



Aplicación de biocoagulantes en el tratamiento de aguas residuales: Revisión bibliométrica de métodos y resultados

Application of biocoagulants in wastewater treatment: Bibliometric review of methods and results

Chuquimbalqui-Marina, Delmester^{1*}

Chuquimbalqui-Marina, Ivan^{2*}

Azabache-Aliaga, Yrwin Daniel^{3*}

¹Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú

²Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Perú

³Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú

Recibido: 17 Dic. 2025 | **Aceptado:** 20 Mar. 2026 | **Publicado:** 20 Jul. 2026

Autor de correspondencia*: d.chuquimbalqui@unsm.edu.pe

Como citar este artículo: Chuquimbalqui-Marina, D., Chuquimbalqui-Marina, I. & Azabache-Aliaga, Y. D. (2026). Aplicación de biocoagulantes en el tratamiento de aguas residuales: Revisión bibliométrica de métodos y resultados. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 5(2), e1438. <https://doi.org/10.51252/reacae.v5i2.e1438>

RESUMEN

La búsqueda de alternativas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales ha impulsado el desarrollo y aplicación de biocoagulantes derivados de fuentes vegetales, animales y microbianas. Estos materiales destacan por su biodegradabilidad, baja toxicidad y potencial para reemplazar coagulantes químicos convencionales. El presente estudio desarrolla una revisión bibliométrica sobre el empleo de biocoagulantes en el tratamiento de aguas residuales, utilizando 140 artículos indexados en Scopus entre 1983 y 2025. El análisis se realizó mediante Bibliometrix y VOSviewer, aplicando un umbral mínimo de cinco ocurrencias para identificar términos relevantes y construir mapas de co-ocurrencia. Se obtuvieron cuatro clústeres temáticos que representan las principales líneas de investigación: a Tratamiento de aguas residuales con biocoagulantes y desempeño del proceso, Potabilización y calidad del agua para consumo humano mediante el uso de biocoagulantes, Coagulantes naturales y alternativas sostenibles, Optimización experimental y metodología. Los resultados muestran un crecimiento sostenido de la producción científica durante la última década, con liderazgo de países asiáticos y africanos. Además, los estudios experimentales evidencian eficiencias superiores al 80 % en la remoción de turbidez, color y materia orgánica. En conjunto, el análisis demuestra que los biocoagulantes representan una alternativa viable y ambientalmente favorable para mejorar la calidad del agua tratada.

Palabras clave: coagulación; contaminantes; floculación; remoción; tecnologías sostenibles

ABSTRACT

The search for sustainable alternatives for wastewater treatment has driven the development and application of biocoagulants derived from plant, animal, and microbial sources. These materials stand out for their biodegradability, low toxicity, and potential to replace conventional chemical coagulants. This study presents a bibliometric review of the use of biocoagulants in wastewater treatment, using 140 articles indexed in Scopus between 1983 and 2025. The analysis was performed using Bibliometrix and VOSviewer, applying a minimum threshold of five occurrences to identify relevant terms and construct co-occurrence maps. Four thematic clusters were obtained, representing the main lines of research: wastewater treatment with biocoagulants and process performance, purification and quality of water for human consumption through the use of biocoagulants, natural coagulants and sustainable alternatives, and experimental optimization and methodology. The results show sustained growth in scientific production over the last decade, with Asian and African countries leading the way. In addition, experimental studies show efficiencies of over 80% in the removal of turbidity, color, and organic matter. Overall, the analysis demonstrates that biocoagulants represent a viable and environmentally friendly alternative for improving the quality of treated water.

Keywords: coagulation; contaminants; flocculation; removal; sustainable technologies



1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de biocoagulantes ha surgido como una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales, fundamentada en el uso de compuestos naturales capaces de desestabilizar y aglomerar partículas suspendidas. Estos materiales, obtenidos a partir de fuentes vegetales, animales o microbianas, destacan por su biodegradabilidad, bajo impacto toxicológico y capacidad para remover turbidez, sólidos y materia orgánica con alta eficiencia (Anele et al., 2023). En los últimos años, el interés por estas tecnologías se ha incrementado, impulsado por la necesidad de reducir la dependencia de coagulantes químicos y minimizar la generación de lodos contaminados.

En un contexto de creciente demanda por soluciones de tratamiento eficientes y ambientalmente responsables, la optimización del uso de biocoagulantes se consolida como una línea de investigación prometedora. Estudios experimentales recientes demuestran que parámetros como la dosis del biocoagulante, el pH del medio, el tiempo de mezcla y el tipo de biomaterial influyen directamente en el rendimiento del proceso. Investigaciones con extractos de *Moringa oleifera* reportan reducciones de hasta un 92 % en turbidez y un 88 % en DQO, evidenciando su alto potencial en aguas residuales domésticas e industriales (Nzeyimana & Mary, 2024). De manera similar, el desarrollo de biopolímeros derivados de semillas de *Moringa* ha demostrado remociones superiores al 85 % en turbidez y sólidos totales, con cinéticas de coagulación estables y reproducibles (Varsani et al., 2022). Estos hallazgos refuerzan la importancia de diseñar procedimientos adaptados a las características de cada efluente y a la disponibilidad de materiales locales.

El tratamiento de aguas mediante biocoagulación se posiciona, así como una tecnología emergente que integra principios de química verde, ciencia de biopolímeros y procesos convencionales de coagulación-floculación. El crecimiento sostenido en las publicaciones científicas sobre el tema refleja el interés por alternativas naturales de bajo impacto ambiental. Adicionalmente, estudios recientes han demostrado la capacidad de coagulantes vegetales para remover más del 80 % de turbidez y sólidos suspendidos en efluentes de acuicultura, validando su aplicabilidad en escenarios reales (Ahmad et al., 2024). De manera complementaria, la aplicación de jugo de cactus asociado a *Opuntia* spp. como biocoagulante ha mostrado resultados prometedores en aguas residuales agroindustriales, alcanzando remociones elevadas de turbidez y DQO bajo condiciones optimizadas de pH, dosis y mezcla (Neffa et al., 2020).

La presente revisión bibliométrica y cualitativa busca sintetizar el avance del conocimiento en el uso de biocoagulantes para el tratamiento de aguas residuales, identificando patrones temáticos, tendencias emergentes y desafíos técnicos en el campo. Al integrar mapas de co-ocurrencia y análisis de redes científicas con evidencia experimental de estudios originales, este trabajo ofrece una perspectiva integral para orientar futuras investigaciones y contribuir al desarrollo de tecnologías sostenibles en la gestión del recurso hídrico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Fuente de datos y estrategia de búsqueda

La información bibliográfica utilizada en este estudio fue obtenida de la base de datos Scopus, debido a su amplia cobertura de literatura científica en ingeniería ambiental y tecnologías de tratamiento de aguas. La búsqueda se realizó en enero de 2025 empleando la siguiente ecuación:

TITLE-ABS-KEY ("biocoagulant" OR "bio-coagulant" OR "natural coagulant*" OR "plant-based coagulant*" OR "biopolymer coagulant*" OR "*Moringa oleifera*" OR "*Opuntia ficus-indica*") AND TITLE-ABS-KEY ("wastewater" OR "water treatment")**

El periodo de análisis comprendió desde 1983 hasta 2025. Se incluyeron únicamente artículos científicos originales, escritos en inglés y publicados en revistas indexadas a Scopus. Se excluyeron revisiones, comunicaciones cortas, capítulos de libro, documentos de conferencia, artículos sin acceso a texto completo y registros duplicados. La búsqueda inicial arrojó 3146 documentos, de los cuales, tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 140 artículos para el análisis bibliométrico y cualitativo.

2.2. Proceso de selección y depuración de documentos

El proceso de depuración siguió un flujo de trabajo tipo PRISMA adaptado. Primero, se eliminaron registros duplicados y documentos sin información suficiente, reduciendo la base inicial a 2987 artículos. Posteriormente, se revisaron los títulos, resúmenes y palabras clave para identificar la relevancia temática relacionada específicamente con el empleo de biocoagulantes en el tratamiento de aguas residuales. Finalmente, se seleccionaron 140 artículos originales, que constituyen el corpus bibliográfico del presente estudio. Estos artículos incluían evaluaciones experimentales, análisis cinéticos, optimización de procesos de coagulación-floculación y aplicaciones en aguas residuales domésticas, industriales o agrícolas.

2.3. Herramientas de análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se llevó a cabo utilizando dos herramientas especializadas:

- Bibliometrix (R-Studio)

Se empleó el paquete Bibliometrix y su interfaz Biblioshiny para realizar el análisis descriptivo del conjunto de publicaciones. Las métricas analizadas incluyeron: productividad científica anual, distribución de países por países y redes de colaboración y fuentes de autores más influyentes.

- VOSviewer

El software VOSviewer fue utilizado para la construcción de redes bibliométricas y visualización de mapas científicos. Se generaron mapas de: co-ocurrencia de palabras clave agrupado por clusters y co-ocurrencia de palabras clave basado en la evolución temporal.

2.4. Parámetros de análisis y construcción de clústeres

Para el análisis de co-ocurrencia de palabras clave se estableció un umbral mínimo de cinco ocurrencias, seleccionando 79 términos relevantes de un total de 1317 registrados. El análisis se desarrolló mediante conteo fraccional, resolviendo la estructura temática en cuatro clústeres principales, cada uno representativo de una línea de investigación dentro del campo de los biocoagulantes. Estos clústeres agrupan estudios relacionados con: aplicaciones del proceso de biocoagulación en aguas residuales, evaluación de parámetros operacionales, comparación entre coagulantes químicos y naturales, y desarrollo de biopolímeros y extractos vegetales como agentes coagulantes.

2.5. Análisis cualitativo complementario

Además del análisis cuantitativo, se llevó a cabo un **análisis cualitativo de contenido**. Para ello, se revisaron en profundidad los artículos más citados y los más representativos de cada clúster. Se analizaron aspectos como:

- Tipo de biomaterial utilizado (proteínas, polisacáridos, mucílagos, extractos vegetales),
- Parámetros experimentales (pH, dosis, tiempo de mezcla, velocidad de sedimentación),
- Eficiencias de remoción (turbidez, DQO, SST, color, metales),
- Desempeño comparativo frente a coagulantes químicos tradicionales,

- Limitaciones técnicas y oportunidades de mejora.

La integración de los resultados bibliométricos con el análisis cualitativo permitió identificar tendencias emergentes, consolidación de líneas de investigación y vacíos de conocimiento que requieren mayor estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Producción científica anual

La Figura 1 muestra un crecimiento sostenido en la producción científica sobre biocoagulantes entre 1983 y 2025. Durante las primeras dos décadas, las publicaciones fueron escasas y esporádicas, reflejando un interés incipiente en el uso de coagulantes naturales. A partir de 2010, la productividad comenzó a incrementarse, impulsada por la necesidad de alternativas sostenibles y por la evaluación de biomateriales como *Moringa oleifera*, *Opuntia ficus-indica* y diversos polisacáridos naturales. El incremento más pronunciado se registró entre 2018 y 2024, periodo en el cual la producción anual se triplicó, alcanzando su punto máximo en 2023 con aproximadamente 25 publicaciones por año. Este comportamiento confirma la consolidación científica del tema y su creciente relevancia dentro del campo del tratamiento ambiental.

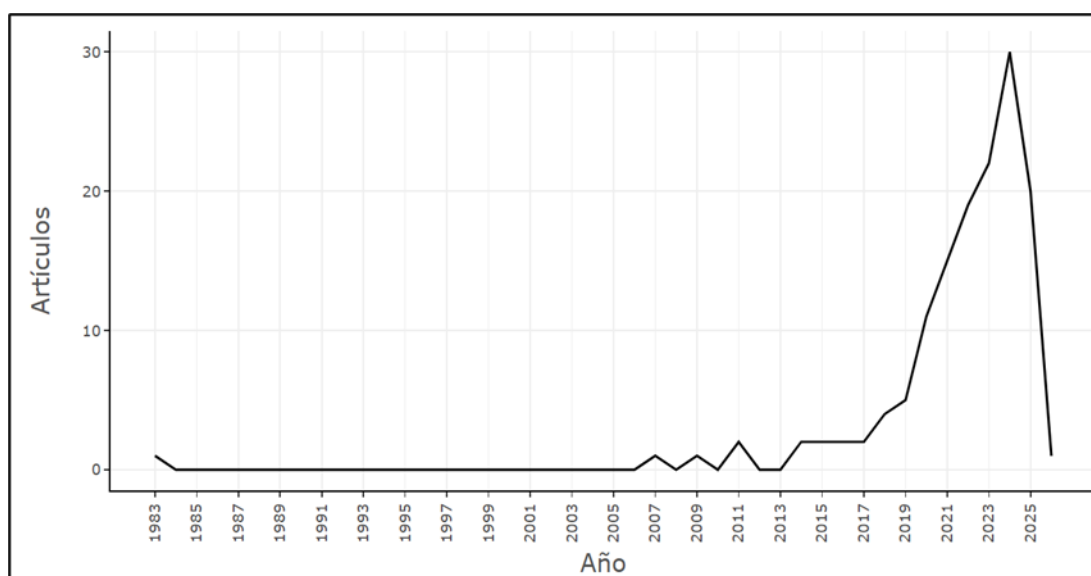


Figura 1. Producción científica anual (publicación de artículos científicos) en la base de datos de Scopus

3.2. Distribución por países y redes de colaboración

La Figura 2 muestra que la investigación sobre biocoagulantes mantuvo un crecimiento moderado hasta aproximadamente 2010, para luego acelerar de forma notable a partir de 2015. Esta tendencia se intensifica especialmente en los últimos cinco años, periodo en el que países como Indonesia, Malasia y Marruecos registran incrementos destacados en su producción científica. Brasil también evidencia una trayectoria ascendente, aunque con un ritmo de crecimiento más gradual en comparación con los demás países. El patrón observado sugiere que la consolidación de esta línea de investigación está asociada al auge de tecnologías verdes, la adopción de enfoques sostenibles en el tratamiento de aguas y la expansión de programas de investigación financiados en países en desarrollo. El comportamiento ascendente indica además que el campo continúa en expansión y que se encuentra lejos de alcanzar su madurez científica.

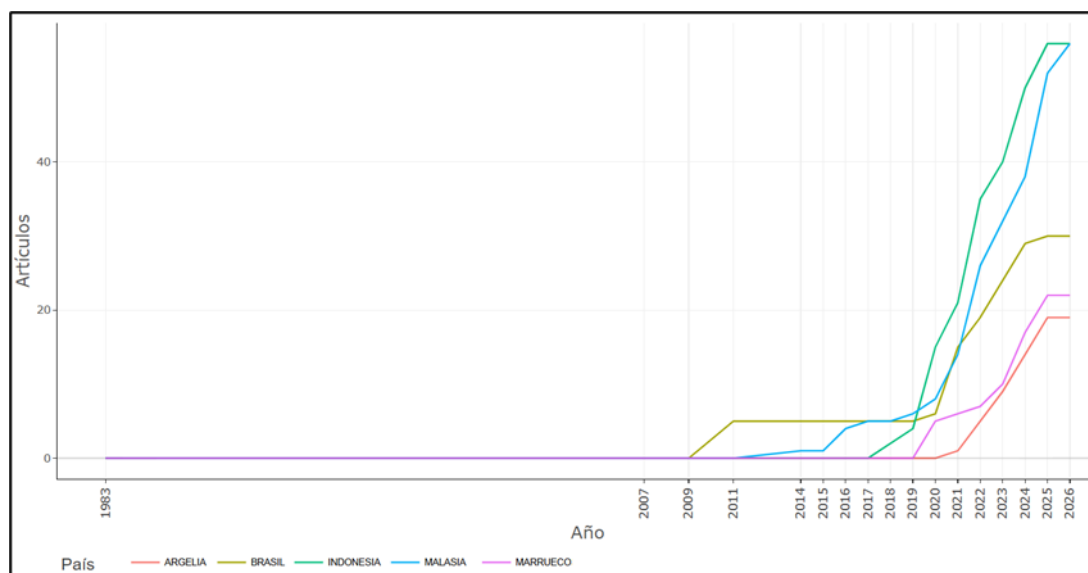


Figura 2. Producción científica anual de artículos por países, en la base de datos de Scopus a lo largo del tiempo

La Figura 3 muestra el análisis cuantitativo por países, lo cual evidencia que Indonesia lidera la producción científica, seguida de Malasia, Brasil y Marruecos. La mayoría de estas publicaciones corresponden a producción de autoría simple (SCP), aunque algunos países, como Malasia y Brasil, presentan un porcentaje significativo de artículos en colaboración internacional (MCP). Esta dualidad indica que, si bien la mayor parte del avance en biocoagulantes se desarrolla en centros de investigación locales, existe también un creciente interés por establecer alianzas internacionales para fortalecer las capacidades experimentales y ampliar el impacto de los estudios. La elevada productividad de países tropicales coincide con la abundancia de especies vegetales utilizadas como materia prima, reforzando el vínculo entre disponibilidad de recursos y desarrollo científico.

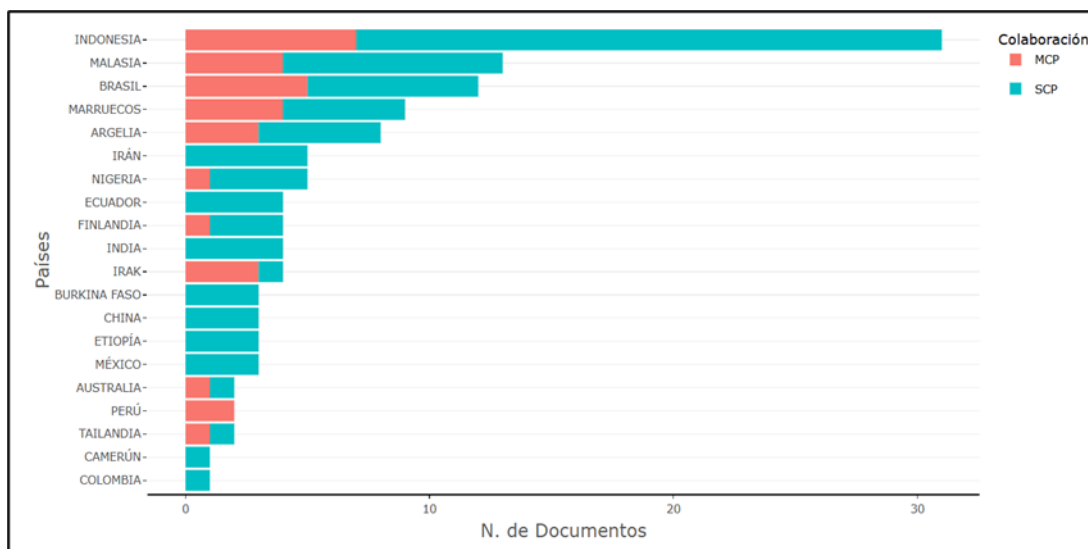


Figura 3. Cantidad de artículos científicos publicados en la base de datos de Scopus por país

La distribución geográfica de la producción científica mostrada en la **Figura 4**, evidencia que la investigación sobre biocoagulantes se encuentra concentrada principalmente en países de Asia, África y América Latina. Destacan Indonesia, Malasia, Brasil, Nigeria y Marruecos como los territorios con mayor número de publicaciones, lo que refleja tanto la disponibilidad de biomateriales locales como la necesidad de alternativas de tratamiento de bajo costo. El mapa muestra una amplia participación de países emergentes, mientras que regiones como Europa y Norteamérica presentan una contribución menor,

aunque más especializada. Esta configuración sugiere que la investigación en biocoagulación responde directamente a contextos donde la presión ambiental y las limitaciones tecnológicas impulsan la búsqueda de soluciones naturales y accesibles.

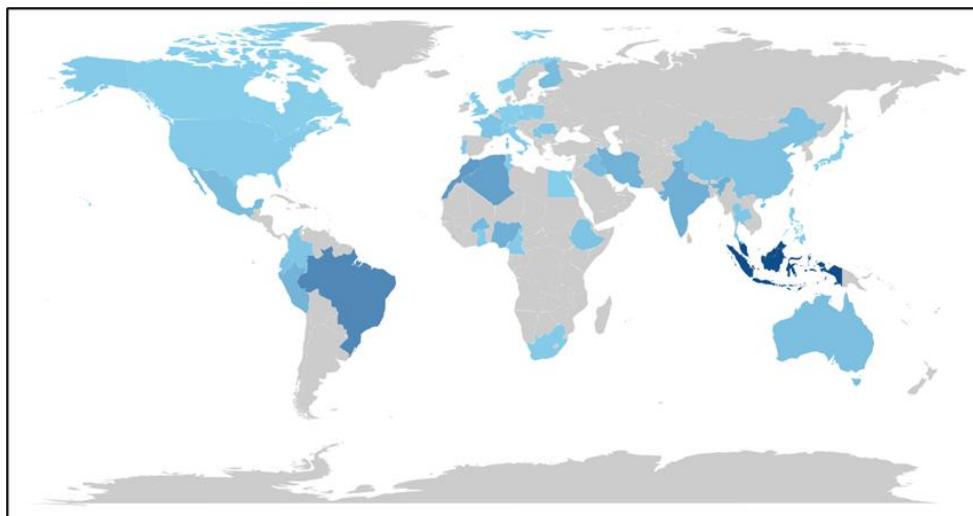


Figura 4. Producción científica anual de artículos por países, en la base de datos de Scopus

3.3. Fuentes y autores más influyentes

La Figura 5 muestra la concentración de la producción científica en un número reducido de autores que destacan por su contribución al estudio de biocoagulantes y tratamiento de aguas. El investigador con mayor productividad acumula 11 publicaciones, seguido por dos autores con 9 y 8 artículos, respectivamente. Este patrón evidencia la presencia de grupos consolidados de investigación con líneas de trabajo continuas y especializadas. Asimismo, la curva descendente hacia autores con cuatro a siete documentos sugiere una participación complementaria de investigadores emergentes que amplían la diversidad temática y metodológica del campo. En conjunto, la distribución observada revela una comunidad científica activa, aunque todavía concentrada en líderes específicos que marcan las tendencias de investigación.

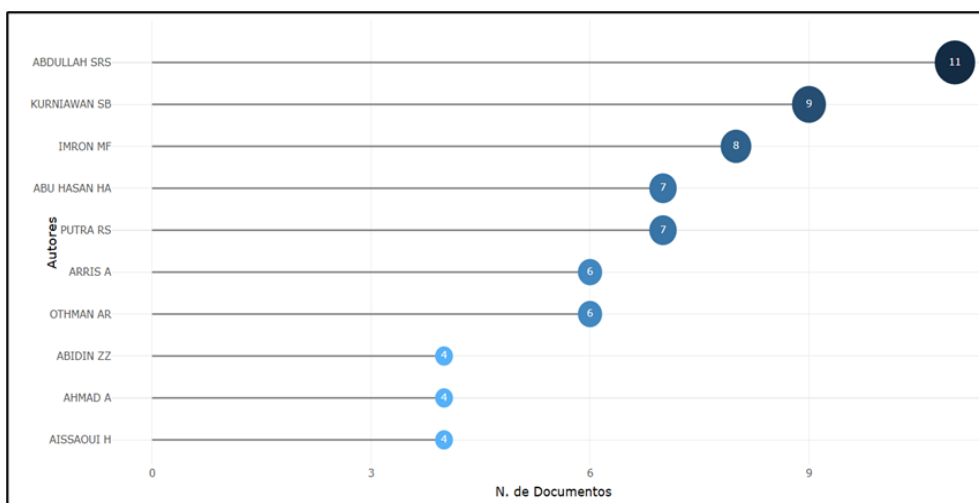


Figura 5. Autores más relevantes con mayor Cantidad de artículos científicos publicados en la base de datos Scopus

La Figura 6 presenta el desempeño de las instituciones con mayor volumen de publicaciones. Se observa que Universiti Kebangsaan Malaysia encabeza la lista con 18 artículos, seguida de Universitas Islam Indonesia con 13 trabajos. Otras instituciones asiáticas, como Universitas Airlangga y Universiti Putra

Malaysia, muestran una producción estable con 9 publicaciones cada una. Esta concentración institucional indica que la investigación en biocoagulantes posee un fuerte desarrollo en universidades de Asia, región donde existe amplio interés por tecnologías sostenibles para el tratamiento de efluentes. Del mismo modo, la presencia de universidades de América Latina —como la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y la Universidad Técnica de Manabí— refleja una expansión del tema hacia contextos emergentes que presentan necesidades reales de tratamiento de aguas. En general, la distribución institucional confirma la existencia de polos regionales de investigación con creciente interacción internacional.

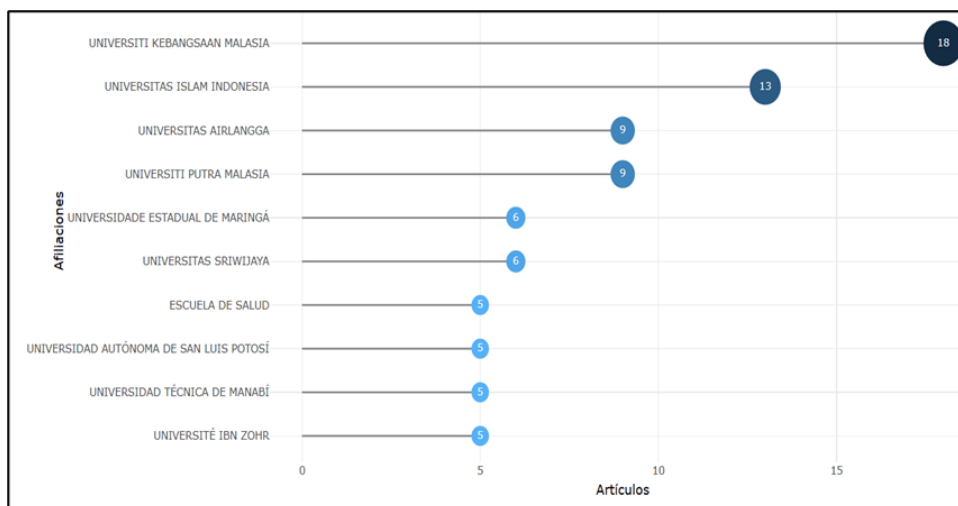


Figura 6. Afiliações más relevantes con mayor cantidad de artículos científicos publicados en la base de datos de Scopus

3.4. Análisis de palabras clave y formación de clústeres

La Figura 7 muestra la estructura conceptual del campo mediante un análisis de co-ocurrencia de palabras clave. El mapa revela cuatro agrupaciones principales que organizan la literatura sobre coagulación y remoción de contaminantes.

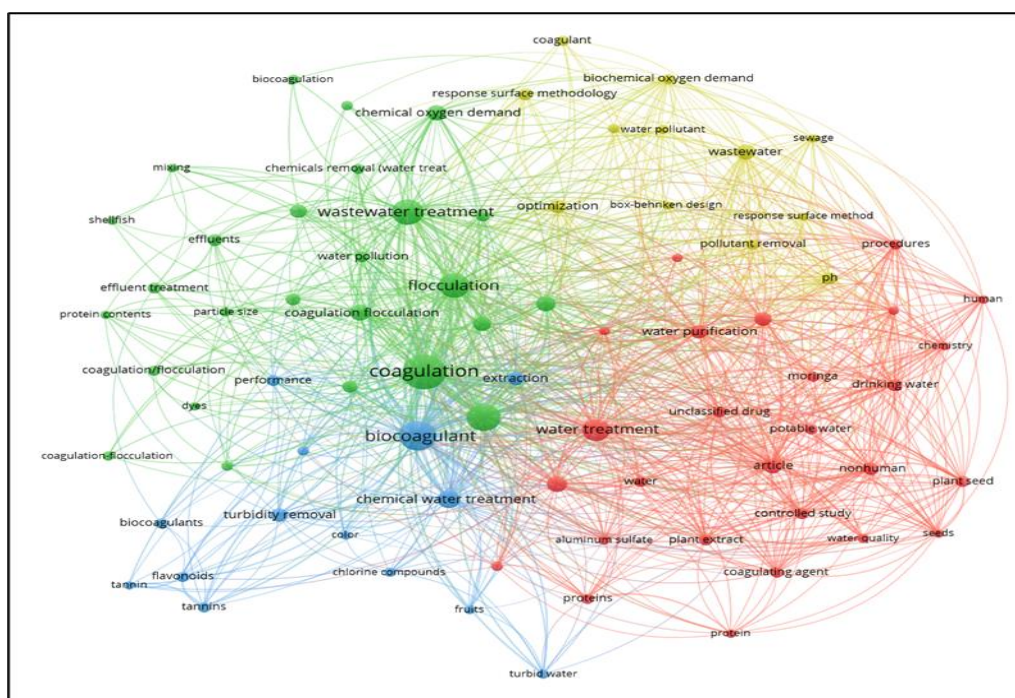


Figura 7. Mapa de co-ocurrencia de palabras clave agrupado por clústeres temáticos

El clúster rojo se asocia con estudios orientados al tratamiento de aguas residuales, donde predominan términos vinculados a desempeño del proceso, tratamiento de efluentes y control de parámetros como turbidez o demanda química de oxígeno. El clúster verde concentra las investigaciones enfocadas en potabilización y calidad del agua, resaltando conceptos como pH, agua potable, remoción de contaminantes y aplicaciones en agua de consumo. El clúster azul está compuesto por trabajos centrados en coagulantes naturales, en especial biopolímeros y extractos vegetales utilizados como alternativas a los coagulantes convencionales. Finalmente, el clúster amarillo agrupa estudios sobre metodologías experimentales y optimización, destacando enfoques como respuesta superficial y evaluación de condiciones operativas.

La Figura 8 permite observar cómo han ido cambiando las líneas de investigación a lo largo del periodo analizado. Los colores indican el promedio de aparición por año de cada palabra clave, lo cual facilita identificar temas emergentes y áreas que han ganado relevancia recientemente. Las palabras situadas en tonos amarillos corresponden a los estudios más recientes, donde destacan términos vinculados a la optimización de procesos, el control de parámetros como pH y la remoción de contaminantes específicos. Esto sugiere una transición hacia investigaciones más orientadas al ajuste fino del proceso y la evaluación de la eficacia bajo distintas condiciones operativas. Las palabras en tonos verdes reflejan un periodo intermedio en el que se consolidaron temas como coagulación, floculación y tratamiento de aguas residuales, que siguen siendo núcleos conceptuales del campo. Los términos en tonos azulados representan las líneas de investigación más antiguas, entre ellas estudios sobre coagulantes naturales, extracción de biopolímeros y aplicaciones iniciales de materiales alternativos. Este patrón temporal indica que el interés científico ha evolucionado desde la exploración de alternativas naturales hacia una etapa de optimización y evaluación del desempeño, lo que evidencia la maduración del campo y su progresiva orientación hacia aplicaciones más específicas y exigentes.

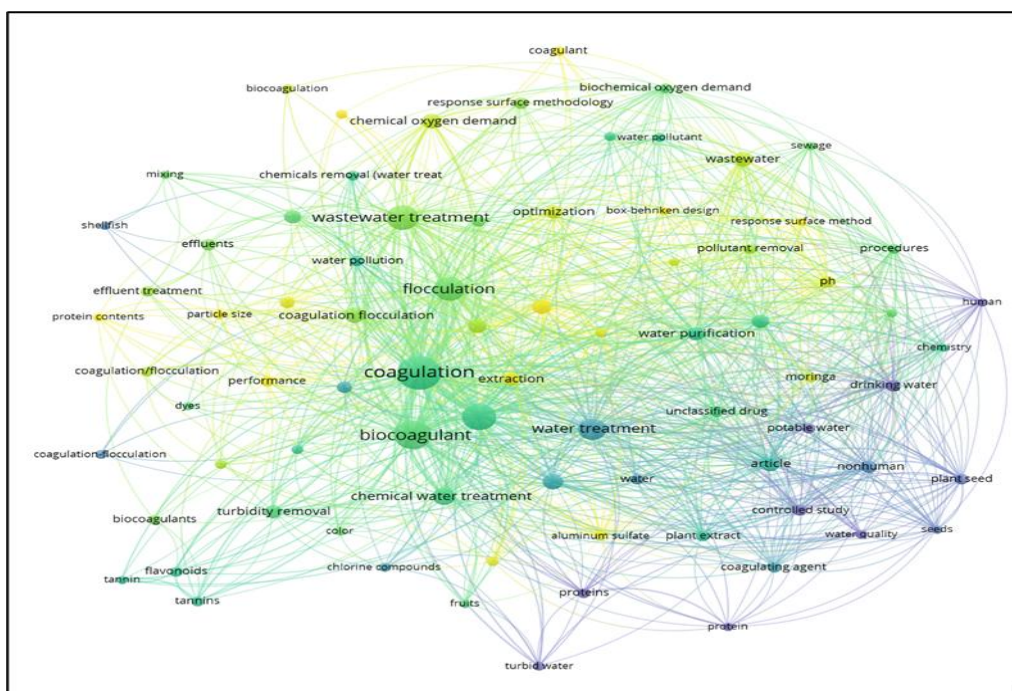


Figura 8. Mapa de co-ocurrencia de palabras clave basado en la evolución temporal de la producción científica

A continuación, se presenta el análisis interpretativo de cada clúster.

Clúster 1 (rojo): Tratamiento de aguas residuales con biocoagulantes y desempeño del proceso

Las investigaciones agrupadas en este clúster evidencian que el desempeño de los biocoagulantes en el tratamiento de aguas residuales depende estrechamente de la naturaleza del efluente y de las condiciones

operativas del proceso. Estudios experimentales en aguas residuales textiles, agroindustriales y de procesamiento de alimentos han demostrado que extractos vegetales y biopolímeros naturales pueden alcanzar remociones elevadas de turbidez, sólidos suspendidos y color cuando se ajustan cuidadosamente variables como pH, dosis y régimen de mezcla (Benalia et al., 2024; Elguera et al., 2024). En efluentes con alta carga coloidal, los biocoagulantes basados en proteínas y polisacáridos muestran mecanismos efectivos de neutralización de cargas y formación de flóculos estables, lo que se refleja en eficiencias comparables a las obtenidas con coagulantes convencionales bajo condiciones controladas (Belbahloul et al., 2015; Sané et al., 2024; Shahzadi et al., 2024).

No obstante, la literatura también señala limitaciones asociadas a la complejidad química de ciertos efluentes, particularmente aquellos con fracciones solubles recalcitrantes o elevada salinidad. En estos casos, la eficiencia del proceso presenta mayor variabilidad, requiriendo frecuentemente ajustes finos o el uso de coadyuvantes naturales para mejorar la sedimentación (Cadena et al., 2024; Fadli et al., 2024). Aplicaciones en aguas residuales de acuicultura y efluentes domésticos tratados con quitosano, Moringa oleífera y mucílagos vegetales indican que el desempeño a escala de laboratorio es prometedor, pero debe ser validado en condiciones reales para garantizar estabilidad operativa y reproducibilidad del proceso (Dotto et al., 2019; Fan et al., 2025; Kurniawan et al., 2025; Namane et al., 2025).

Clúster 2 (verde): Potabilización y calidad del agua para consumo humano mediante el uso de biocoagulantes

Los estudios incluidos en este clúster se centran en la aplicación de biocoagulantes para la clarificación y mejora de la calidad de aguas destinadas al consumo humano, principalmente fuentes superficiales con elevada turbidez. Investigaciones experimentales han demostrado que extractos de semillas, cortezas y biopolímeros naturales pueden reducir significativamente la turbidez y el contenido de materia orgánica, facilitando el cumplimiento de estándares de calidad para agua potable (Varala et al., 2025). La efectividad observada se atribuye a la presencia de proteínas catiónicas y grupos funcionales capaces de interactuar con partículas suspendidas, favoreciendo su agregación y posterior remoción (Fagundes-Klen et al., 2023; Katayon et al., 2006; Kolya & Kang, 2023).

Adicionalmente, trabajos recientes destacan el interés creciente en los biocoagulantes como alternativa en comunidades rurales o regiones con acceso limitado a insumos químicos convencionales. Ensayos con aguas naturales muestran que, además de la reducción de turbidez, algunos biocoagulantes contribuyen a disminuir la carga microbiológica cuando se combinan con procesos de desinfección, aunque se enfatiza la necesidad de controlar la dosificación para evitar el incremento de materia orgánica residual (Bello & Leiviskä, 2022; Pacheco et al., 2023). Estos resultados refuerzan el potencial de los biocoagulantes como solución sostenible para potabilización descentralizada, siempre que se evalúen cuidadosamente los riesgos asociados a la estabilidad y biodegradabilidad del material añadido (Choy et al., 2014; Konkobo et al., 2023; Koul et al., 2022; Pritchard et al., 2010).

Clúster 3 (azul): Coagulantes naturales y alternativas sostenibles

Este clúster agrupa investigaciones orientadas al desarrollo y evaluación de coagulantes naturales como alternativas sostenibles a los productos químicos tradicionales. Los estudios experimentales demuestran que materiales de origen vegetal, animal y microbiano presentan una huella ambiental reducida y una menor generación de lodos tóxicos, alineándose con los principios de la economía circular (Rodrigues et al., 2023; Shah et al., 2023). Biopolímeros como el quitosano, almidones modificados y extractos vegetales han mostrado alta afinidad por partículas coloidales, permitiendo una remoción eficiente de contaminantes sin introducir compuestos metálicos al sistema acuático (Birhanu & Leta, 2021; Kurniawan et al., 2023; Ndabigengesere & Subba Narasiah, 1998).

Asimismo, la literatura reciente destaca avances en la valorización de residuos agroindustriales como fuente de biocoagulantes, lo que refuerza su viabilidad económica y ambiental. Investigaciones con subproductos agrícolas evidencian que estos materiales pueden ser transformados en coagulantes funcionales con desempeño competitivo, especialmente en tratamientos primarios y secundarios (Braga et al., 2018; Kapse & Samadder, 2021). Sin embargo, los autores coinciden en que la variabilidad composicional de los materiales naturales exige una caracterización rigurosa para garantizar consistencia en el proceso y facilitar su escalamiento industrial (Okuda et al., 2001; Sánchez-Martín et al., 2010; Tomasi et al., 2026).

Clúster 4 (amarillo): Optimización experimental y metodología

Los trabajos de este clúster se enfocan en la optimización de procesos de coagulación-floculación mediante enfoques estadísticos y metodológicos avanzados. Investigaciones experimentales han aplicado metodologías como el diseño de experimentos y la superficie de respuesta para identificar combinaciones óptimas de pH, dosis y tiempo de mezcla en el uso de biocoagulantes (Mutar et al., 2025; Okolo et al., 2021). Estos enfoques permiten reducir el número de ensayos necesarios y mejorar la comprensión de las interacciones entre variables, resultando en incrementos sustanciales de eficiencia y estabilidad del proceso (López-Maldonado et al., 2014; Pujiastuti et al., 2022).

De manera complementaria, estudios metodológicos destacan la importancia de estandarizar protocolos experimentales para facilitar la comparación entre distintos biocoagulantes y matrices acuosas (Agbakpe et al., 2014; Chethana et al., 2016). El uso de jar-test controlados, análisis cinéticos y herramientas de modelado ha permitido establecer rangos operativos robustos y reproducibles. En conjunto, estos trabajos refuerzan que la optimización no solo mejora el desempeño técnico, sino que es clave para evaluar la viabilidad económica y ambiental de los biocoagulantes en aplicaciones a mayor escala (Dinu et al., 2010; Ferasat et al., 2020; Frantz et al., 2020; Otálora et al., 2022).

CONCLUSIONES

La presente revisión analizó de manera sistemática la investigación científica indexada en Scopus sobre el uso de biocoagulantes en el tratamiento y potabilización del agua, organizando la literatura en cuatro clústeres temáticos. En conjunto, los estudios evidencian que los biocoagulantes derivados de fuentes vegetales, biopoliméricas y residuos agroindustriales presentan un alto potencial para la remoción de turbidez, sólidos suspendidos y materia orgánica, alcanzando eficiencias comparables a los coagulantes químicos convencionales bajo condiciones operativas optimizadas. Sin embargo, su desempeño está fuertemente condicionado por la matriz del agua, el pH, la dosis y el método de extracción, lo que refuerza la necesidad de caracterizar cada efluente antes de su aplicación.

Asimismo, la revisión demuestra que los avances más relevantes se concentran en la optimización metodológica y la comprensión de los mecanismos de coagulación-floculación, mediante diseños experimentales multivariantes y análisis fisicoquímicos avanzados. Estos enfoques han permitido mejorar la reproducibilidad, reducir el consumo de insumos y facilitar la transferencia tecnológica hacia escalas piloto. No obstante, persisten desafíos asociados a la estandarización de los biocoagulantes, la variabilidad de su composición y la validación en sistemas reales de tratamiento continuo. En este contexto, futuras investigaciones deberían priorizar estudios a escala real, evaluaciones de ciclo de vida y análisis costo-beneficio, con el fin de consolidar a los biocoagulantes como alternativas sostenibles y técnicamente viables dentro de los sistemas modernos de gestión y tratamiento del agua.

FINANCIAMIENTO

Los autores declaran no haber recibido ningún patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores del presente trabajo declaran no presentar ningún tipo de conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Delmester Chuquimbalqui Marina, Ivan Chuquimbalqui Marina, Yrwin Daniel Azabache Aliaga: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Metodología, Supervisión, Visualización, Redacción - borrador original y Redacción - revisión y edición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agbakpe, M., Ge, S., Zhang, W., Zhang, X., & Kobylarz, P. (2014). Algae harvesting for biofuel production: Influences of UV irradiation and polyethylenimine (PEI) coating on bacterial biocoagulation. *Bioresource Technology*, 166, 266–272. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.060>
- Ahmad, A., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Kurniawan, S. B. (2024). Aquaculture wastewater treatment using plant-based coagulants: Evaluating removal efficiency through the coagulation-flocculation process. *Results in Chemistry*, 7, 101390. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101390>
- Anele, B. C., Okerentugba, P. O., Stanley, H. O., Immanuel, O. M., Ikeh, I. M., Ukanwa, C. C., & Okonko, I. O. (2023). Treatment of abattoir wastewater using Moringa oleifera seed and snail shell in Rivers State, Nigeria. *Scientia Africana*, 22(2), 287–296. <https://doi.org/10.4314/sa.v22i2.25>
- Belbahloul, M., Zouhri, A., & Anouar, A. (2015). Biofloculants extraction from Cactaceae and their application in treatment of water and wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 7, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.07.002>
- Bello, A., & Leiviskä, T. (2022). Sustainable tannin-based coagulants synthesized through Mannich reaction using melamine as an amine source for water treatment applications. *Industrial Crops and Products*, 176, 114336. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114336>
- Benalia, A., Atime, L., Baatache, O., Khalfaoui, A., Ghomrani, A. F., Derbal, K., Pizzi, A., Panico, A., Bouchareb, E. M., Bouchareb, R., & Amirou, S. (2024). Removal of lead in water by coagulation flocculation process using Cactus-based natural coagulant: optimization and modeling by response surface methodology (RSM). *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(3), 244. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12412-9>
- Birhanu, Y., & Leta, S. (2021). Application of response surface methodology to optimize removal efficiency of water turbidity by low-cost natural coagulant (Odaracha soil) from Saketa District, Ethiopia. *Results in Chemistry*, 3, 100108. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100108>
- Braga, W. L. M., Roberto, J. A., Vaz, C., Samanamud, G. R. L., Loures, C. C. A., França, A. B., Lofrano, R. C. Z., Naves, L. L. R., José Henrique de Freitas Gomes, J. H., & Naves, F. L. (2018). Extraction and optimization of tannin from the flower of Musa sp. applied to the treatment of iron ore dump. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4310–4317. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.058>

- Cadena, A. P., Cevallos-Cedeño, R. E., & García Muentes, S. A. (2024). Evaluation of the coagulant property of carica papaya seeds in surface water treatment. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 23(3), 1–10. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA24301>
- Chethana, M., Sorokhaibam, L. G., Bhandari, V. M., Raja, S., & Ranade, V. V. (2016). Green Approach to Dye Wastewater Treatment Using Biocoagulants. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(5), 2495–2507. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b01553>
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., & Ramanan, R. N. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Sciences*, 26(11), 2178–2189. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.024>
- Dinu, I. A., Mihai, M., & Dragan, E. S. (2010). Comparative study on the formation and flocculation properties of polyelectrolyte complex dispersions based on synthetic and natural polycations. *Chemical Engineering Journal*, 160(1), 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.018>
- Dotto, J., Fagundes-Klen, M. R., Veit, M. T., Palácio, S. M., & Bergamasco, R. (2019). Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 208, 656–665. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.112>
- Elguera, N. Y. M., Pulcha, S. E. S., Ballon, E. M. M., Castro, M. R. F., Ramos, L. M. M., Tohalino, V. L. A., Sarmiento, P. K. D., Almeida, V. C., & Pacheco, H. G. J. (2024). Evaluation of Biocoagulant “Opuntia ficus-indica and Chitosan” to Improve the Removal of Contaminants in Dairy Effluents through Electrocoagulation. *Journal of Chemistry*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/6351954>
- Fadli, M. I., Bustan, M. D., & Haryati, S. (2024). Reducing Pollutants in Coal Wastewater with Moringa oleifera and Natural Biocoagulants Combination. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(8), 232–244. <https://doi.org/10.12912/27197050/189806>
- Fagundes-Klen, M. R., Gullich, C. T. B., Triques, C. C., Formentini-Schmitt, D. M., Veit, M. T., & Bergamasco, R. (2023). Valorization of the Coagulant Bioactive Compound of the Moringa seed Residue: Treatability of Fish Processing Residuary Waters. *Waste and Biomass Valorization*, 14(12), 4113–4126. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02110-x>
- Fan, L., Peng, R., Liu, X., Li, Z., Wang, Q., & Peng, S. (2025). Superior performance of a novel chitosan-based flocculant in sludge treatment: Synthesis, chelating mechanism, and engineering application by interconnected porous structure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(5), 117841. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117841>
- Ferasat, Z., Panahi, R., & Mokhtarani, B. (2020). Natural polymer matrix as safe flocculant to remove turbidity from kaolin suspension: Performance and governing mechanism. *Journal of Environmental Management*, 255, 109939. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109939>
- Frantz, T. S., Farias, B. S. de, Leite, V. R. M., Kessler, F., Cadaval Jr, T. R. S., & Pinto, L. A. de A. (2020). Preparation of new biocoagulants by shrimp waste and its application in coagulation-flocculation processes. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122397. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122397>
- Kapse, G., & Samadder, S. R. (2021). Moringa oleifera seed defatted press cake based biocoagulant for the treatment of coal beneficiation plant effluent. *Journal of Environmental Management*, 296, 113202. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113202>
- Katayon, S., Noor, M. J. M. M., Asma, M., Ghani, L. A. A., Thamer, A. M., Azni, I., Ahmad, J., Khor, B. C., & Suleyman, A. M. (2006). Effects of storage conditions of Moringa oleifera seeds on its performance in

- coagulation. *Bioresource Technology*, 97(13), 1455–1460.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.07.031>
- Kolya, H., & Kang, C.-W. (2023). Bio-Based Polymeric Flocculants and Adsorbents for Wastewater Treatment. *Sustainability*, 15(12), 9844. <https://doi.org/10.3390/su15129844>
- Konkobo, F. A., Savadogo, P. W., Diao, M., Dakuyo, R., & Dicko, M. H. (2023). Evaluation of the effectiveness of some local plant extracts in improving the quality of unsafe water consumed in developing countries. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1134984>
- Koul, B., Bhat, N., Abubakar, M., Mishra, M., Arukha, A. P., & Yadav, D. (2022). Application of Natural Coagulants in Water Treatment: A Sustainable Alternative to Chemicals. *Water*, 14(22), 3751. <https://doi.org/10.3390/w14223751>
- Kurniawan, S. B., Ahmad, A., Said, N. S. M., Gustinasari, K., Abdullah, S. R. S., & Imron, M. F. (2023). The influence of preparation and pretreatment on the physicochemical properties and performance of plant-based biocoagulants in treating wastewater. *Environmental Advances*, 14, 100441. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100441>
- Kurniawan, S. B., Haya, A. A., Soedarti, T., Kuncoro, E. P., Sługocki, Ł., Nowakowski, K., Abdul, P. M., & Imron, M. F. (2025). Revealing the potential of extracted Tamarindus indica seed as a biocoagulant for aquaculture wastewater treatment: Effect of solvent type, concentration, dose, and toxicity assessment. *Results in Engineering*, 27, 105710. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105710>
- López-Maldonado, E. A., Oropeza-Guzman, M. T., Jurado-Baizaval, J. L., & Ochoa-Terán, A. (2014). Coagulation–flocculation mechanisms in wastewater treatment plants through zeta potential measurements. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.025>
- Mutar, Z. H., Al-Baldawi, I. A., & Abdullah, S. R. S. (2025). Sustainable treatment of palm oil mill effluent and repurposing of sludge as a micronutrient resource. *Journal of King Saud University – Science*, 37, 9862025. https://doi.org/10.25259/JKSUS_986_2025
- Namane, P. I., Letshwenyo, M. W., & Yahya, A. (2025). Evaluation of plant-based coagulants for turbidity removal and coagulant dosage prediction using machine learning. *Environmental Technology*, 46(14), 2570–2585. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2439183>
- Ndabigengesere, A., & Subba Narasiah, K. (1998). Quality of water treated by coagulation using Moringa oleifera seeds. *Water Research*, 32(3), 781–791. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00295-9)
- Neffa, M., Taourirte, M., Ouazzani, N., & Hanine, H. (2020). Eco-friendly approach for elimination of olive mill wastewaters (OMW) toxicity using cactus prickly pears juice as a coagulant. *Water Practice and Technology*, 15(4), 1050–1067. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.076>
- Nzeyimana, B. S., & Mary, A. D. C. (2024). Sustainable sewage water treatment based on natural plant coagulant: Moringa oleifera. *Discover Water*, 4(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00069-x>
- Okolo, B. I., Adeyi, O., Oke, E. O., Agu, C. M., Nnaji, P. C., Akatobi, K. N., & Onukwuli, D. O. (2021). Coagulation kinetic study and optimization using response surface methodology for effective removal of turbidity from paint wastewater using natural coagulants. *Scientific African*, 14, e00959. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00959>
- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from moringa oleifera seed by salt solution. *Water Research*, 35(2), 405–410. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00290-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00290-6)

- Otálora, M., Wilches-Torres, A., Lara, C., Cifuentes, G., & Gómez Castaño, J. (2022). Use of *Opuntia ficus-indica* Fruit Peel as a Novel Source of Mucilage with Coagulant Physicochemical/Molecular Characteristics. *Polymers*, 14(18), 3832. <https://doi.org/10.3390/polym14183832>
- Pacheco, H. G. J., Elguera, N. Y. M., Mamani, M. R. A., Alvarez, N. P. L., & de Cinque Almeida, V. (2023). Treatment of textile wastewater by electrocoagulation process assisted with biocoagulant obtained from the pitahaya peels. *Desalination and Water Treatment*, 283, 1–10. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29186>
- Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A. S., & O'Neill, J. G. (2010). A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(13–14), 798–805. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.014>
- Pujiastuti, P., Wibowo, Y. M., & Narimo, N. (2022). Moringa Seed Powder Biocoagulant (*Moringa oleifera*) for Improving Laboratory Wastewater Quality. *Molekul*, 17(3), 301. <https://doi.org/10.20884/1.jm.2022.17.3.5461>
- Rodrigues, J. R. da S., Santos, R. da S., Matos, R. A., Pires, J. C. M., & Salgado, E. M. (2023). Sustainable Microalgal Harvesting Process Applying *Opuntia cochenillifera*: Process Parameters Optimization. *Applied Sciences*, 13(2), 1203. <https://doi.org/10.3390/app13021203>
- Sánchez-Martín, J., Beltrán-Heredia, J., & Solera-Hernández, C. (2010). Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials. *Journal of Environmental Management*, 91(10), 2051–2058. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.05.013>
- Sané, N., Sivalingam, P., Koželuh, M., Mbengue, M., Stoll, S., Poté, J., & Le Coustumer, P. (2024). Effect of *Moringa oleifera* seeds on the removal of pathogens and pharmaceutical residues in a domestic wastewater treatment plant by an interdisciplinary approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(56), 65123–65136. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35362-8>
- Shah, R. A. R., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Ismail, N. 'Izzati. (2023). Prospective plants as biocoagulant-flocculants for removal of total suspended solids in coffee effluent treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 198, 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.09.002>
- 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>
- Tomasi, I. T., Boaventura, R. A. R., & Botelho, C. M. S. (2026). Comparative study of natural and chemical coagulants for continuous-flow treatment of textile wastewater. *Chemical Engineering Science*, 320, 122476. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122476>
- Varala, S., Kumari, A., Buruga, K., Bhargava, S. K., & Parthasarathy, R. (2025). Abating cationic dye in wastewater using natural coagulants. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 44(1). <https://doi.org/10.1002/ep.14523>
- Varsani, V., Vyas, S. J., & Dudhagara, D. R. (2022). Development of bio-based material from the *Moringa oleifera* and its bio-coagulation kinetic modeling–A sustainable approach to treat the wastewater. *Heliyon*, 8(9), e10447. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10447>