

## Análisis de la viabilidad y aplicación de un coagulante combinado a base de semillas de moringa oleífera en el tratamiento de aguas

### Feasibility analysis and application of a combined coagulant based on moringa oleifera seeds in water treatment

Daniel Fernando Erazo 

Adriana Katherine Niño Vargas , Diego Alejandro Nunez Vallejos 

Universidad del Valle, Colombia

OPEN  ACCESS

**Recibido:**

13/06/2024

**Aceptado:**

09/08/2024

**Publicado:**

27/09/2024

**Correspondencia:**

daniel.fernando.erazo@correounivalle.edu.co

**DOI:**

<https://doi.org/10.17081/invinno.12.2.7069>



Copyright 2024 by  
Investigación e Innovación en  
Ingenierías

#### Resumen

**Objetivo:** Hacer un análisis de viabilidad técnica de un biocoagulante derivado de semillas de Moringa oleífera, como una alternativa para reducir el consumo de sales inorgánicas, aprovechando el efecto combinado de coagulantes inorgánicos y biocoagulantes. **Metodología:** Para llevar a cabo este estudio, se empleó un diseño factorial 4x2 en el cual se disolvió el biocoagulante combinado en diferentes concentraciones de cloruro de sodio (0.25M, 0.5M y, 0.75M) con el objetivo de determinar la eficiencia en la eliminación de turbiedad, color y potencial Z en distintos niveles de combinación de biocoagulante y sulfato de aluminio. **Resultados:** Los resultados señalaron que el polvo de Moringa (MO), al interactuar con otros compuestos mediante adsorción, puentes y complejos, facilita la coagulación, promoviendo la formación de flocs. Además, se observó que al diluir el polvo en solución salina de 0.75 M se obtiene un biocoagulante que conserva parte de los componentes activos, pese a la degradación parcial de algunas proteínas. En contraste, con una concentración de sal de 0.5 M y una combinación de sulfato de aluminio y Moringa oleífera de 50/50, se lograron remociones de hasta un 98% de turbiedad y color. **Conclusiones:** Se evidenció el alto potencial del coagulante combinado para reducir la turbiedad y el color en el agua con un menor requerimiento de sales inorgánicas. Sin embargo, se observó una limitación en la vida útil del biocoagulante, lo que sugiere la necesidad de investigar métodos para prolongar su conservación.

**Palabras claves:** Biocoagulante, tratamiento de agua, coagulante combinado, Moringa, potencial z, turbiedad.

#### Abstract

**Objective:** Perform a technical feasibility analysis of a biocoagulant derived from Moringa oleifera seeds, as an alternative to reduce the consumption of inorganic salts, taking advantage of the combined effect of inorganic coagulants and biocoagulants. **Methodology:** To carry out this study, a 4x2 factorial design was used in which the combined biocoagulant was dissolved in different concentrations of sodium chloride (0.25M, 0.5M and 0.75M) to determine the efficiency in the elimination of turbidity, colour and Z potential at different levels of combination of biocoagulant and aluminium sulphate. **Results:** The results indicated that Moringa powder (MO), by interacting with other compounds through adsorption, bridges, and complexes, facilitates coagulation, promoting the formation of flocs. In addition, it was observed that diluting the powder in 0.75 M saline resulted in a biocoagulant that retained part of the active components, despite the partial degradation of some proteins. In contrast, with a salt concentration of 0.5 M and a 50/50 combination of aluminium sulphate and Moringa oleifera, removals of up to 98% of turbidity and colour were achieved. **Conclusions:** The high potential of the combined coagulant to reduce turbidity and colour in water with a lower requirement of inorganic salts was evident. However, a limitation in the shelf life of the biocoagulant was observed, suggesting the need to investigate methods to prolong its shelf life.

**Keywords:** biocoagulant, water treatment, combined coagulant, Moringa, z potential, turbidity.

**Como citar (IEEE):** D.F. Erazo, A. K. N. Vargas, D.A. Nunez, "Análisis de la viabilidad y aplicación de un coagulante combinado a base de semillas de moringa oleífera en el tratamiento de aguas", Investigación e Innovación en Ingenierías, vol. 12, no. 2, pp. 108-121, 2024, doi: <https://doi.org/10.17081/invinno.12.2.7069>

## Introducción

El recurso hídrico es vital para todas las formas de vida, sin embargo, el crecimiento poblacional y desarrollo económico mundial ha incrementado los niveles de contaminación en el agua [1]. A pesar de que las tecnologías de final de tubo son ampliamente usadas para el tratamiento de aguas, el uso no controlado de insumos químicos en el proceso de coagulación y floculación generan lodos con alto contenido de metales como hierro y aluminio [2]. Los lodos sin tratamiento que son descargados a fuentes superficiales forman piscinas en sistemas lénticos que contribuyen a la desoxigenación del agua y aumentan su turbiedad y color [3]. Adicionalmente, la captación y consumo de aguas con altas concentraciones de hierro y aluminio causan enfermedades o daños al sistema nervioso central [4, 5, 6]. Una de las alternativas para abordar esta problemática es la sustitución de las sales inorgánicas usadas en el proceso de coagulación-floculación por biocoagulantes, es decir por compuestos de origen vegetal o animal con propiedades de alta biodegradabilidad. Dentro de los beneficios encontrados en la literatura se encuentran: manipulación segura y biodegradabilidad de los lodos producidos, permitiendo su utilización en la agricultura; menor producción de lodos tóxicos; menor corrosión de las instalaciones y reducción en el uso de neutralizantes [7].

Varios autores han desarrollado diferentes investigaciones respecto al tratamiento de aguas, haciendo uso de biocoagulantes en sistemas convencionales. Ang & Mohammad [8]; Lichtfouse et al. [9]; Kurniawan et al. [10]; Gandiwa et al. [11] presentan estudios donde se alcanzan altas eficiencias en la remoción de turbiedad cuando se utilizan coagulantes naturales, principalmente de quitosano o de origen vegetal, en diversas aplicaciones de tratamiento de aguas. El principio de funcionamiento de estos compuestos son mecanismos de adsorción y neutralización de cargas, por la presencia de proteínas catiónicas que actúan como posibles aglutinantes [12, 13, 14, 15, 16]. Como sus cargas superficiales son más débiles que la de las sales inorgánicas; generalmente, se requieren mayores cantidades de coagulantes [17, 18]. Diferentes estudios plantean algunos desafíos en la industrialización de los coagulantes naturales, destacando como principal obstáculo, las dudas en el uso de coagulantes naturales principalmente debido a los costos de producción y a la cantidad coagulante natural requerido en los procesos de tratamiento a escala industrial [19, 20, 21, 22]. Autores como Saritha et al. [23]; Choy et al. [24]; Ghebremichael et al. [25] plantean que otro de los desafíos está asociado a la estabilidad de los coagulantes naturales, lo cual se relaciona con su corta vida útil por su composición principal de sustancias biológicas degradables y susceptibles al ataque microbiológico. Sin embargo, investigaciones como la de Kurniawan et al. [10] indican que las mezclas de productos químicos orgánicos e inorgánicos pueden ser más eficientes que los productos químicos solos [26, 27]. La mezcla correcta de coagulantes inorgánicos y orgánicos puede combinar las ventajas de ambos tipos: el mecanismo de barrido-floculación del primero y la reducción de la generación de lodos del segundo.

El presente estudio hace un análisis de la viabilidad técnica experimental para el uso de un coagulante combinado basado en semillas de Moringa Oleífera (MO) para el tratamiento de aguas. Se evaluó la eficiencia en la reducción de turbiedad y color, y la estabilidad del producto en términos de su vida útil.

## Metodología

### Preparación del biocoagulante basado en semillas de Moringa Oleífera

La preparación del biocoagulante se realizó mediante el procesamiento de semillas de Moringa Oleífera cultivadas en el Departamento del Valle del Cauca, Colombia. Los procesos involucrados en la obtención del biocoagulante fueron: descascarado manual, extracción de aceites mediante prensado en frío (Prensa hidráulica,

ATECOM 5000 psi), reducción de tamaño por molienda (Moongiantgo, HO-700). El polvo obtenido se tamizó por medio de un tamiz de 850  $\mu\text{m}$  y se diluyó en diferentes concentraciones de cloruro de sodio NaCl (0.25M, 0.5M y 0.75M) para realizar la extracción de los componentes catiónicos.

Figura 1. Proceso de preparación del biocoagulante basado en semillas de Moringa oleífera.



Fuente: Elaboración propia.

## Caracterización del biocoagulante

### Caracterización del polvo de la semilla.

Los parámetros medidos para el polvo de la semilla fueron: distribución de tamaño de partícula (tamices 20, 40, 60 y 100 de la serie de Taylor), humedad por balanza de secado (RADWAG, MAC 50) y porcentaje de aceites por el método de extracción Soxhlet con hexano.

Como parte de la caracterización del producto, se realizó un análisis de los grupos funcionales del coagulante natural mediante Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) a través de la técnica de muestreo ATR en el rango de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

### Caracterización del polvo de la semilla en solución salina.

Para la caracterización del polvo de semilla de Moringa Oleífera, se evaluaron los siguientes parámetros: pH (Multiparámetro, HANNA HI98194), conductividad (Multiparámetro, HANNA HI98194) y tiempo de vida media del producto (cámara climática, JEIO TECH TH TG 408).

Por último, para establecer la concentración de proteína total y su variación en función del tiempo, se implementó el método de Biuret [28] con una curva patrón de Seroalbúmina Bovina (BSA) para muestras almacenadas en cámara climática del biocoagulante con concentraciones de 0.25M y 0.75M de NaCl mediante absorbancia (Espectrofotómetro, SHIMADZU UV-2600).

## Preparación del agua sintética

Se preparó agua sintética mezclando dos soluciones de 10g/L de Bentonita Americana (Ange Químicos) y 10g/L Humus (Forza) hasta obtener una turbiedad aproximada de 100 NTU. Posteriormente se estabilizó el pH entre 7 y 8 con una solución de HCL al 0.1M y con NaOH al 0.1M.

Las pruebas de jarras para determinación de dosis óptimas se llevaron a cabo en un floculador tipo VELP JLT4. El proceso de agitación rápida se realizó a 230 rpm por 1 minuto, mientras que la agitación lenta se realizó en tres etapas consecutivas de 45, 35 y 25 rpm por 5 minutos cada una. Finalmente, la sedimentación se realizó por 15 minutos.

Figura 2. Equipo de prueba de jarras.



Fuente: Elaboración propia.

## Métodos analíticos

Al finalizar cada prueba de jarras se evaluó la remoción de turbiedad, color y potencial Z en el agua sintética. La turbiedad se analizó en un turbidímetro HACH 2100N. El color real se determinó bajo los parámetros de la norma ICONTEC 843 "Método de ensayo para el color de líquidos claros (escala de platino-cobalto)." por absorción (Espectrofotómetro, MERCK Pharo 300). El pH se cuantificó con un multiparámetro HANNA HI98194 y el potencial Z se midió en un Zetasizer Lab, Malvern.

## Determinación de porcentajes de remoción

Los porcentajes de remoción de turbiedad y color se determinaron a partir de las ecuaciones Ec. (1) y Ec. (2), respectivamente.

$$\text{Remoción de Turbiedad}(\%) = \frac{\text{Turbiedad}_{\text{inicial}} - \text{Turbiedad}_{\text{final}}}{\text{Turbiedad}_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Remoción de color}(\%) = \frac{\text{Color}_{\text{inicial}} - \text{Color}_{\text{final}}}{\text{Color}_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (2)$$

La reducción del potencial Z se obtuvo a partir de la Ec. (3)

$$\text{Reducción de potencial } Z(\%) = \frac{\text{Potencial } Z_{\text{inicial}} - \text{Potencial } Z_{\text{final}}}{\text{Potencial } Z_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (3)$$

Los valores iniciales hacen referencia a las mediciones realizadas al agua sintética previa al tratamiento, mientras que, los valores finales, corresponden a las mediciones posteriores al tratamiento.

### Diseño experimental

Se realizó un diseño factorial de dos factores con cuatro niveles (42) empleando las dosis óptimas obtenidas en el tratamiento de agua sintética con biocoagulante y sulfato de aluminio, que fueron de 480 ppm y 100 ppm, respectivamente. Para esto, se seleccionaron las siguientes combinaciones: relación volumétrica de sulfato de aluminio y biocoagulante (0/1; 0.75/0.25; 0.5/0.5; 0.25/0.75) a varias concentraciones molares de cloruro de sodio (NaCl):0M,0.25M, 0.5M y 0.75M.

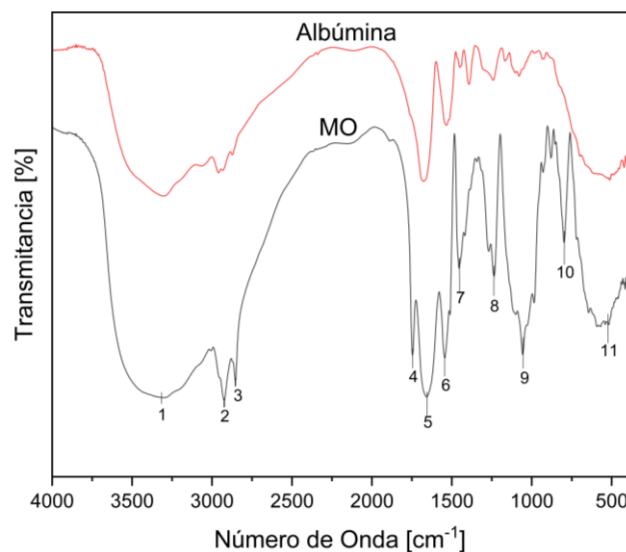
## Resultados

### Caracterización del biocoagulante en presentación en polvo

Como resultado del procesamiento de las semillas de Moringa se obtuvo un biocoagulante de color amarillo pálido y con olor terroso. El tamaño promedio de partícula fue de 357  $\mu\text{m}$  y humedad del 8.3% ( $\pm 0.1\%$ ), esto último asegura su estabilidad en un tiempo de vida útil de  $100 \pm 1$  días. En la obtención del biocoagulante, se generaron dos subproductos principales: la cáscara de la semilla, que corresponde al  $27,7\% \pm 0,5\%$  y los aceites que corresponden al  $39,7 \pm 0,7\%$  en peso del material en bruto. Estos subproductos pueden ser aprovechados en otros procesos como la producción de carbón activado para la eliminación de colorantes [29], salvado en la fortificación de alimentos [30] con aporte nutricional de proteínas, lípidos y fibras [31], o producción de biodiesel [32].

El resultado de la composición del polvo de Moringa analizado por el método FTIR se muestran en la Figura 3, donde se evidencian 11 picos pronunciados de los cuales 8 corresponden al patrón de Albumina (picos 1,2,3,5,6,8,9), confirmando la presencia de esta proteína en la harina y la similitud estructural entre sus grupos funcionales en las longitudes de onda características.

Figura 3. Análisis FTIR del biocoagulante base MO.



Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 1.** Grupos funcionales presentes en el biocoagulante base MO.

Pico	Posición [cm <sup>-1</sup> ]	Grupo funcional
1	3304	Grupo Hidroxilo
2	2924	Estiramiento asimétrico del metileno C-H
3	2854	Estiramiento simétrico C-H de metileno
4	1746	Estér C-O-C
5	1656	Grupos Amida I
6	1543	Grupos Amida II
7	1455	Estiramiento de anillo aromático (Grupo Arilo)
8	1236	Grupo Eter aromático
9	1050	Alcohol primario
10	798	Sustitución aromática 1,3-di (meta)
11	518	Alcanos Halogenados

**Fuente:** elaboración propia.

El polvo de Moringa contiene diversos grupos funcionales característicos de las proteínas tal como se presenta en la tabla 1, entre los cuales se encuentran los grupos hidroxilo en 3304 cm<sup>-1</sup>, los grupos amida I y II en 1656 y 1543 cm<sup>-1</sup> respectivamente, y otras macromoléculas que pueden participar en el proceso de coagulación [33]. Esta naturaleza compleja del biocoagulante permite mayor interacción con otros compuestos por mecanismos de adsorción, formación de puentes y formación de complejos, facilitando la formación de flocs [34].

#### Caracterización del biocoagulante en solución salina

Efecto de la solución salina en el tamaño hidrodinámico de la partícula en dilución. Con el fin de determinar el tiempo de vida media del biocoagulante antes de combinarlo con Sulfato de Aluminio, se prepararon muestras de biocoagulante (24 g/L) a distintas concentraciones de NaCl. De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 2, se observa como la dilución del coagulante en NaCl reduce el tamaño hidrodinámico de partícula hasta en un 75% con respecto al tamaño en una solución con agua, dado que la sal tiene un efecto de disociación en el medio, que en principio facilita la extracción de componentes activos que posteriormente participan en la eliminación de los coloides, sin embargo, contribuye en un incremento de la conductividad del medio. Asimismo, el aumento de la fuerza iónica de la sal deriva en la ruptura de los enlaces proteína-proteína para aumentar la solubilidad y mejorar la actividad de coagulación [35].

**Tabla 2.** Efecto de la concentración de NaCl sobre el pH, la conductividad y el tamaño hidrodinámico de partícula en dilución (D<sub>map</sub>)

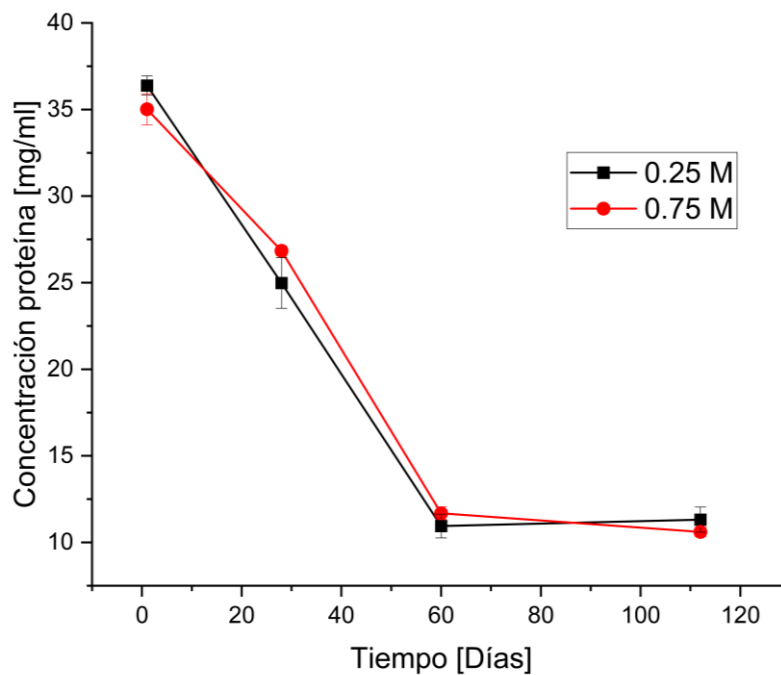
Concentración de NaCl	pH	Conductividad [mS/cm]	D <sub>map</sub> [nm]
0	6.34	0.98	801.7
0.25	6.26	12.32	234.4
0.5	6.15	47.08	224.9
0.75	6.02	66.60	202.5

**Fuente:** Elaboración propia.

### Efecto de la solución salina en la preservación de las proteínas

El análisis de la variación de la concentración de proteína de las muestras almacenadas en solución salina de 0.25 M y 0.75 M en un lapso de 110 días en la cámara climática se muestran en la figura 4. En ambas dosis de solución salina se evidenció la degradación de la proteína pasando de una concentración inicial de 35 mg/ml hasta una concentración de 10 mg/ml al alcanzar los 60 días equivalentes almacenada en la cámara climática. por lo tanto, la variación de la concentración de NaCl no actuó como preservante sobre la proteína; en este punto se debe considerar la funcionalización de otro componente que prolongue la vida útil en el tiempo e impida el crecimiento de microorganismos que degraden la proteína.

Figura 4. Variación de la concentración de proteína total del biocoagulante de moringa.

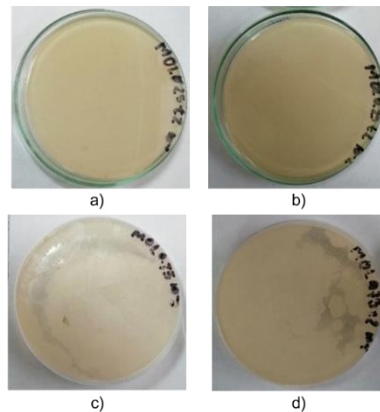


Fuente: Elaboración propia.

### Efecto de la solución salina en las características microbiológicas del biocoagulante

Los resultados microbiológicos de las muestras almacenadas en la cámara climática revelan un crecimiento de microorganismos, superando las 330 unidades formadoras de colonias (UFC), como se detalla en la tabla 3 y se ilustra en la Figura 5. Por lo tanto, las concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) que se emplearon en este estudio facilitaron la disolución del coagulante, sin embargo, no se evidenció un efecto preservante sobre la concentración de la proteína, en consecuencia, en un período de almacenamiento del biocoagulante de 110 días se pueden desarrollar microorganismos como los halófilos y halotolerantes [36].

**Figura 5.** Prueba en Agar nutritivo a) prueba con NaCl 0.25M dilución 10-1 b) prueba con NaCl 0.25M dilución 10-2 c) prueba con NaCl 0.75M dilución 10-1 d) prueba con NaCl 0.75M dilución 10-2.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.** Efecto de la solución salina en el crecimiento de UFC usando Agar Nutritivo como medio

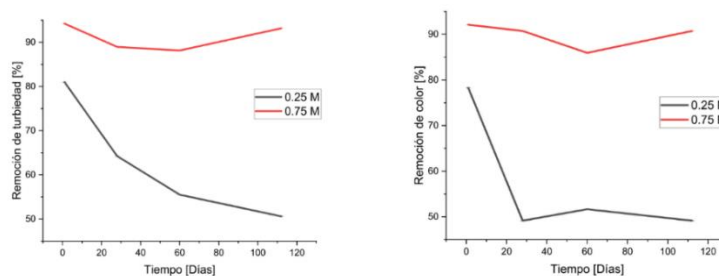
Concentración de NaCl	Dilución	Unidades formadoras de Colonias [UFC]
0.25	10 <sup>-1</sup>	>330
0.25	10 <sup>-2</sup>	>330
0.75	10 <sup>-1</sup>	>330
0.75	10 <sup>-2</sup>	>330

Fuente: Elaboración propia.

### Efectividad del biocoagulante durante el almacenamiento.

El efecto del almacenamiento del biocoagulante, en solución salina de 0.25 M y 0.75 M, durante 110 días (equivalentes en cámara climática) para determinar la eficiencia de la remoción de turbiedad y color de una muestra de agua sintética se presenta en la Figura 6. En dicha figura, se puede apreciar que el biocoagulante disuelto en la solución salina de 0.25 M experimentó una disminución en su eficiencia para remover turbidez y color, pasando del 80% en el día 0 al 50% en el día 110. Por otro lado, la solución salina de 0.75 M mantuvo una eficiencia de remoción de turbidez y color en torno al 90%. En consecuencia, se recomienda el almacenamiento del biocoagulante en solución salina de 0.75 M, ya que, a pesar de la degradación de la proteína, esta muestra una mayor eficiencia en la eliminación de turbidez y color. Esto sugiere que podría haber contribuciones de otros componentes en el proceso de coagulación, distintos de las proteínas, que tienen una mayor afinidad de disociación en un entorno iónico de mayor concentración.

**Figura 6.** Porcentaje de remoción usando coagulante con 0,25 y 0,75 M de NaCl. a) Remoción de turbiedad b) Remoción de Color.



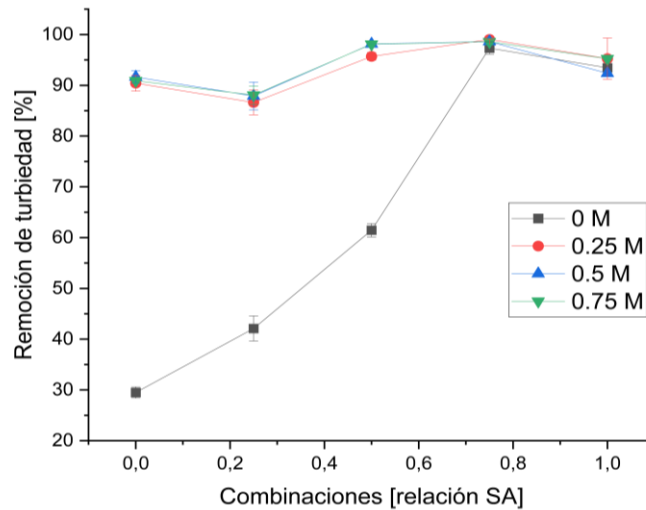
Fuente: elaboración propia.



### Pruebas de tratabilidad del coagulante combinado

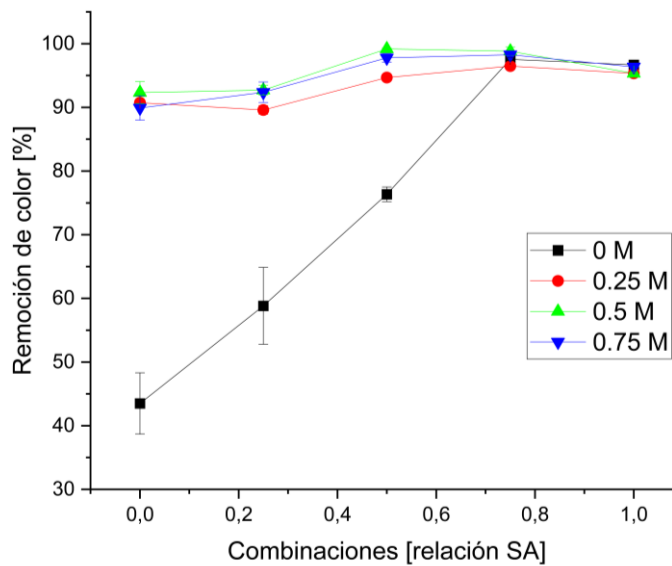
La comparación de la interacción entre el biocoagulante extraído de la semilla de Moringa a diferentes concentraciones molares de cloruro de sodio con la relación de sulfato de aluminio SA (fracción de SA/fracción de MO) para evaluar la mejor combinación se muestran en las Figuras 7 y 8. Las curvas obtenidas indican que a partir de una relación de 50/50 de la dosis óptima de sulfato de aluminio y biocoagulante, se alcanzan resultados de remoción de hasta un 98% para el biocoagulante extraído en solución salina. Lo anterior indica que la presencia de sal reveló una diferencia significativa en la acción del biocoagulante incrementando el efecto de remoción de turbiedad y color en más del 50%. Por otro lado, la asociación entre el biocoagulante y el sulfato de aluminio presenta un efecto complementario en la reducción de turbiedad y color del agua sintética, disminuyendo tanto los sólidos suspendidos como los disueltos y ubicando algunos de los resultados dentro de los límites reportados en la resolución 2115 del 2007 que se demarcan con una línea roja horizontal en la Figura 9.

Figura 7. Remoción de turbiedad coagulante combinado.



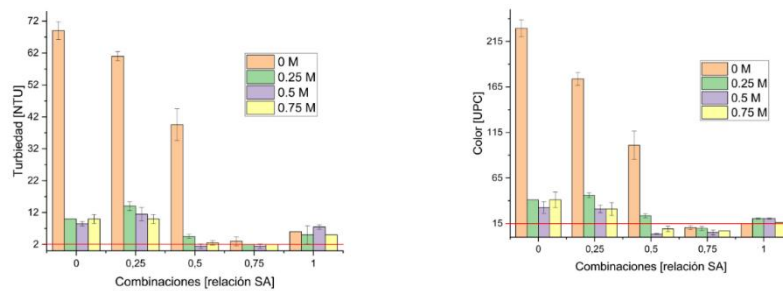
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Remoción de color coagulante combinado.



Fuente: elaboración propia.

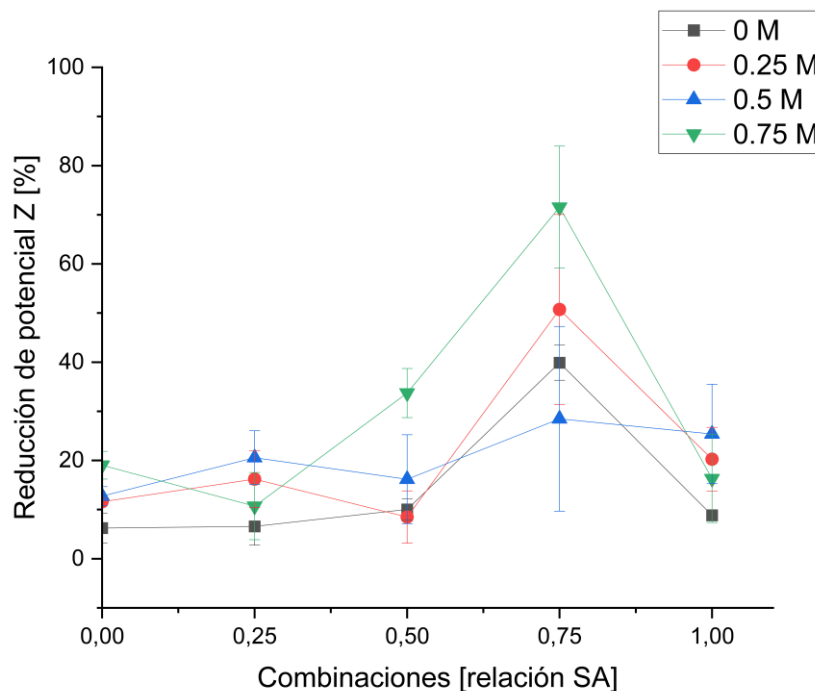
Figura 9. Resultados de tratabilidad de turbiedad y color. Comparación con los límites de la resolución 2115 de 2007.



Fuente: elaboración propia.

Además, se llevó a cabo un análisis de la reducción del potencial Z, tal como se ilustra en la Figura 10. En relación con el impacto de la concentración salina en la reducción del potencial Z, se observa un patrón similar en concentraciones de sal de 0.25M y 0.5M. El menor efecto de la combinación de coagulantes se registra en una solución de 0.5M, mientras que el efecto más pronunciado se observa en una concentración de 0.75M, con una remoción mínima del 15% para la relación SA de 0.25 y una remoción máxima del 72% para la relación SA de 0.75. La reducida eliminación en la combinación de 0.25 podría deberse a la inactivación del biocoagulante causada por la acción del coagulante inorgánico en las proteínas del biocoagulante. Sin embargo, al comparar los demás resultados, se presenta una mayor eficiencia en la reducción de potencial cuando se combinan los coagulantes que cuando actúan por separado.

Figura 10. Reducción de potencial Z posterior al tratamiento combinado con MO y Sulfato de Aluminio en presencia de concentraciones de sal de 0M, 0.25M, 0.5M y 0.75M.



Fuente: elaboración propia.

Estos resultados se deben principalmente a que el mecanismo predominante de coagulación del biocoagulante como la MO no es la neutralización de cargas, sino la capacidad de capturar sólidos suspendidos, por medio de un fenómeno de

coagulación de barrido al formar una red que precipita las proteínas [37, 38] acompañado de una neutralización secundaria, por lo tanto se evidenció un efecto complementario en el mecanismo de coagulación para la remoción de potencial z al combinarlo con el sulfato de aluminio.

## Conclusión

En el intervalo experimental que se evaluó y en una proporción de 50/50 alcanzó una remoción de turbiedad y color del 98% y por lo tanto se disminuye la cantidad de sulfato de aluminio necesaria para realizar el tratamiento del agua sintética en un 50%.

Además, se logró una mejora del tamaño hidrodinámico y desempeño del biocoagulante de Moringa en la concentración de solución salina de 0.75M empleada en la extracción de los componentes catiónicos, sin embargo, no se prolongó el tiempo de vida del biocoagulante concentrado.

Finalmente, no solo la concentración de sal afectó el desempeño de la proteína sino también el entorno iónico, evidenciando que la asociación entre coagulantes naturales y sintéticos permite aumentar la eficiencia de remoción de impurezas al combinar los mecanismos de coagulación principales, lo que representaría una mejora complementaria en el proceso de tratamiento de agua a diferencia del uso aislado del biocoagulante. Se recomienda en futuras investigaciones evaluar alternativas de conservantes para prolongar el tiempo de vida del coagulante que no afecten el desempeño de este en el proceso.

## Agradecimientos

Agradecimiento al Ministerio de Ciencias, Tecnología e Innovación, a la Empresa Biomonty SAS y al Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación - SENNOVA por su apoyo económico para la realización de esta investigación.

## Referencias bibliográficas

- [1] B. A. Parra-Orobio et al., "Assessment of the Water Footprint in Low-Income Urban Neighborhoods from Developing Countries: Case Study Fátima (Gamarra, Colombia)", *Sustainability*, vol. 15, no 9, p. 7115, abr. 2023. DOI: 10.3390/su15097115.
- [2] D. Nayeri y S. A. Mousavi, "A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge", *Journal of Environmental Management*, vol. 319, p. 115649, oct. 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115649.
- [3] N. Muisa, Z. Hoko, y P. Chifamba, "Impacts of alum residues from Morton Jaffray Water Works on water quality and fish, Harare, Zimbabwe", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 36, no 14-15, pp. 853-864, 2011. DOI: 10.1016/j.pce.2011.07.047.
- [4] S. C. Bondy y A. Campbell, "Aluminum and Neurodegenerative Diseases", 2017, pp. 131-156. DOI: 10.1016/bs.ant.2017.07.008.
- [5] S. C. Gad, "Aluminum", en *Encyclopedia of Toxicology*, Elsevier, 2014, pp. 161-163. Doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00810-1.
- [6] R. Rajendran, M. Abirami, P. Prabhavathi, P. Premasudha, B. Kanimozhi, y A. Manikandan, "Biological treatment of drinking water by

chitosan based nanocomposites”, *African Journal of Biotechnology*, vol. 14, no 11, pp. 930–936, 2015. DOI: 10.5897/AJB2015.14469.

[7] J. R. Balbinoti et al., “Plant-based coagulants for food industry wastewater treatment”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 52, p. 103525, abr. 2023. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103525.

[8] W. L. Ang, A. W. Mohammad, A. Benamor, y N. Hilal, “Chitosan as natural coagulant in hybrid coagulation-nanofiltration membrane process for water treatment”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, no 4, pp. 4857–4862, dic. 2016. DOI: 10.1016/j.jece.2016.03.029.

[9] E. Lichtfouse et al., “Chitosan for direct bioflocculation of wastewater”, *Environmental Chemistry Letters*, vol. 17, no 4, pp. 1603–1621, 1 de diciembre de 2019. DOI: 10.1007/s10311-019-00900-1.

[10] S. B. Kurniawan et al., “Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no 24, pp. 1–33, 12 de diciembre de 2020. DOI: 10.3390/ijerph17249312.

[11] B. I. Gandiwa, L. B. Moyo, S. Ncube, T. A. Mamvura, L. L. Mguni, y N. Hlabangana, “Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (Moringa Oleifera-Cactus Opuntia-alum blend)”, *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, pp. 158–164, oct. 2020. DOI: 10.1016/j.sajce.2020.07.005.

[12] B. Koul, N. Bhat, M. Abubakar, M. Mishra, A. P. Arukha, y D. Yadav, “Application of Natural Coagulants in Water Treatment: A Sustainable Alternative to Chemicals”, *Water*, vol. 14, no 22, p. 3751, nov. 2022. DOI: 10.3390/w14223751.

[13] Y. T. Hameed, A. Idris, S. A. Hussain, y N. Abdullah, “A tannin-based agent for coagulation and flocculation of municipal wastewater: Chemical composition, performance assessment compared to Polyaluminum chloride, and application in a pilot plant”, *Journal of Environmental Management*, vol. 184, pp. 494–503, dic. 2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.10.033.

[14] M. Besharati Fard, D. Hamidi, J. Alavi, R. Jamshidian, A. Pendashteh, y S. A. Mirbagheri, “Saline oily wastewater treatment using *Lallemantia mucilage* as a natural coagulant: Kinetic study, process optimization, and modeling”, *Industrial Crops and Products*, vol. 163, p. 113326, may 2021. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113326.

[15] O. Bouaouine, I. Bourven, F. Khalil, P. Bressollier, y M. Baudu, “Identification and role of *Opuntia ficus indica* constituents in the flocculation mechanism of colloidal solutions”, *Separation and Purification Technology*, vol. 209, pp. 892–899, ene. 2019. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.09.036.

[16] T. K. F. S. Freitas et al., “Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant”, *Industrial Crops and Products*, vol. 76, pp. 538–544, dic. 2015. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.06.027.

[17] H. Altaher, T. E. Khalil, y R. Abubeah, “An Agricultural waste as a novel coagulant aid to treat high turbid water containing humic acids”,

Global Nest Journal, vol. 18, no 2, pp. 279–290, jun. 2016. DOI: 10.30955/GNJ.001559.

[18] A. Ahmad et al., “Dosage-based application versus ratio-based approach for metal- and plant-based coagulants in wastewater treatment: Merits, limitations, and applicability”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 334, p. 130245, feb. 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130245.

[19] I. T. Tomasi, C. A. Machado, R. A. R. Boaventura, C. M. S. Botelho, y S. C. R. Santos, “Tannin-based coagulants: Current development and prospects on synthesis and uses”, *Science of The Total Environment*, vol. 822, p. 153454, may 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153454.

[20] S. Gautam y G. Saini, “Use of natural coagulants for industrial wastewater treatment”, vol. 6, no 4, pp. 553–578, 2021. DOI: 10.22034/gjesm.2020.04.10.

[21] M. Saleem y R. T. Bachmann, “A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 72, pp. 281–297, 2019. DOI: 10.1016/j.jiec.2018.12.029.

[22] B. U. Okoro, S. Sharifi, M. A. Jesson, y J. Bridgeman, “Natural organic matter ( NOM ) and turbidity removal by plant-based coagulants : A review”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no 6, p. 106588, 2021. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106588.

[23] V. Saritha, M. K. Karnena, y B. K. Dwarapureddi, “‘Exploring natural coagulants as impending alternatives towards sustainable water clarification’ – A comparative studies of natural coagulants with alum”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 32, p. 100982, dic. 2019. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100982.

[24] S. Y. Choy, K. M. N. Prasad, T. Y. Wu, y R. N. Ramanan, “A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 12, no 1, pp. 367–390, ene. 2015. DOI: 10.1007/s13762-013-0446-2.

[25] K. A. Ghebremichael, K. R. Gunaratna, H. Henriksson, H. Brumer, y G. Dalhammar, “A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed”, *Water Research*, vol. 39, no 11, pp. 2338–2344, jun. 2005. DOI: 10.1016/j.watres.2005.04.012.

[26] S. B. Kurniawan, M. F. Imron, S. R. S. Abdullah, A. R. Othman, I. F. Purwanti, y H. A. Hasan, “Treatment of real aquaculture effluent using bacteria-based bioflocculant produced by *Serratia marcescens*”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 47, p. 102708, jun. 2022. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102708.

[27] H. A. Aziz y N. I. M. Sobri, “Extraction and application of starch-based coagulants from sago trunk for semi-aerobic landfill leachate treatment”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, no 21, pp. 16943–16950, nov. 2015. DOI: 10.1007/s11356-015-4895-7.

[28] K. Zheng, L. Wu, Z. He, B. Yang, y Y. Yang, “Measurement of the total protein in serum by biuret method with uncertainty evaluation”, *Measurement*, vol. 112, pp. 16–21, dic. 2017. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.013.

- [29] N. M. Ofgea, A. M. Tura, y G. M. Fanta, "Activated carbon from H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-activated Moringa Stenopetale Seed Husk for removal of methylene blue: Optimization using the response surface method (RSM)", *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 16, p. 100214, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2022.100214>.
- [30] V. Lago-Abascal, M. Duarte-Ginorio, M. Martínez-Azcarraga, E. Almora-Hernández, N. Figueredo-Moreno, y E. Rodríguez-Jiménez, "Caracterización y uso de la cáscara de semillas de Moringa Oleífera como salvado en la fortificación de Mini Panqués", *Centro Azúcar*, vol. 49, no 2, pp. 100–111, abr. 2022.
- [31] R. W. Saa, E. N. Fombang, E. B. Ndjantou, y N. Y. Njintang, "Treatments and uses of Moringa oleifera seeds in human nutrition: A review", *Food Science and Nutrition*, vol. 7, no 6, pp. 1911–1919, jun. 2019. DOI: 10.1002/FSN3.1057.
- [32] S. Niju, M. Balajii, y C. Anushya, "A comprehensive review on biodiesel production using Moringa oleifera oil", *International Journal of Green Energy*, vol. 16, no 9, pp. 702–715, jul. 2019. DOI: 10.1080/15435075.2019.1619565.
- [33] A. T. A. Baptista, M. O. Silva, R. G. Gomes, R. Bergamasco, M. F. Vieira, y A. M. S. Vieira, "Protein fractionation of seeds of Moringa oleifera lam and its application in superficial water treatment", *Separation and Purification Technology*, vol. 180, pp. 114–124, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.040>.
- [34] Y. Yue et al., "Design and coagulation mechanism of a new functional composite coagulant in removing humic acid", *Separation and Purification Technology*, vol. 292, p. 121016, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121016>.
- [35] M. Kumar et al., "Moringa oleifera Lam. seed proteins: Extraction, preparation of protein hydrolysates, bioactivities, functional food properties, and industrial application", *Food Hydrocolloids*, vol. 131, p. 107791, oct. 2022. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107791.
- [36] L. Caycedo Lozano, L. C. C. Ramírez, D. M. T. Suárez, L. Caycedo Lozano, L. C. C. Ramírez, y D. M. T. Suárez, "Las bacterias, su nutrición y crecimiento: una mirada desde la química", *Nova*, vol. 19, no 36, pp. 49–94, sep. 2021. DOI: 10.22490/24629448.5293.
- [37] D. F. Ramírez Jiménez, "Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 9, n.º 1, pp. 100–113, abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4305>
- [38] E. Lester-Card, G. Smith, G. Lloyd, y C. Tizaoui, "A green approach for the treatment of oily steelworks wastewater using natural coagulant of Moringa oleifera seed", *Bioresource Technology Reports*, vol. 22, p. 101393, jun. 2023. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101393.