una mayor capacidad amortiguadora, situando el efluente en un pH de 6.32. Esta resistencia a la caída del pH constituye una ventaja operativa potencial; no obstante, su relación con metales secundarios como Mg y Mn debe considerarse una hipótesis hasta contar con evidencia de composición elemental y balance de alcalinidad.

Asimismo, el estudio mostró una cinética de floculación favorable para el SAR, reflejada en un menor Tiempo de Formación de Floc (TFF) y en la observación de agregados macroscópicos de mayor tamaño. El coagulante reciclado también presentó una respuesta menos sensible a la sobredosificación en el intervalo evaluado. Estos resultados respaldan su funcionalidad técnica, aunque la contribución específica de los elementos minoritarios de la aleación no puede establecerse sin una caracterización química y una evaluación mecánica complementaria.

Finalmente, los resultados obtenidos respaldan la investigación de rutas de valorización de residuos de aluminio bajo principios de economía circular y química verde. La síntesis mediante digestión anfótera y cristalización controlada permitió transformar envases posconsumo en un material con capacidad coagulante comprobada a escala de laboratorio.



En consecuencia, el sulfato de aluminio reciclado se posiciona como una alternativa técnica prometedora para aguas de alta turbidez. Su viabilidad ambiental y económica a escala industrial deberá establecerse mediante estudios posteriores de rendimiento de síntesis, costos, consumo energético, calidad del producto, aluminio residual y análisis de ciclo de vida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anastas, P., & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: Principles and practice. *Chemical Society Reviews*, 39(1), 301–312. <https://doi.org/10.1039/B918763B>
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment* (3rd ed.). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780407500>
- Cruz, D., Pimentel, M., Russo, A., & Cabral, W. (2020). Charge neutralization mechanism efficiency in water with high color turbidity ratio using aluminium sulfate and flocculation index. *Water*, 12(2), 572. <https://doi.org/10.3390/w12020572>
- David, E., & Kopac, J. (2013). Aluminum recovery as a product with high added value using aluminum hazardous waste. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.042>
- Dayarathne, H. N. P., Angove, M. J., Aryal, R., Abuel-Naga, H., & Mainali, B. (2021). Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101820. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820>
- Franceschi, M., Girou, A., Carro-Diaz, A. M., Maurette, M. T., & Puech-Costes, E. (2002). Optimisation of the coagulation-flocculation process of raw water by optimal design method. *Water Research*, 36(14), 3561–3572. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00066-0)
- Kimura, M., Matsui, Y., Kondo, K., & Ishikawa, T. B. (2013). Minimizing residual aluminum concentration in treated water by tailoring properties of polyaluminum coagulants. *Water Research*, 47(6), 2075–2084. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.01.037>
- Niero, M., Negrelli, A. J., Hoffmeyer, S. B., Olsen, S. I., & Birkved, M. (2016). Closing the loop for aluminium cans: Life cycle assessment of progression in Cradle-to-Cradle



certification levels. *Journal of Cleaner Production*, 126, 352–362.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.122>

Nowacka, A., Włodarczyk-Makula, M., & Macherzyński, B. (2014). Comparison of effectiveness of coagulation with aluminum sulfate and pre-hydrolyzed aluminum coagulants. *Desalination and Water Treatment*, 52(19–21), 3843–3851.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.888129>

Olabimtan, O. H., Akinlotan, O. O., Omohu, J., Ukpong, M. K., & Yekeen, B. H. (2023). Synthesis and evaluation of alum crystals from waste aluminum foils in turbid water treatment. *Journal of Innovative Research*, 1(1), 27–34.
<https://doi.org/10.54536/jir.v1i1.1528>

Rahama, M. S., Mashi, A. L., & Muhammad, A. S. (2020). Comparative studies between alum synthesized from aluminum cans and natural coagulant synthesized from watermelon seed. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Chemia*, 65(4), 125–133.
<https://doi.org/10.24193/subbchem.2020.4.10>

Shahzadi, F., Haydar, S., & Tabraiz, S. (2024). Optimization of coagulation to remove turbidity from surface water using novel nature-based plant coagulant and response surface methodology. *Sustainability*, 16(7), 2941.
<https://doi.org/10.3390/su16072941>

Sjöblom, J. (2021). *Encyclopedic handbook of emulsion technology*. CRC Press.

Tahraoui, H., Toumi, S., Boudoukhani, M., Touzout, N., Sid, A. N. E. H., Amrane, A., Belhadj, A.-E., Hadjadj, M., Laichi, Y., Aboumustapha, M., Kebir, M., Bouguettoucha, A., Chebli, D., Assadi, A. A., & Zhang, J. (2024). Evaluating the effectiveness of coagulation–flocculation treatment using aluminum sulfate on a polluted surface water source: A year-long study. *Water*, 16(3), 400.
<https://doi.org/10.3390/w16030400>

Ugwekar, R. P. (2012). Potash alum from waste aluminum cans and medicinal foil. *IOSR Journal of Engineering*, 2(7), 62–64. <https://doi.org/10.9790/3021-02716264>

Yang, Z. L., Gao, B. Y., Yue, Q. Y., & Wang, Y. (2010). Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1–3), 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.127>



CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Alan Roberto Zambrano Pazmiño, Álvaro Damián Gómez Castro, Jaime David Sevilla Carrasco.

Metodología: Alan Roberto Zambrano Pazmiño, Álvaro Damián Gómez Castro, Jaime David Sevilla Carrasco.

Investigación: Alan Roberto Zambrano Pazmiño, Álvaro Damián Gómez Castro, Jaime David Sevilla Carrasco.

Redacción – borrador original: Alan Roberto Zambrano Pazmiño, Álvaro Damián Gómez Castro, Jaime David Sevilla Carrasco.

Redacción – revisión y edición: Alan Roberto Zambrano Pazmiño, Álvaro Damián Gómez Castro, Jaime David Sevilla Carrasco.

