

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-06-01

Artículos

Evaluación de la *Moringa oleifera* como coagulante en el agua de una quebrada altoandina en la ciudad de Huancavelica, Perú

Evaluation of *Moringa oleifera* as a coagulant in the water of a high Andean stream in the city of Huancavelica, Peru

Nilo Abelardo Enríquez-Nateros¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8233-6912>

Rosalí Loren Carrizales-Condori², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3898-7704>

Fernando Martín Toribio Román³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-9232>

Teresa Gonzales⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2945-3874>

Eliana Contreras-López⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0685-2004>

Ricardo A. Yuli-Posadas⁶, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3545-3443>

¹Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú,
nilo.enriquez@unh.edu.pe



²Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú,
rosali.carrizales.c@uni.pe

³Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú,
fernando.toribio@unh.edu.pe

⁴Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú,
teresa.gonzales@unh.edu.pe

⁵Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú,
econtrerasl@unmsm.edu.pe

⁶Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú,
ryulip@unmsm.edu.pe

Autor para correspondencia: Nilo Abelardo Enríquez-Nateros,
nilo.enriquez@unh.edu.pe

Resumen

Durante el proceso de coagulación dentro de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), para disminuir la turbiedad se usan polímeros sintéticos y orgánicos. La *Moringa oleifera* (MO), como coagulante natural, requiere usar una concentración y dosis óptima, a fin de reducir la mayor cantidad de turbiedad y evitar materia orgánica residual que requiera un tratamiento adicional. Es por ello que la investigación tuvo como objetivo determinar la eficiencia del uso de la MO, para la clarificación del agua de la quebrada Taczanapampa de la ciudad de Huancavelica, Perú. Se utilizaron las partículas molidas de las semillas de la mencionada planta, evaluando diferentes dosis y concentraciones para encontrar la óptima en

la remoción de la turbidez en el agua, procedimiento que se realizó con la prueba de jarras del laboratorio. Los modelos de regresión validaron el comportamiento de la MO en ecuaciones. El primer modelo determinó la dosis óptima y el segundo modelo la concentración óptima en las condiciones de la investigación. Los resultados de la dosis óptima se obtuvieron en dos rangos: con turbiedades menores a 50 unidad nefelométrica de turbidez (UNT) de 10 a 50 mg/l, también entre 50 y 150 UNT de 30 a 100 mg/l; y la concentración óptima para turbiedades menores a 150 UNT se encuentran en un rango de 2 a 3 %. Los resultados se consideran favorables para su uso y amigables con el ambiente.

Palabras clave: dosis óptima, concentración óptima, turbidez, *Moringa oleifera*, coagulación.

Abstract

During the coagulation process within a drinking water treatment plant (DWTP), synthetic and organic polymers are used to reduce turbidity. *Moringa oleifera* (MO) as a natural coagulant, requires using an optimal concentration and dosage in order to reduce the highest amount of turbidity and avoid residual organic matter that requires additional treatment. Therefore, the objective of this research was to determine the efficiency of the use of OM for the clarification of water from the Taczanapampa stream in the city of Huancavelica, Peru. The ground particles of the seeds of the aforementioned plant were used, evaluating different doses and concentrations to find the optimum in the removal of turbidity in the water, a procedure that was carried out with the laboratory jar test. Regression models validated the behavior of OM in equations.

The first model determined the optimal dose and the second model the optimal concentration under the research conditions. The results of the optimal dose were obtained in two ranges: with turbidity lower than 50 Nephelometric Turbidity Unit (NTU) from 10 to 50 mg/l, also between 50 and 150 NTU from 30 to 100 mg/l; and the optimal concentration for turbidity lower than 150 NTU, in a range of 2 to 3 %. Considering the favorable results for its use and environmentally friendly.

Keywords: Optimal dose, optimal concentration, turbidity, *Moringa oleifera*, coagulation.

Recibido: 15/02/2023

Aceptado: 04/06/2023

Publicado Online: 03/07/2023

Introducción

El agua de los cuerpos superficiales contiene miles de millones de partículas microscópicas e impurezas disueltas que abarcan minerales, compuestos orgánicos e inorgánicos, que modifican las características físicas, químicas y biológicas del agua (Taiwo, Adenike, & Aderonke, 2020). Por ello, es importante su tratamiento en el abastecimiento de agua para consumo humano, y para que pueda cumplir con los estándares de calidad (Zaid, Ghazali, Mutamim, & Olalere, 2019). Usualmente es necesario un proceso de coagulación para tratar el agua de fuentes superficiales a fin de disminuir la turbidez (Kucera, Hofmanova, & Biela,

2020). El coagulante permite regular el contenido de turbidez, siendo importante para lograr un sistema de tratamiento de agua para consumo (Safonyk & Matviichuk, 2022).

En la actualidad, el uso de coagulantes naturales tiene gran interés por los beneficios económicos y de salud que traen consigo (Hadadi *et al.*, 2022). Zaid *et al.* (2019) mencionan a la *Moringa oleifera* (MO) como producto natural ecológico para el tratamiento del agua. Los estudios han informado que los granos de MO son empleados como una alternativa potencial a los coagulantes químicos para la clarificación del agua, gracias a sus beneficios, como biodegradabilidad, baja toxicidad, baja tasa de producción de residuos, y que no tiene efectos sobre el pH del agua y la conductividad eléctrica después del tratamiento (Nascimento, Biagi, De Oliveira, Arantes, & Rossi, 2019).

El uso de polvo de semilla de MO utilizado como biocoagulante para el tratamiento del agua tiene ventajas que son rentables ecológicamente, no alteran el pH y generan una mínima cantidad de lodos (Zaid *et al.*, 2019). También el uso de MO como coagulante natural se ha probado para el tratamiento primario de aguas residuales (Varsani, Vyas, & Dudhagara, 2022). Gandiwa *et al.* (2020) estudiaron la semilla de la MO en el tratamiento de la turbidez obteniendo una eficiencia de reducción de 91.5 %. El polvo de semilla de MO es un buen coagulante debido a que es muy bueno aclarando la turbiedad en muestras de agua de un río en Suazilandia con una eficiencia de 35 % de reducción de la turbidez comparado con filtros (Varkey, 2020).

Sin embargo, un uso excesivo de estos coagulantes naturales incrementa la turbidez (Ahizi *et al.*, 2023). Por lo tanto, en el proceso de

coagulación del tratamiento de agua potable es necesario aglomerar las partículas suspendidas y determinar la dosis óptima del coagulante (Narges, Ghorban, Hassan, & Mohammad, 2021). El uso de los coagulantes naturales ofrece un gran potencial frente a los sintéticos; no obstante, encontrar la dosis óptima es indispensable para mejorar la eficiencia de la reducción de la turbidez (Michelan, Santos, Rosa, Santos, & De Jesus, 2021; Nweke, Chukwuma, Evbuomwan, & Oji, 2022; Ramal, Jalal, Sahab, & Yaseen, 2022); es por ello que la MO como coagulante natural requiere usar una concentración óptima, a fin de reducir la mayor cantidad de turbiedad y evitar materia orgánica residual que requiera un tratamiento adicional (Gandiwa *et al.*, 2020; Murali *et al.*, 2022).

Por tanto, el objetivo de la investigación fue determinar la dosis y concentración óptima del coagulante de MO en la clarificación del agua de la quebrada Taczanapampa, de la ciudad de Huancavelica, Perú.

Materiales y métodos

Ubicación de la zona de estudio

El proyecto se desarrolló en la ciudad de Huancavelica, que pertenece a la provincia y departamento del mismo nombre, en Perú. Las muestras se extrajeron del río de la quebrada Taczanapampa, que se encuentra en las siguientes coordenadas: latitud sur, 12° 46' 9.29"; longitud oeste, 74° 57' 49.19", y altitud aproximada de 3 864 msnm. (Figura 1). Dicha fuente es afluente para el abastecimiento de agua de las instalaciones de la ciudad universitaria de la Universidad Nacional de Huancavelica, Paturpampa; sin embargo, no cumple con

la calidad para consumo humano, de acuerdo con el D.S. 031-2010-SA, pues el parámetro de turbidez aceptable es de 5 UNT.

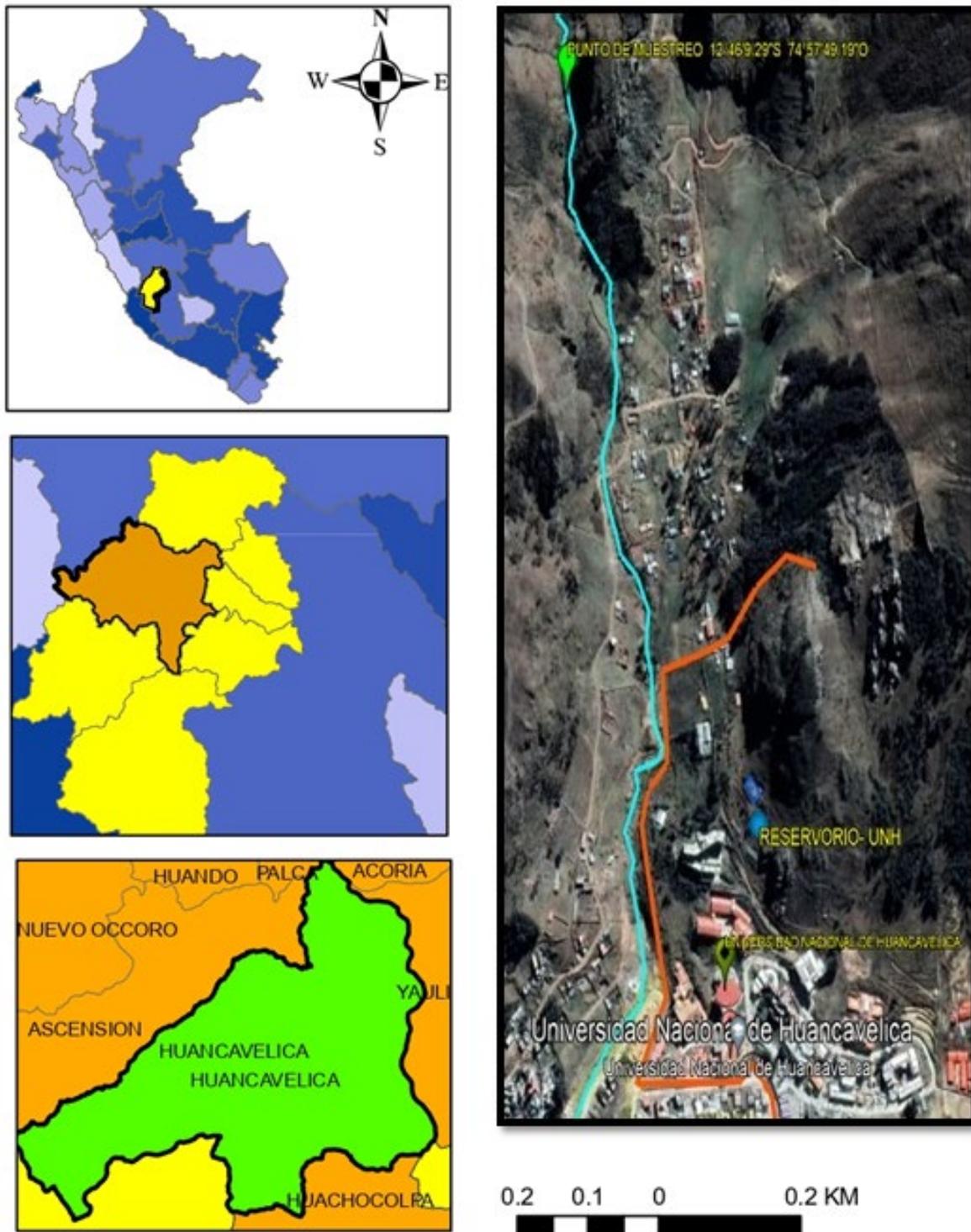


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

Obtención de la *Moringa oleifera* en polvo

Las semillas de MO se adquirieron en un mercado local de la ciudad de Huancavelica, en una presentación de bolsa sellada. Posteriormente, se procedió a descascarar las semillas de MO hasta obtener el grano interno, siendo secado a temperatura ambiente durante un día (Zaid *et al.*, 2019). Estos gránulos se molieron en una licuadora convencional hasta obtener polvo, que se tamizó hasta tener 0.8 mm de granulometría (Varkey, 2020).

Solución coagulante

Para la determinación de la dosis óptima se empleó una concentración de solución coagulante fija al 2 %; la preparación se realizó mezclando 2 g de polvo de semilla de MO en 100 ml de agua destilada de acuerdo con la recomendación de Nascimento *et al.* (2019). Posteriormente se determinó la concentración óptima. Se utilizó la siguiente fórmula para saber la cantidad de la solución que se aplicó en cada jarra:

$$P = D(Q) = q(C) \quad (1)$$

Donde:

P = peso del coagulante por aplicar

D = dosis de coagulante (mg/l)

Q = capacidad de la jarra (l)

q = volumen de solución por aplicar (ml)

C = concentración de la solución (mg/l)

Toma de muestras

Las muestras de agua del río de la quebrada Taczanapampa se colectaron con base en el protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales según la Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA (ANA, 2016). Se utilizó un bidón estéril con tapa rosca de 50 l, donde se fueron acumulando las muestras de agua extraídas de la parte central del río de la quebrada Taczanapampa, para inmediatamente llevarlas al laboratorio de la EPS EMAPA Huancavelica S.A.

El volumen total de agua muestreada fue de 528 l, teniendo como punto de muestreo cercano a la captación de abastecimiento al campus universitario de la Universidad Nacional de Huancavelica. Estas muestras se colectaron durante la época de avenida desde diciembre de 2018 hasta marzo de 2019, realizándose 10 muestras en fechas distintas.

Determinación de la dosis óptima

Los experimentos para determinar la dosis óptima se realizaron con un aparato de prueba de jarras (VELP Scientifica JLT6) en el laboratorio de EMAPA Huancavelica S.A., para evaluar la eficiencia de remoción utilizando la solución coagulante de semillas de MO (Pandey *et al.*, 2020). Los experimentos se realizaron por lotes, en cuatro repeticiones, en seis

vasos de 2 l cada uno. El agua cruda recogida se vertió en los vasos del test de jarras y se añadió la solución coagulante al 2 %. Se mezcló con agitación vigorosa (Varkey, 2020), fijada inicialmente en 300 rpm durante 5 s, para simular la mezcla rápida; luego se agitó lentamente a 40 rpm durante 20 min para la floculación; por último se dejó reposar durante 15 min para la sedimentación.

Luego se aplicaron diferentes dosis de coagulante de MO de acuerdo con la metodología de Pandey *et al.* (2020). Las dosis se fijaron en 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 y 60 mg/l para turbiedades iniciales menores a 50 UNT, y dosis de 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110 y 115 mg/l para turbiedades iniciales mayores a 50 UNT. Se siguieron los procedimientos de simulación para la mezcla rápida, floculación y sedimentación en la prueba de jarras.

Después de la simulación, se analizaron 30 ml de muestra de cada uno de los vasos; para determinar la turbidez remanente por nefelometría se empleó un turbidímetro (modelo 2100 NA, HACH9) de acuerdo con la metodología seguida por Nascimento *et al.* (2019).

Determinación de la concentración óptima

Para la determinación de la concentración óptima se prepararon diferentes soluciones coagulantes de MO (Alam, Pandey, Khan, Souayeh, & Farhan, 2020), aplicando la solución en cada vaso de precipitado de acuerdo con la Ecuación (1) (Pandey *et al.*, 2020). Las concentraciones preparadas fueron de 0.5, 1, 2, 3, 5 y 10 mg/l para las dosis óptimas

determinadas previamente; se hizo el mismo procedimiento del paso anterior y se evaluó la turbiedad en cada jarra.

Esquema experimental y análisis estadístico

La determinación de dosis y concentración óptima se realizó de acuerdo con el esquema experimental mostrado en la Figura 2. Cabe precisar que la temperatura, pH y turbiedad se midieron en el laboratorio, ya que los datos de inicio y final eran necesarios en el instante de realizar los ensayos. Por otro lado, las muestras se recogieron en bidones sin ninguna refrigeración y transportadas al laboratorio que se encontraba a 20 minutos de viaje en movilidad.

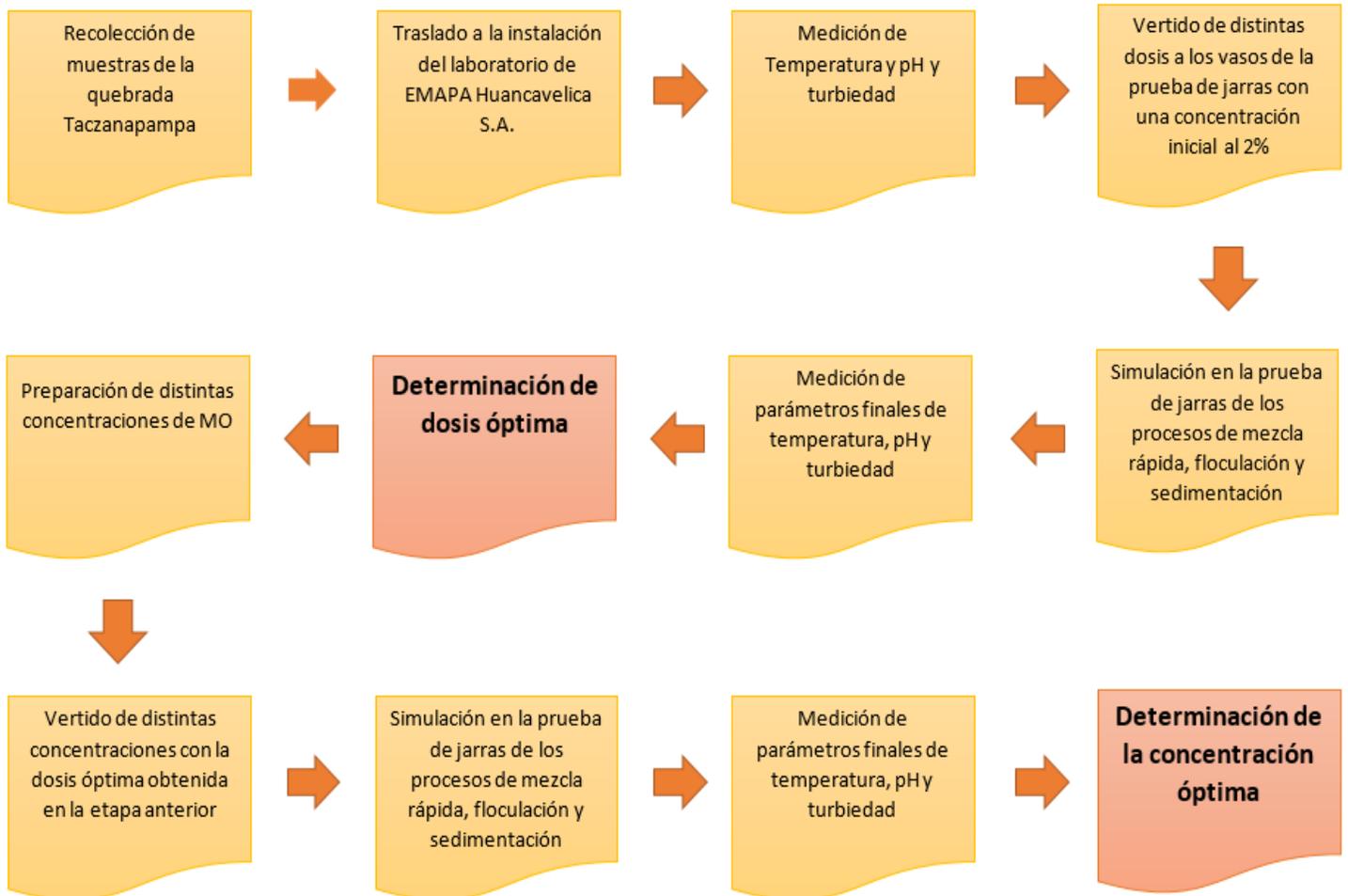


Figura 2. Esquema metodológico para la obtención de la dosis y concentración óptima.

Los datos obtenidos de las variables de estudio se evaluaron mediante un análisis de varianza para determinar la ecuación de regresión de la dosis óptima y de la concentración óptima con base en un nivel de significancia del 95 % ($p < 0.05$). Los ajustes de los modelos se evaluaron analizando los coeficientes de determinación R^2 y R^2 ajustado.

Resultados

Parámetros iniciales de las muestras de agua

En la Tabla 1 se pueden observar los parámetros iniciales correspondientes a la turbidez, pH y temperatura de las muestras de agua colectadas durante las 10 fechas distintas. La variación de las turbiedades se debe a efectos climatológicos, pues el periodo de las lluvias inicia en diciembre y llega al pico más alto en febrero.

Tabla 1. Parámetros iniciales de la medición del agua del río de la quebrada Taczanapampa.

| Núm. de muestra | Turbidez inicial (UNT) | pH inicial (pH) | Temperatura inicial (°C) |
|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------------|
| 1 | 7.40 | 7.25 | 11.80 |
| 2 | 9.52 | 7.00 | 11.60 |
| 3 | 14.57 | 8.12 | 10.19 |
| 4 | 31.06 | 8.10 | 7.57 |
| 5 | 53.67 | 7.38 | 5.87 |
| 6 | 62.77 | 7.40 | 6.13 |
| 7 | 75.59 | 7.58 | 8.87 |
| 8 | 88.89 | 7.39 | 5.83 |
| 9 | 90.32 | 7.72 | 4.60 |
| 10 | 105.63 | 7.91 | 4.13 |

Determinación de la dosis óptima para turbiedades menores a 50 UNT

La Figura 3 representa los resultados de la dosificación de MO para las primeras cuatro muestras de agua con turbiedades menores a 50 UNT; en cada muestra se aplicaron 12 dosis, iniciando en 5 mg/l, con incrementos de 5 mg/l hasta llegar a 60 mg/l; así se obtuvo la dosis óptima que se evidencia en los picos más bajos, siendo de 20, 20, 30 y 40 mg/l, respectivamente.

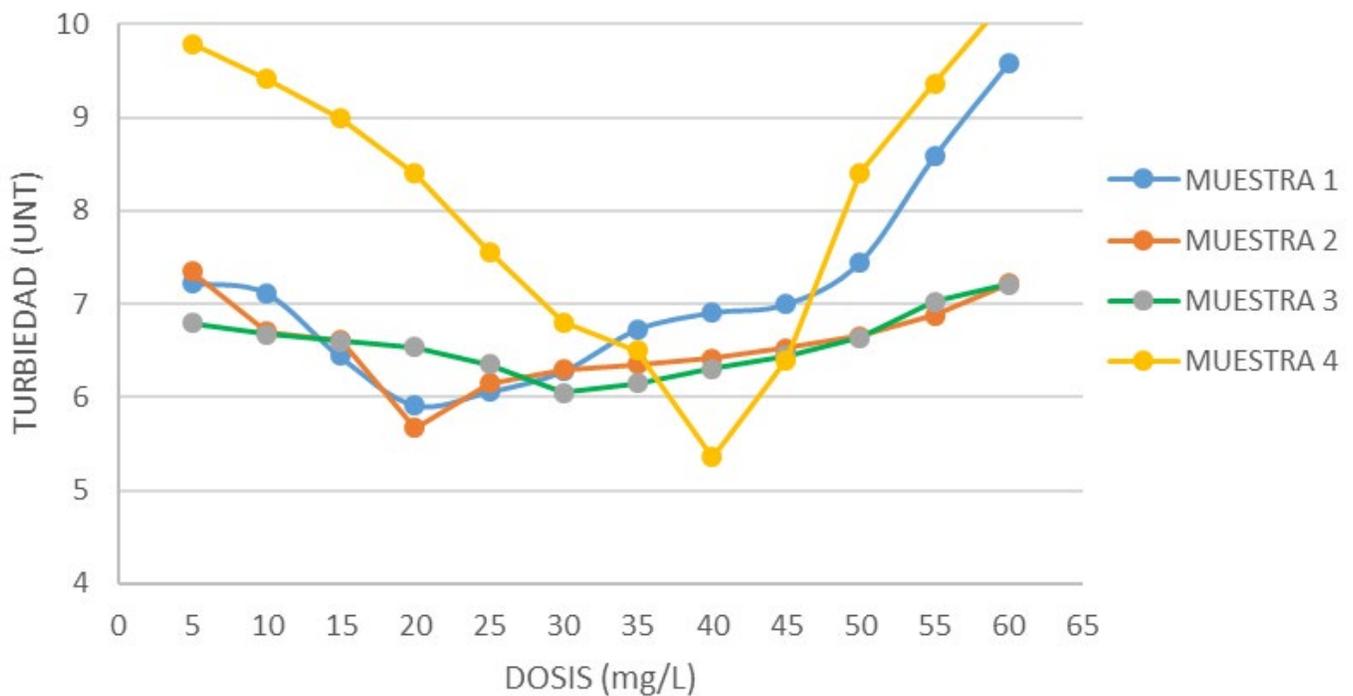


Figura 3. Variación de la turbiedad residual en función de las dosis aplicadas, con concentración del 2 %.

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos de las cuatro primeras muestras de agua, evidenciando la dosis óptima, eficiencia de remoción de turbidez, variación de pH y temperatura.

Tabla 2. Resultados obtenidos de dosis óptima de las muestras del 01 al 04.

| Núm. de muestra | Dosis óptima (mg/l) | Turbidez | | | Potencial de hidrógeno | | | Temperatura | | |
|-----------------|---------------------|---------------|-------------|----------------|------------------------|------------|----------------|--------------|------------|----------------|
| | | Inicial (UNT) | Final (UNT) | Eficiencia (%) | Inicial (pH) | Final (pH) | Variación (pH) | Inicial (°C) | Final (°C) | Variación (°C) |
| 1 | 20 | 7.40 | 5.92 | 20.00 | 7.25 | 7.54 | 0.29 | 11.80 | 11.82 | 0.02 |
| 2 | 20 | 9.52 | 5.67 | 40.44 | 7.00 | 7.83 | 0.83 | 11.60 | 11.60 | 0.00 |
| 3 | 30 | 14.57 | 6.05 | 58.48 | 8.12 | 8.19 | 0.07 | 10.19 | 10.20 | 0.01 |
| 4 | 40 | 31.06 | 5.36 | 82.74 | 8.10 | 8.23 | 0.13 | 7.57 | 7.57 | 0.00 |

Respecto a la eficiencia de remoción de la turbidez, en la primera muestra de agua la eficiencia fue de 20 %, variando de 7.40 a 5.92 UNT; para la segunda muestra, la eficiencia fue de 40.44 %, variando de 9.52 a 5.67 UNT; para la tercera muestra, la eficiencia fue de 58.48 %, variando de 14.57 a 6.05 UNT; para la cuarta muestra, la eficiencia fue de 82.74 %, variando de 31.06 a 5.36 UNT.

En cuanto al pH y temperatura, no hubo variación significativa entre los valores iniciales y finales de las muestras, como también se puede evidenciar en la Tabla 2.

Resultados de la dosificación para turbiedades mayores a 50 y menores a 150 UNT

La Figura 4 representa los resultados de la dosificación de MO para las muestras de agua del 05 a 10; de igual manera, en cada muestra se aplicaron 12 dosis, iniciando en 60 mg/l, con incrementos de 5 mg/l hasta llegar a 115 mg/l; así se obtuvo la dosis óptima que se evidencia en los picos más bajos, siendo de 80, 80, 80, 90, 90 y 100 mg/l, respectivamente.

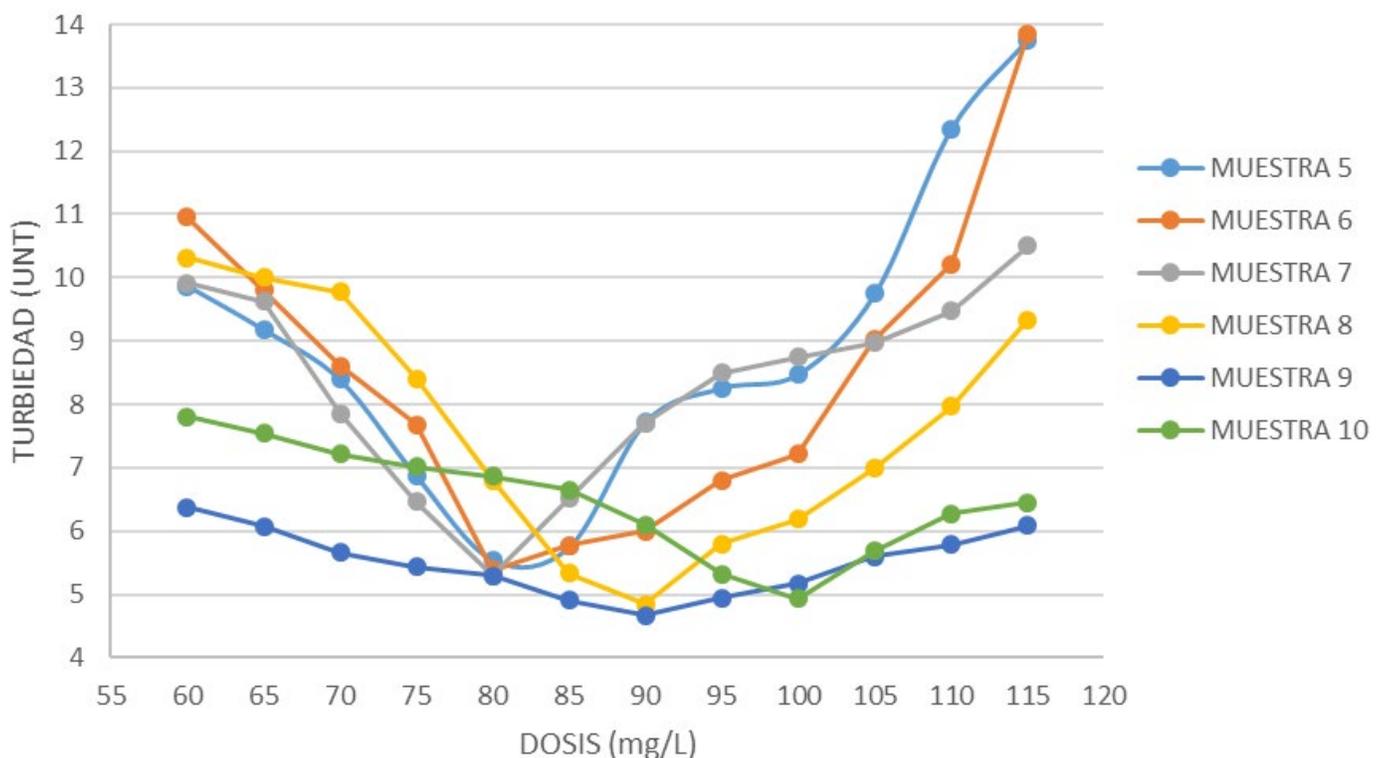


Figura 4. Variación de la turbiedad residual en función de las dosis aplicadas, con concentración del 2 %.

La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos de las 06 últimas muestras de agua, evidenciando la dosis óptima, la eficiencia de remoción de turbidez, variación de pH y temperatura.

Tabla 3. Resultados obtenidos de dosis óptima de las muestras del 05 al 10.

| N° de Muestra | Dosis óptima (mg/l) | Turbidez | | | Potencial de Hidrógeno | | | Temperatura | | |
|---------------|---------------------|---------------|-------------|----------------|------------------------|------------|----------------|--------------|------------|----------------|
| | | Inicial (UNT) | Final (UNT) | Eficiencia (%) | Inicial (pH) | Final (pH) | Variación (pH) | Inicial (°C) | Final (°C) | Variación (°C) |
| 5 | 80 | 53.67 | 5.55 | 89.66 | 7.38 | 7.73 | 0.35 | 5.87 | 5.90 | 0.03 |
| 6 | 80 | 62.77 | 5.38 | 91.43 | 7.40 | 7.67 | 0.27 | 6.13 | 6.13 | 0.00 |
| 7 | 80 | 75.59 | 5.30 | 92.99 | 7.58 | 7.84 | 0.26 | 8.87 | 8.89 | 0.02 |
| 8 | 90 | 88.89 | 4.85 | 94.54 | 7.39 | 7.76 | 0.37 | 5.83 | 5.84 | 0.01 |
| 9 | 90 | 90.32 | 4.67 | 94.83 | 7.72 | 8.17 | 0.45 | 4.60 | 4.62 | 0.02 |
| 10 | 100 | 105.63 | 4.93 | 95.33 | 7.91 | 8.37 | 0.46 | 4.13 | 4.15 | 0.02 |

Para la quinta muestra de agua, la eficiencia fue de 89.66% variando de 53.67 a 5.55 UNT; para la sexta muestra, la eficiencia fue de 91.43 %, variando de 62.77 a 5.38 UNT; para la séptima muestra, la eficiencia fue de 92.99 %, variando de 75.59 a 5.30 UNT; para la octava muestra, la eficiencia fue de 94.54 %, variando de 88.89 a 4.85 UNT; para la novena muestra, la eficiencia fue de 94.83 %, variando de 90.32 a 4.67 UNT; para la décima muestra, la eficiencia fue de 95.33 %, variando de 105.63 a 4.93 UNT.

De igual manera, con respecto al pH y temperatura no se encontró evidencia de incremento significativo entre los valores iniciales y finales de la muestra, según la Tabla 3.

Resultados de la concentración

La Figura 5 muestra la aplicación de las diferentes concentraciones de MO desde 0.5 hasta 10%, aplicando las dosis óptimas obtenidas anteriormente en cada una de las muestras iniciales de agua. Las concentraciones óptimas encontradas fueron de 3, 3, 2, 2, 3, 3, 3, 2, 2 y 2 %, respectivamente.

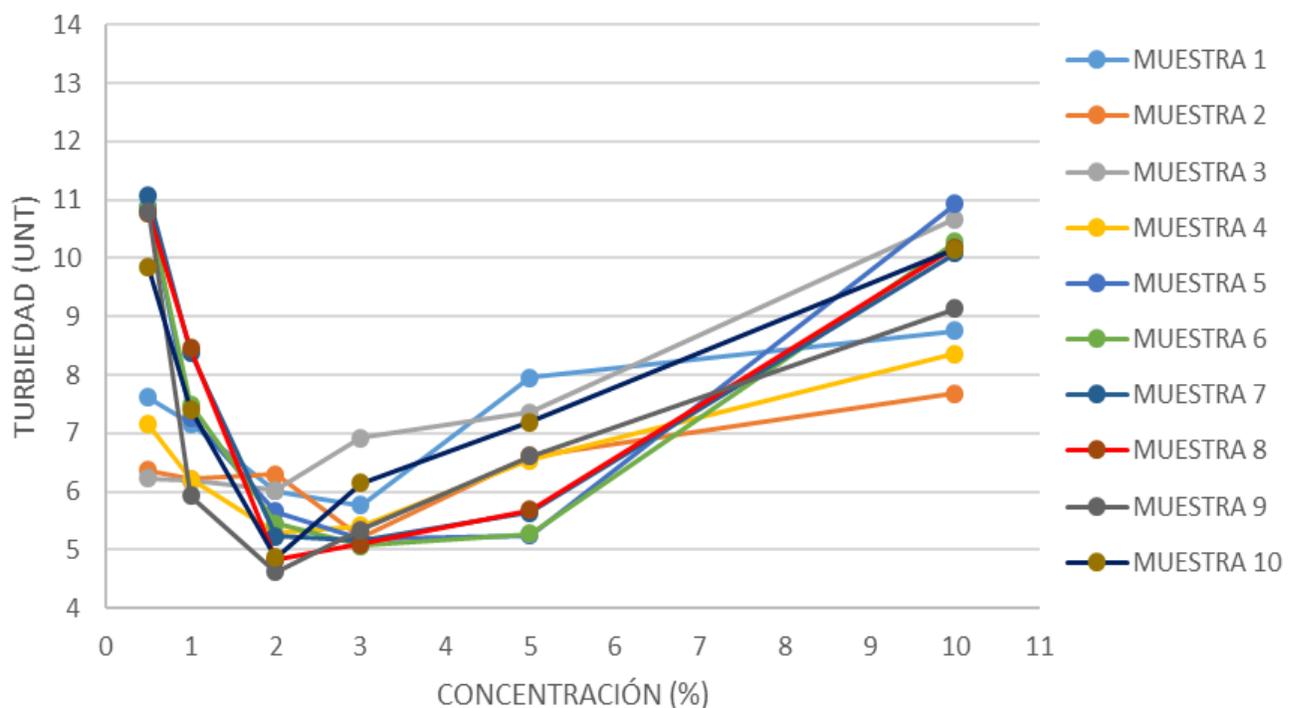


Figura 5. Variación de la turbiedad residual en función de las concentraciones aplicadas, según las dosis óptimas encontradas.

La Tabla 4 representa los resultados obtenidos de las muestras de agua, considerando las dosis óptimas encontradas inicialmente; a partir de ello, se obtuvo como resultado la concentración óptima, eficiencia de remoción, variación de pH y temperatura.

Tabla 4. Resultados obtenidos de dosis óptima de las muestras del 01 al 10.

| Núm. de muestra | Concentración óptima (mg/l) | Turbidez | | | Potencial de hidrógeno | | | Temperatura | | |
|-----------------|-----------------------------|---------------|-------------|----------------|------------------------|------------|----------------|--------------|------------|----------------|
| | | Inicial (UNT) | Final (UNT) | Eficiencia (%) | Inicial (pH) | Final (pH) | Variación (pH) | Inicial (°C) | Final (°C) | Variación (°C) |
| 1 | 3 | 7.40 | 5.77 | 22.03 | 7.25 | 7.82 | 0.57 | 11.80 | 11.81 | 0.01 |
| 2 | 3 | 9.52 | 5.21 | 45.27 | 7.00 | 8.01 | 1.01 | 11.60 | 11.80 | 0.20 |
| 3 | 2 | 14.57 | 6.02 | 58.68 | 8.12 | 8.25 | 0.13 | 10.19 | 10.21 | 0.02 |
| 4 | 2 | 31.06 | 5.29 | 82.97 | 8.10 | 8.23 | 0.13 | 7.57 | 7.58 | 0.01 |
| 5 | 3 | 53.67 | 5.19 | 90.33 | 7.38 | 7.64 | 0.26 | 5.87 | 5.89 | 0.02 |
| 6 | 3 | 62.77 | 5.07 | 91.92 | 7.40 | 7.72 | 0.32 | 6.13 | 6.15 | 0.02 |
| 7 | 3 | 75.59 | 5.15 | 93.19 | 7.58 | 7.86 | 0.28 | 8.87 | 8.89 | 0.02 |
| 8 | 2 | 88.89 | 4.83 | 94.57 | 7.39 | 7.55 | 0.16 | 5.83 | 5.85 | 0.02 |
| 9 | 2 | 90.32 | 4.63 | 94.87 | 7.72 | 8.37 | 0.65 | 4.60 | 4.63 | 0.03 |
| 10 | 2 | 105.63 | 4.87 | 95.39 | 7.91 | 8.12 | 0.21 | 4.13 | 4.15 | 0.02 |

Para la primera muestra de agua, la eficiencia fue de 22.03 % variando de 7.40 a 5.77 UNT; para la segunda muestra, la eficiencia fue de 45.27 %, variando de 9.52 a 5.21 UNT; para la tercera muestra, la

eficiencia fue de 58.68 %, variando de 14.57 a 6.02 UNT; para la cuarta muestra, la eficiencia fue de 82.97 %, variando de 31.06 a 5.29 UNT; para la quinta muestra, la eficiencia fue de 90.33 %, variando de 53.67 a 5.19 UNT; para la sexta muestra, la eficiencia fue de 91.92 %, variando de 62.77 a 5.07 UNT; para la séptima muestra, la eficiencia fue de 93.19 %, variando de 75.59 a 5.15 UNT; para la octava muestra, la eficiencia fue de 94.57 %, variando de 88.89 a 4.83 UNT; para la novena muestra, la eficiencia fue de 94.87 %, variando de 90.32 a 4.63 UNT, y para la décima muestra, la eficiencia fue de 95.39 %, variando de 105.63 a 4.87 UNT.

También respecto al pH y la temperatura, la variación no es significativa entre los valores iniciales y finales de la muestra, como se puede evidenciar en la Tabla 4.

Análisis estadístico

En la Tabla 5 se presenta el resultado del ANOVA de las dosis óptimas obtenidas en la experimentación con la semilla MO a distintas turbiedades. La significancia es menor a 5 %, e indica que los datos obtenidos son significativos; el coeficiente de determinación resultó 0.975, lo cual significa la cercanía en que se encuentran los datos a la línea de la regresión ajustada; el error típico salió de 5.711, que significa el intervalo de confianza respecto a la fiabilidad de los cálculos.

Tabla 5. Prueba de análisis de la varianza de la regresión de las dosis óptimas.

| Análisis de la varianza de la regresión | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado de la media | F valor | Signif. < 5 % |
| Regresión | 2 | 8781.718 | 4 390.859 | 134.64 | < 0.0001 |
| Error | 7 | 228.282 | 32.612 | - | - |
| Total corregido | 9 | 9 010.000 | - | - | - |
| Coefficiente de determinación R^2 | | | 0.975 | | |
| R^2 ajustado | | | 0.967 | | |
| Error típico | | | 5.711 | | |
| Estimadores de parámetros | | | | | |
| Variable | Grados de libertad | Estimador del parámetro | Error estándar | Valor t | $Pr > t$ |
| Intercepto | 1 | 7.636 | 4.747 | 1.61 | 0.152 |
| Turbiedad | 1 | 1.494 | 0.227 | 6.57 | 0.000 |
| Turbiedad² | 1 | -0.006 | 0.002 | -2.95 | 0.021 |

El primer modelo de regresión se ajustó en función de la variable dependiente (turbiedad) en las condiciones de la investigación. Luego, la optimización se analizó en términos de la variable dosis:

$$Dosis = 18.57166 + 0.84217 (\text{turbiedad}) \quad (2)$$

En la Tabla 6 se presenta el resultado del ANOVA de las concentraciones óptimas obtenidas en la experimentación con la semilla MO a distintas turbiedades. La significancia es menor a 5 %, que indica que los datos obtenidos son significativos; el coeficiente de determinación resultó 0.931, que significa la cercanía en que se encuentra los datos a la línea de la regresión ajustada; el error típico salió de 0.186, esto es, el intervalo de confianza respecto a la fiabilidad de los cálculos.

Tabla 6. Análisis de la varianza de la regresión de concentraciones óptimas.

| Análisis de la varianza de la regresión | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado de la media | F Valor | Signif. < 0.05 |
| Regresión | 4 | 2.328 | 0.582 | 106.88 | 0.004 |
| Error | 5 | 0.172 | 0.034 | | |
| Total corregido | 9 | 2.500 | | | |
| Coefficiente de determinación R^2 | | | | 0.931 | |
| R^2 ajustado | | | | 0.876 | |
| Error típico | | | | 0.186 | |
| Estimadores de parámetros | | | | | |
| Variable | Grados de libertad | Estimador del parámetro | Error estándar | Valor t | $Pr > t$ |
| Intercepto | 1 | 5.22887 | 0.417 | 12.55 | < 0.0001 |
| Turbiedad | 1 | -0.36698 | 0.054 | -6.75 | 0.001 |
| Turbiedad² | 1 | 0.01272 | 0.002 | 6.78 | 0.001 |
| Turbiedad³ | 1 | -0.00015851 | 0.000024 | -6.56 | 0.001 |
| Turbiedad⁴ | 1 | 6.462249E-7 | 1.042E-7 | 6.20 | 0.001 |

El segundo modelo de regresión se ajustó en función de la variable dependiente turbiedad y dosis óptima determinada previamente. Luego,

las condiciones de optimización se analizaron en términos de la variable independiente concentración:

$$\text{Concentración} = 5.22887 - 0.36698 \text{ turbiedad} + 0.01272 (\text{turbiedad})^2 - 0.00015851 (\text{turbiedad})^3 + 6.462249E - 7 (\text{turbiedad})^4 \quad (3)$$

Discusión

Para las cuatro primeras muestras con turbiedades menores a 50 UNT se encontraron dosis óptimas de 20, 20, 30 y 40 mg/l, con eficiencias de 20, 40.44, 58.48 y 82.74 %, respectivamente. En el estudio realizado en agua cruda, según Gandiwa *et al.* (2020), con una turbiedad de 29 UNT y una dosis óptima de 50 mg/l, se obtuvo una eficiencia de 88.7 %. La metodología de secado de la semilla de MO se realizó en un horno a 35 °C, con una preparación al 1 %, seguida de una agitación magnética durante una hora. Para 30 UNT de turbidez inicial de agua superficial y un tiempo de sedimentación de 120 minutos se obtuvo una eficiencia de 89 % con una dosis óptima de 50 mg/l; también experimentaron una turbiedad de 10 UNT del mismo afluente, con eficiencia de remoción del 60 % en 80 minutos de sedimentación. Los resultados indican que no es necesario sacar el aceite de la semilla de MO debido a que no aumenta la eliminación de turbidez (Camacho, Sousa, Bergamasco, & Ribau-Teixeira, 2017). Otra investigación evaluó que para una turbidez de 23 UNT de agua de río, añadiendo 0.25 g de polvo de semilla de MO, para un tiempo de tres horas, se tuvo una eficiencia de 86.96 % (Varkey, 2020). Con una turbidez inicial de 14.4 UNT de agua subterránea, se tuvo una eficiencia

de remoción de 45.8 %, con una dosis óptima de 100 mg/l (Alam *et al.*, 2020). Se utilizó una dosis óptima del coagulante MO de 164.60 mg/l para remover un 82.04 % de eficiencia de una turbidez inicial de 8.90 UNT de agua cruda (Kucera *et al.*, 2020). La variación de eficiencias en las distintas investigaciones, comparado con el estudio realizado, se debe mayormente al método de extracción del polvo de semilla de MO, ya fuera por la diversidad en la molienda, algunos con licuadoras domésticas y otros con máquinas especializadas de laboratorio, y la forma de secado al sol o a través de hornos de laboratorio; además, la temperatura y el pH no influyeron en el comportamiento del coagulante de MO.

También se obtuvieron los resultados de aguas con turbiedades mayores de 50 a 150 UNT, correspondientes a las seis últimas muestras; se encontraron dosis óptimas de 80, 80, 80, 90, 90 y 100 mg/l, con eficiencias de 88.66, 91.43, 92.99, 94.54, 94.83 y 95.33 %, respectivamente. Para la remoción de turbiedad de 60 UNT de agua turbia sintética se utilizó una dosis de 10 mg/l a una solución del 2 %, con eficiencias de remoción del 97.7 y 90.4 % (Nascimento *et al.*, 2019). En otra investigación se usó el polvo de semilla de MO, obteniendo una alta eficiencia en la eliminación de la turbidez de hasta un 90 % con una dosis óptima de 50 mg/l para turbiedades de 60 UNT de agua superficial (Camacho *et al.*, 2017). Esto, seguido de la investigación realizada por Mariano-Ribeiro, Veja-Andrade y Goncalves-dos-Reis (2014), que indica una eficiencia de la semilla de MO de 92 a 99 % para aguas subterráneas extraídas de un pozo con turbidez que se encuentran entre 50 y 200 UNT. La variación de los resultados de distintas investigaciones se debe a la

obtención del polvo de semilla de MO; asimismo, el pH y la temperatura no afectaron la eficiencia de la MO como coagulante.

Además, se evaluaron las concentraciones de la MO como coagulante, teniendo resultados del 2 y 3 % como los óptimos para las turbiedades menores a 150 UNT. En un estudio realizado por Gaikwad y Munavalli (2019) se empleó la MO como coagulante al 1 %, encontrando remociones del 90.46 % para turbiedades entre 13 y 24 UNT de agua turbia preparada; también una eficiencia del 88.57 % para turbiedades entre 25 y 35 UNT de agua sintética. Otra investigación desarrollada demostró una eficiencia del 97.7 y 90.4 % para una turbiedad de agua turbia sintética de 60 UNT con una concentración al 2 % (Nascimento *et al.*, 2019). La variación se debió a diferentes tiempos de retención hidráulica en las fases de mezcla rápida, floculación y sedimentación.

Los resultados de pH obtenidos tuvieron un ligero incremento de 0.07 hasta un máximo de 0.83 con respecto a los valores de pH inicial, comparado con el resultado final. La MO es muy eficaz en el tratamiento de agua turbia superficial sin afectar significativamente el pH (Aduro & Ebenso, 2019). El aumento de las dosis de coagulantes derivados de semillas de MO no modificó el valor de pH del agua turbia sintética (García-Chales *et al.*, 2022). La reducción del pH fue mínima al usar la MO como coagulante en agua cruda, encontrándose dentro del rango de pH deseado de 5.5 a 8.5 para agua potable (Gandiwa *et al.*, 2020) Cabe mencionar que los parámetros de pH obtenidos inicialmente se encuentran dentro del rango establecido por el reglamento de la calidad del agua para consumo humano según D.S. N° 031-2010-SA (Digesa, 2010).

Conclusiones

Los datos evaluados indican que para turbiedades menores a 50 UNT, el rango de la dosis óptima de la semilla de MO como coagulante se encuentra en un rango de 10 a 50 mg/l, lo cual indica que a mayor turbidez la dosis se incrementa de forma lineal.

También los resultados obtenidos para turbiedades mayores de 50 a 150 UNT, la dosis óptima está dentro del rango de 80 a 100 mg/l; en este caso, las dosis aumentan ligeramente, según se encuentre mayor turbidez en el agua muestreada de forma lineal.

Este estudio demuestra que la concentración óptima para turbiedades hasta 150 UNT están dentro del rango de 2 a 3 %, debiéndose evaluar según las características del agua cruda.

El pH durante el proceso de la obtención de la dosis y concentración óptima tuvo un ligero incremento respecto a la muestra inicial; sin embargo, se ubican dentro del rango según el reglamento de la calidad del agua para consumo humano (D.S. N° 031-2010-SA), que es menor de 8.5 y mayor de 6.5 pH; la temperatura no tuvo variación alguna durante el proceso con la adición del polvo de la semilla *Moringa oleifera*.

Agradecimientos

Agradecemos a la Facultad de Ciencias de Ingeniería de la Universidad Nacional de Huancavelica, Perú, y a todas las personas que apoyaron en la realización de esta investigación.

Referencias

- Aduro, A., & Ebenso, B. (2019). Qualitative exploration of local knowledge, attitudes and use of *Moringa oleifera* seeds for home-based water purification and diarrhoea prevention in Niger state, Nigeria. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 9(2), 300-308. DOI: 10.2166/washdev.2019.112
- Ahizi, A. E., Njoku, C. N., Onyelucheya, O. E., Anusi, M. O., Okonkwo, I. J., Okoye, P. U., & Igwegbe, C. A. (2023). Optimization of *Moringa oleifera* cationic protein/zeolite adsorbent blend for synthetic turbid water treatment. *Sustainable Water Resources Management*, 9(1). DOI: 10.1007/S40899-022-00780-4
- Alam, M. W., Pandey, P., Khan, F., Souayeh, B., & Farhan, M. (2020). Study to investigate the potential of combined extract of leaves and seeds of *Moringa oleifera* in groundwater purification. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 1-13. DOI: 10.3390/ijerph17207468
- ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2016). *R.J. 010-2016-ANA* (p. 59). Recuperado de https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._010-2016-ana_0.pdf
- Camacho, F. P., Sousa, V. S., Bergamasco, R., & Ribau-Teixeira, M. (2017). The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 313, 226-237. DOI: 10.1016/j.cej.2016.12.031

- Digesa, Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria. (2010). Reglamento de la calidad de agua. En: *Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano*, núm. 9 (pp. 1689-1699). Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/273650/reglamento-de-la-calidad-del-agua-para-consumo-humano.pdf>
- Gaikwad, V. T., & Munavalli, G. R. (2019). Turbidity removal by conventional and ballasted coagulation with natural coagulants. *Applied Water Science*, 9(5), 1-9. DOI: 10.1007/s13201-019-1009-6
- Gandiwa, B. I., Moyo, L. B., Ncube, S., Mamvura, T. A., Mguni, L. L., & Hlabangana, N. (2020). 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*, 34(July, 2019), 158-164. DOI: 10.1016/j.sajce.2020.07.005
- García-Chales, G., Siqueira-Tihameri, B., Moreira-Milhan, N. V., Yumi-Koga-Ito, C., Pereira-Antunes, M. L., & Reis, A. G. Dos. (2022). Impact of *Moringa oleifera* seed-derived coagulants processing steps on physicochemical, residual organic, and cytotoxicity properties of treated water. *Water*, 14(13). DOI: 10.3390/w14132058

- Hadadi, A., Imessaoudene, A., Bollinger, J. C., Assadi, A. A., Amrane, A., & Mouni, L. (2022). Comparison of four plant-based bio-coagulants performances against alum and ferric chloride in the turbidity improvement of bentonite synthetic water. *Water*, 14(20). DOI: 10.3390/W14203324
- Kucera, T., Hofmanova, L., & Biela, R. (2020). Natural polymers as alternatives to conventional coagulation agents. Lab-scale research with *Moringa oleifera* seeds and chitosan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 444(1). DOI: 10.1088/1755-1315/444/1/012032
- Mariano-Ribeiro, J. V., Veja-Andrade, P., & Goncalves-dos-Reis, A. (2014). *Moringa oleifera* seed as a natural coagulant to treat low-turbidity water by in-line filtration. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445-458. DOI: 10.4136/1980-993X
- Michelan, D. C. de G. S., Santos, W. N. de A., Rosa, T. S., Santos, D. de G., & De Jesus, R. de C. S. (2021). Uso do coagulante/floculante emergente à base de *Moringa* no tratamento de água com verificação da composição e toxicidade do lodo produzido: tratamento de água com *Moringa* e toxicidade do lodo. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 26(5), 955-963. DOI: 10.1590/S1413-415220200314
- Murali, A., Hillstead, K. D., Wrobel, B. S., Thomas, D. J., Gonety, R., & Tarabara, V. V. (2022). *Moringa oleifera*-derived coagulants for water treatment: Floc structure, residual organics, and performance trade-offs. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 24381-24389. DOI: 10.1007/S11356-022-19071-8

- Narges, S., Ghorban, A., Hassan, K., & Mohammad, K. (2021). Prediction of the optimal dosage of coagulants in water treatment plants through developing models based on artificial neural network fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(2), 1543-1553. DOI: 10.1007/s40201-021-00710-0
- Nascimento, V. R. G., Biagi, J. D., De Oliveira, R. A., Arantes, C. C., & Rossi, L. A. (2019). Infrared radiation drying of *Moringa oleifera* grains for use in water treatment. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(10), 768-775. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n10p768-775
- Nweke, M. M., Chukwuma, F. O., Evbuomwan, B. O., & Oji, A. (2022). Turbidity reduction of abattoir wastewater by the coagulation-flocculation process using papaya seed extract. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 19(3). DOI: 10.6703/IJASE.202209_19(3).005
- Pandey, P., Khan, F., Ahmad, V., Singh, A., Shamshad, T., & Mishra, R. (2020). Combined efficacy of *Azadirachta indica* and *Moringa oleifera* leaves extract as a potential coagulant in ground water treatment. *SN Applied Sciences*, 2(7), 1-8. DOI: 10.1007/s42452-020-3124-2
- Ramal, M. M., Jalal, A. D., Sahab, M. F., & Yaseen, Z. M. (2022). River water turbidity removal using new natural coagulant aids: Case study of Euphrates River, Iraq. *Water Supply*, 22(3), 2721-2737. DOI: 10.2166/WS.2021.441

- Safonyk, A., & Matviichuk, M. (2022). Optimization of coagulant dosing process for water purification based on artificial neural networks. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 149, 92-104. DOI: 10.1007/978-3-031-16203-9_6
- Taiwo, A. S., Adenike, K., & Aderonke, O. (2020). Efficacy of a natural coagulant protein from *Moringa oleifera* (Lam) seeds in treatment of Opa reservoir water, Ile-Ife, Nigeria. *Heliyon*, 6(1), e03335. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03335
- Varkey, A. J. (2020). Purification of river water using *Moringa oleifera* seed and copper for point-of-use household application. *Scientific African*, 8. DOI: 10.1016/j.sciaf.2020.e00364
- 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). DOI: 10.1016/J.HELIYON.2022.E10447
- Zaid, A. Q., Ghazali, S. B., Mutamim, N. S. A., & Olalere, O. A. (2019). Experimental optimization of *Moringa oleifera* seed powder as bio-coagulants in water treatment process. *SN Applied Sciences*, 1(5), 1-5. DOI: 10.1007/s42452-019-0518-0