TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO
Instituto Tecnológico de Culiacán

TITULACIÓN INTEGRAL

Opción:

Tesis profesional

Evaluación del pulverizado de *Moringa oleífera* para la coagulación asistida de aguas residuales

ALUMNO(A):
Sifei Narai García Muñoz

CARRERA:
Ing. Bioquímica

No. De Control.
20170236

Culiacán, Sinaloa (2025)



DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ASUNTO: **Autorización de Impresión**

Culiacán, Sinaloa, 11/11/2025 13:28

C. SIFEI NARAI GARCIA MUÑOZ
PASANTE(S) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA BIOQUÍMICA
P R E S E N T E.

De acuerdo con fallo emitido por la Comisión Revisora Integrada por:

		Cédula Profesional
Presidente:	Doctorado en Ingeniería Ambiental **Leonel Ernesto Amabilis Sosa**	10359494
Secretario:	Doctor en Biotecnología de Alimentos **Jesus Jaime Rochín Medina**	9240544
Vocal:	Maestra en Ciencias **Ilianne Annel Mendoza López**	6786244

Y considerando que reúne los requisitos establecidos en la Opción: **TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL "EVALUACIÓN DEL PULVERIZADO DE MORINGA OLEÍFERA PARA LA COAGULACIÓN ASISTIDA DE AGUAS RESIDUALES",** damos a usted nuestra autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional.

Sin otro particular, quedo de usted.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®

CONCEPCION MENDOZA R

LIC. CONCEPCIÓN MENDOZA ROSALES
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

Educación
Secretaría de Educación Pública
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN
DEPARTAMENTO DE
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



2025 Año de La Mujer Indígena

EVALUACIÓN DEL PULVERIZADO DE *MORINGA OLEÍFERA* PARA LA COAGULACIÓN ASISTIDA DE AGUAS RESIDUALES

RESUMEN

Se propuso el uso del pulverizado de semillas de moringa como coagulante en la industria agrícola, ya que tenía un gran potencial, especialmente en el tratamiento de aguas residuales y la mejora de la calidad del agua para riego. Como se sabía, existían otros tipos sintéticos mayoritariamente compuestos por metales pesados tales como aluminio y hierro, que finalmente tenían un impacto negativo en el ambiente; por ello, surgió la necesidad de buscar, conocer y explorar opciones más amigables para el medio ambiente, como la semilla de moringa. De esta forma, se evaluó la eficacia de la semilla de moringa como coagulante natural en el tratamiento de aguas residuales.

Se llevó a cabo la determinación de la dosis óptima de semilla de moringa para lograr una mayor eficiencia en la clarificación del agua. Para ello, se midieron parámetros clave como la turbidez, el color (analizado a través de espectros), los sólidos suspendidos totales (SST) y el pH, tanto antes como después de la adición de la semilla de moringa. Los resultados permitieron identificar la dosis más adecuada para maximizar la reducción de contaminantes y mejorar la calidad del agua tratada.

Se aplicó una metodología que permitió primero identificar la mezcla de diversos componentes, tanto sólidos como líquidos, que eran factores clave para

diseñar el proceso de tratamiento adecuado. Una vez realizado esto, se estimó la dosis exacta que optimizó el uso de la semilla de moringa como coagulante natural.

A través de un análisis comparativo con el policloruro de aluminio (PAC), se evaluó la capacidad de la moringa para ofrecer una alternativa sostenible y económica frente a los coagulantes sintéticos.

Palabras clave: Coagulación, Floculación, Sedimentación, Moringa Oleífera.

ABSTRAC

The use of powdered moringa seeds was proposed as a coagulant in the agricultural industry, since it had great potential, especially in wastewater treatment and in improving water quality for irrigation. As was known, there were other synthetic types, mostly composed of heavy metals such as aluminum and iron, which ultimately had a negative impact on the environment. For this reason, the need arose to search for, learn about, and explore more environmentally friendly options, such as the moringa seed. In this way, the effectiveness of moringa seeds as a natural coagulant in wastewater treatment was evaluated.

The determination of the optimal moringa seed dose was carried out to achieve greater efficiency in water clarification. For this purpose, key parameters such as turbidity, color (analyzed through spectra), total suspended solids (TSS), and pH

were measured, both before and after the addition of moringa seed. The results made it possible to identify the most suitable dose to maximize the reduction of contaminants and improve the quality of treated water.

A methodology was applied that first allowed the identification of the mixture of various components, both solid and liquid, which were key factors for designing the appropriate treatment process. Once this was done, the exact dose that optimized the use of moringa seed as a natural coagulant was estimated.

Through a comparative analysis with polyaluminum chloride (PAC), the capacity of moringa to offer a sustainable and economical alternative to synthetic coagulants was evaluated.

Keywords: Coagulation; Flocculation; Sedimentation; Moringa Oleifera.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 10

1.2 ANTECEDENTES 11

1.3 Importancia del agua en México 11

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 15

1.5 HIPÓTESIS 17

1.6 OBJETIVO GENERAL 18

1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18

1.8 JUSTIFICACIÓN 19

1.9 ALCANCE 20

2 FUNDAMENTO TEÓRICO 21

2.2 Aguas residuales 21

2.2.1Tratamiento de aguas residuales 22

2.2.2 Tratamiento preliminar 23

2.2.3 Tratamiento Primario 24

2.2.4 Coagulación-floculación 24

2.2.5 Floculación 27

Es un proceso físico en la potabilización del agua donde se genera la agregación o crecimiento de las partículas finamente divididas y coloidales previamente desestabilizadas en el proceso de coagulación con el fin de poder separarlas del agua en procesos anteriores de sedimentación y filtración. En la floculación el efecto de transporte de masa de agua da como resultado colisiones entre las partículas desestabilizadas generándose la formación de grumos. 27

2.2.6 Metales pesados 27

2.2.7 Filtrado 29

La filtración es un proceso que permite separar partículas inorgánicas y pequeñas cantidades de microorganismos, como bacterias y virus, utilizando un medio poroso. Este proceso es clave para garantizar que el agua cumpla con los estándares de calidad requeridos para ser potable, logrando una eficiencia de remoción bacteriológica superior al 99% (Jorge A., 2024). 29

El tamaño de las partículas que quedan atrapadas en el lecho filtrante varía, desde flóculos de 1 mm hasta coloides, bacterias y virus de tamaños menores a 0.001 mm. Si el flóculo es más grande que los poros del lecho, queda retenido mecánicamente en los espacios del filtro. En cambio, las bacterias, aunque son mucho más pequeñas que los poros, son removidas por otros fenómenos físicos y químicos que ocurren durante el proceso. 29

La filtración incluye varias etapas complementarias que trabajan juntas para lograr una mayor eficiencia. 29

Durante la filtración, se desarrollan las siguientes etapas complementarias: 29

Clasificación de las unidades de filtración: 30

- Lecho filtrante: Puede ser simple (arena o antracita) o doble/múltiple. 30

Factores que influyen sobre la filtración: 30

Con el tiempo, las partículas quedan atrapadas en el medio filtrante hasta obstruir el flujo, lo que requiere lavar el filtro periódicamente. El agua filtrada debe cumplir con estándares de calidad, como una turbiedad no mayor a 1 NTU y un color inferior a 5 UCV (Cristina, Camacho, 2011). 31

2.2.8 Tratamiento de Lodos o biosólidos 31

Los metales pesados están estrechamente relacionados con los lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales, ya que pueden estar presentes en el agua de entrada y terminar concentrándose en estos subproductos. La acumulación de metales pesados en los lodos ocurre porque muchos de estos elementos se adhieren a las partículas sólidas durante las etapas de tratamiento, especialmente en la sedimentación primaria y en los procesos biológicos secundarios. 31

Durante la sedimentación primaria, los metales pesados que están ligados a partículas sedimentables o coloidales se precipitan y forman parte del lodo primario. 32

Cuando se usan productos químicos para mejorar la sedimentación (por ejemplo, coagulantes o floculantes), también puede aumentar la cantidad de metales pesados atrapados en el lodo debido a la interacción química con estos aditivos. 32

En los procesos biológicos, algunos metales pesados pueden ser absorbidos por los

microorganismos que forman la biomasa, quedando incorporados en los lodos secundarios. 32

Además, las partículas que no se sedimentaron en la etapa primaria pueden contener metales pesados y ser removidas en esta etapa, aumentando la concentración de estos contaminantes en los lodos secundarios. 32

Con base en lo anterior, es posible identificar tres grandes problemáticas relacionadas con el tratamiento de los lodos provenientes de los procesos de sedimentación, la primera de ellas se relaciona con: 32

Toxicidad de los lodos: La presencia de metales pesados en los lodos puede limitar su uso, por ejemplo, en aplicaciones agrícolas, debido a los riesgos de toxicidad para las plantas, los animales y los humanos. 32

Gestión y disposición: Los lodos que contienen altos niveles de metales pesados requieren tratamientos adicionales o disposiciones específicas, como confinamientos controlados o incineración, para evitar la contaminación del suelo o las aguas subterráneas. 33

Normatividad: En México, las normativas establecen límites para la concentración de metales pesados en los lodos cuando se busca su disposición o reutilización. Por ejemplo, la NOM-004-SEMARNAT-2002 regula el uso de lodos en suelos y fija límites para metales como plomo, cadmio y mercurio. 33

2.3 Potencial de la *Moringa oleífera* como agente biotecnológico 33

2.3.1 Estructura fisiológica 34

2.3.2 Propiedades químicas de la *Moringa oleífera* 36

La moringa es conocida por su composición química diversa, que incluye una amplia gama de compuestos bioactivos con propiedades benéficas tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Entre los principales componentes químicos se encuentran las proteínas y aminoácidos. La moringa contiene proteínas con alto valor biológico, incluyendo aminoácidos esenciales como leucina, valina y lisina. Sus semillas poseen proteínas catiónicas que actúan como coagulantes naturales en el tratamiento de agua. 36

Además de los componentes nitrogenados, la Moringa se caracteriza por su gran contenido de compuestos bioactivos. 37

La *Moringa oleífera* es una planta con una composición química y bioquímica excepcional que le confiere múltiples propiedades beneficiosas, entre sus componentes destacan antioxidantes potentes como la quercetina y el kaempferol, los cuales desempeñan un papel fundamental en la reducción del estrés oxidativo, además contiene taninos que contribuyen a su capacidad antimicrobiana y antioxidante, así como glucosinolatos e isotiocianatos con propiedades antibacterianas y anticancerígenas, además de ácidos fenólicos como el ácido ferúlico y el ácido cafeico, que refuerzan sus efectos antioxidantes. 37

En cuanto a los minerales esenciales, la moringa es una fuente significativa de calcio, potasio, hierro, magnesio, zinc y fósforo, lo que la hace útil como suplemento nutricional y mejorador de suelos, además de ser rica en vitamina C, vitamina A en forma de carotenoides, vitaminas del complejo B y vitamina E, lo que complementa su alto valor nutricional. 37

Las semillas de moringa contienen entre un 35% y 40% de aceite, predominantemente ácido oleico, similar al aceite de oliva, este aceite posee propiedades antioxidantes y aplicaciones cosméticas, además, la moringa contiene fibras solubles e insolubles, lo que favorece su uso en aplicaciones alimenticias y en la mejora del suelo, presentando también carbohidratos complejos que pueden actuar como agentes espesantes naturales. 37

El crecimiento de la moringa se divide en varias etapas, comenzando con la germinación, la cual tiene una duración de 7 a 12 días bajo condiciones óptimas con temperaturas entre 20 y 30 °C, es rápida y eficiente en suelos bien drenados, además, las semillas mantienen su viabilidad por meses si se almacenan adecuadamente, seguida de la etapa vegetativa, que dura de 2 a 4 meses después de la germinación, con un crecimiento extremadamente rápido que puede alcanzar hasta 4 metros en el primer año, requiriendo alta exposición solar y riego moderado, aunque se adapta a suelos pobres, responde favorablemente a fertilizantes orgánicos (ADNAgro,2016). 38

Posteriormente ocurre la floración, que sucede entre los 6 y 8 meses después de la siembra, dependiendo de la temperatura superior a 14 °C, en esta etapa produce flores blancas fragantes, polinizadas principalmente por insectos, seguida por la producción de frutos en forma de vainas, la cual inicia en el primer año y puede prolongarse durante toda la vida del árbol bajo condiciones adecuadas, cada vaina contiene entre 12 y 35 semillas, llegando finalmente a la madurez y longevidad, donde aunque es una planta perenne, su vida útil promedio es de 15 a 20 años, aunque en India se han desarrollado variedades anuales (ADNAgro,(2016). 38

La moringa es altamente adaptable y resiliente, desarrollándose en diversas condiciones climáticas y de suelo, incluidos suelos pobres y zonas áridas, siendo resistente a la sequía, aunque sensible a heladas prolongadas, además, tolera podas severas y rebrotando rápidamente, lo que la hace ideal para forraje, cercas vivas y cortinas rompevientos, mejorando la estructura del suelo y previniendo la erosión, ya que su sistema radicular profundo permite la captación de nutrientes de capas inferiores (Guillermo,2017)..... 38

La moringa es resistente a muchas plagas gracias a la presencia de glucosinolatos, aunque puede ser afectada por insectos como el barrenador del tallo en condiciones desfavorables, además puede propagarse por semilla o estacas, siendo la reproducción por semilla más común en su hábitat natural, mientras que las estacas se emplean en climas fríos o para cultivos intensivos. 39

Más allá de los beneficios nutricionales y agrícolas, la moringa desempeña un papel crucial en la sostenibilidad ambiental, ya que su capacidad para enriquecer suelos, tratar aguas ya que se sugiere que los grupos funcionales en la cadena lateral de aminoácidos básicos (arginina, lisina e histidina) contribuyen a la actividad de coagulación del agua (Adewole,2020). y es buena resistiendo condiciones extremas la convierte en un recurso estratégico frente a desafíos

globales como la inseguridad alimentaria, la degradación de suelos y la escasez de agua. 39

2.3.4 Estado del Arte sobre el Potencial de la semilla de moringa 39

3. METODOLOGIA 42

4. RESULTADOS 50

5. DISCUSIONES 57

6. CONCLUSIONES 61

7. ANEXOS Análisis estadístico 63

8. FUENTES DE INFORMACIÓN 73

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714420306978 74

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Almacenamiento de las presas de Sinaloa 2024-2025……14

Tabla 2. Objetivo del proceso de pretratamiento ……..24

Tabla 3. Composición nutrimental de la Moringa Oleífera……..37

Tabla 4. Resultados de solidos suspendidos totales. Las masas de moringa y de PAC es por cada litro de agua residual mg/L. (t= tiempo, min) ……52

Tabla 5. Resultados de pH. Las masas de moringa y de PAC es por cada litro de agua residual mg/L. (t= tiempo, min) ……..53

Tabla 6. Resultados de turbidez, con distintas dosis de semilla de moringa (M) y de PAC es por cada litro de agua residual mg/L, en distintos tiempos (t)…….55

Tabla 7. Resultados de absorbancia con distintas dosis de semilla de moringa (M) y de PAC es por cada litro de agua residual mg/L, en distintos tiempos (t)……..56

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de un tren de tratamiento de aguas residuales, implementado convencionalmente para las aguas residuales municipales……23

Figura 2. Procesos de coagulación- floculación. ……26

Figura 3. Ubicación geográfica de recolección de semilla de Moringa oleífera……43

Figura 4. Descascarillado, pulverizado y tamizado de la semilla de moringa……..43

Figura 5. Ubicación geográfica del lugar de recolección de pluvial……44

Figura 6. Medición de ABS (Absorbancia)……..45

Figura 7. Determinación de turbidez en turbidímetro HACH modelo……46

Figura 8. sequedad del filtro antes del secado……..47

Figura 9. Filtrado de agua residual……..48

Figura 10. Secado de filtro durante determinación de sólidos suspendidos totales……48

Figura 11. Prueba de jarras con distintas dosis……49

Figura 12. Grafica de remoción de Solidos suspendidos totales (SST) con distintas dosis de semilla de moringa (M)……...51

Figura 13. Grafica de resultados de pH con distintas dosis de moringa (M) en distintos tiempos…54

Figura 14. Grafica de resultados de turbidez con distintas dosis de moringa (M) en distintos tiempos……55

Figura 15. Grafica de resultados de absorbancia con distintas dosis de moringa (M) en distintos tiempos……55

Figura 16. Agua residual antes de suministrar las dosis de moringa……56

Figura 17. Resultado final de remoción de SST ……..56

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar expresando mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes hicieron posible que tuviera la fortuna de estudiar esta hermosa carrera. Ellos me inculcaron valores sólidos que han sido mi guía a lo largo de este camino. A mi padre José, le agradezco por enseñarme la importancia de la disciplina y por inculcarme el hábito de nunca rendirme, sin importar cuán difícil pareciera el desafío. A mi madre Lidia, agradezco profundamente por su conocimiento en Psicología, que me ayudó a mantenerme fuerte mentalmente ante cualquier obstáculo que se presentó en mi camino.

También quiero agradecer a mi hermano Juan, quien siempre estuvo ahí para levantarme el ánimo en los días más estresantes de la escuela. Sus chistes y anécdotas lograban transformar momentos de tensión en risas, recordándome la importancia de encontrar alegría incluso en los días más complicados.

Agradecida con los profesores que marcaron mi camino durante la carrera. Al profesor Jesús Estrada, por enseñarme a confiar en mí misma cuando dudaba de mi capacidad; al Dr. Luis Ángel Cabanillas, por demostrarme que puedo resolver problemas matemáticos con éxito. También agradezco a los profesores Rochín Medina e Ilianne Mendoza, quienes me inspiraron a tomar las riendas de mi propio camino, superar las dificultades y salir de mi zona de confort con seguridad y determinación.

Estoy eternamente agradecida con mi asesor el Doctor Leonel Ernesto Amábilis Sosa, que desde que gané en aquella feria con este proyecto recibí su apoyo, él se convirtió en un pilar fundamental en mi desarrollo académico y profesional. Su apoyo no solo me impulsó a explorar nuevas áreas dentro de mi carrera, sino que también me enseñó a comenzar desde cero con confianza y determinación. A pesar de los desafíos y la necesidad de estudiar y aprender temas complejos, siempre me brindó orientación precisa y alentadora. Su paciencia y

disposición para enseñarme, junto con su capacidad para guiarme por el camino correcto, fueron clave para que pudiera llevar a cabo este proyecto con éxito. Gracias a su acompañamiento, no solo logré alcanzar mis objetivos, sino que también descubrí el potencial que tengo para enfrentar retos y superarlos.

A mis queridas compañeras Karla Hernández, Paola Cecilia y mi grupito de amigos de mecatrónica (amigos desde la prepa) Alondra Cárdenas, Samantha Elizalde, Jorge Aru, Arturo M.y Faustino G., quiero dedicar un especial agradecimiento. Su compañía fue una constante a lo largo de mi carrera, convirtiéndose en un apoyo invaluable en cada etapa. Estuvieron a mi lado en los momentos más difíciles, cuando sentía que ya no podía continuar, dándome el ánimo necesario para seguir adelante. Pero también compartieron conmigo las alegrías y los triunfos, celebrando juntos cada paso que nos acercaba a un nuevo semestre. Su amistad y respaldo fueron un pilar fundamental en este camino, y por ello les estoy profundamente agradecida.

Asimismo, quiero expresar mi gratitud a todos los miembros del Laboratorio de Bioprocesos y Análisis Ambientales: Kassandra, Mayra, Mónica, Rommel y Manuel. Su orientación y aportes, desde sus propios conocimientos, fueron esenciales para la realización de este proyecto. Además, su buena compañía y disposición para colaborar hicieron de esta experiencia algo más enriquecedor y llevadero. A todos ellos, gracias por contribuir tanto en lo profesional como en lo personal, dejándome aprendizajes que siempre recordaré.

Para finalizar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento, de todo corazón, a mi novio, José Gerardo, quien ha sido un pilar fundamental en mi camino académico. Su apoyo moral ha sido invaluable para mí a lo largo de mi carrera. Con su inteligencia y paciencia, me ayudó a superar materias que en algún momento pensé que jamás lograría aprobar. Siempre supo mostrarme que también soy capaz de resolver problemas y me inspiró a confiar más en mis propias capacidades.

En los momentos difíciles, cuando las cosas no salían como esperaba, él siempre me ayudó a encontrar el lado positivo, transmitiéndome su optimismo y fortaleza. Gracias a la persona extraordinaria que es, tuve la certeza de que podía confiar plenamente en su guía y sus palabras. Agradezco profundamente que en cada proyecto que emprendí, él estuviera ahí, dispuesto a ayudarme en todo lo que necesitara. Su compañía y apoyo han sido una fuente de inspiración constante y una parte esencial de mis logros.

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de un subproducto agrícola líquido como lo son las aguas residuales, también conocido como riego con aguas residuales o riego con aguas residuales tratadas, es una práctica cada vez más común en muchas regiones debido a la escasez de agua dulce. Esta agua tratada proviene principalmente de los desagües domésticos, industriales, municipales. Además, en zonas con agricultura intensiva, proviene de la misma irrigación. No obstante, para poder reutilizar las aguas residuales, es importante garantizar la ausencia de sustancias que resulten perjudiciales para las prácticas agrícolas. Durante el tratamiento convencional de los efluentes residuales, es necesario remover el primer grupo de contaminantes que son los sólidos suspendidos totales (SST). Por sus propiedades intensivas, los tratamientos de SST se basan en la sedimentación asistida con floculantes y/o coagulantes. Estas sustancias químicas están constituidas por iones metálicos que implican dificultades operativas, tales como el manejo de lodos considerados residuos de manejo especial o peligrosos, un aumento de la corrosividad del agua tratada, subproductos residuales y también hay que mencionar que las sales metálicas son ácidas y a veces requieren una amortiguación adicional de agua durante el proceso de coagulación **(Dayarathne et , 2021).**

Los coagulantes orgánicos, basados en plantas, animales, microorganismos, polímeros orgánicos y polielectrolitos, presentan ventajas como ausencia de metales en el medio acuoso, además de no modificar negativamente los parámetros de pH y conductividad. **(Martínez Ballen, 2023).** Sin embargo, actualmente sólo se utilizan los coagulantes basados en sales de hierro y aluminio por la estandarización y efectividad

que presentan. Sin embargo, factores como el costo alto y el almacenamiento, deben considerarse adicionalmente a la simple optimización de la eficiencia de eliminación.

Considerando la gestión de la calidad y cantidad de agua en Sinaloa, una importante consideración del proyecto es el reúso del agua residual agrícola utilizando la semilla de moringa como coagulante natural, estableciendo la dosis óptima del pulverizado de la semilla para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) generando un producto accesible económicamente para el l área agrícola. Así, el presente proyecto tiene como objetivo principal, contribuir a dar una solución sostenible, con énfasis en química verde, para el reúso de aguas residuales.

1.2 ANTECEDENTES

1.3 Importancia del agua en México

El agua de ríos, lagos y depósitos subterráneos es fundamental para las necesidades humanas, pero sólo una pequeña parte de esta se encuentra en lugares accesibles para su uso.

A nivel nacional, solo el 58% de la población tiene acceso diario al agua en su hogar y a un saneamiento adecuado. Guerrero es el estado con la peor situación, con apenas un 10% de cobertura, mientras que Nuevo León alcanza el 95%. En las zonas urbanas, el acceso llega al 64%, pero en las rurales baja al 39%. Además, 14 estados presentan un alto rezago, con porcentajes de población con agua diaria y saneamiento que varían entre el 10% y el 50%.

El aumento en la extracción de agua de cuencas y acuíferos ha incrementado la presión sobre el recurso, especialmente en el centro y norte del país, donde alcanza el 55% y sigue en ascenso. Aunque las hidroeléctricas usan grandes volúmenes de agua para generar el 12% de la energía eléctrica, este uso no implica consumo, pero limita su disponibilidad para otros sectores.

Del total de agua extraída, el 61% corresponde a fuentes superficiales, mientras que el 39% proviene de acuíferos. El sector agrícola representa el 76% del consumo, seguido por el abastecimiento público con un 14%, y la industria junto a las termoeléctricas con un 5% cada una. Cabe destacar que tanto el sector agrícola como el urbano registran pérdidas de aproximadamente la mitad del volumen extraído, lo cual evidencia la necesidad de implementar medidas para optimizar el uso del recurso hídrico.

Las regiones con mayor presión hídrica incluyen el Valle de México (141%) y otras con niveles altos como Baja California (81%), Noroeste (85%) y Río Bravo (75%), mientras que zonas como la Península de Yucatán tienen baja presión. A pesar de que las tasas de extracción de agua han dejado de incrementarse como ocurrió en el siglo XX, la demanda urbana continúa en ascenso. Se proyecta que, en las próximas dos décadas, la diferencia entre oferta y demanda alcanzará los 23 mil millones de metros cúbicos. **(CONAGUA 2020).**

El estado de Sinaloa, ubicado en la región noroeste de México entre la Sierra Madre Occidental y el Océano Pacífico, cuenta con un sistema de abastecimiento

de agua basado principalmente en tres cuencas: Río Culiacán (66.50%), Río San Lorenzo (28.05%) y río Mocorito (0.80%). Estas cuencas se subdividen en ocho subcuencas principales, destacando el río Culiacán (29.77%), el río Tamazula (23.17%) y el Arroyo de Tacuichamona (17%). En la tabla 1 se presenta el almacenamiento correspondiente a cada presa.

Las cuencas hidrológicas forman parte de regiones hidrológicas mayores, que a su vez están integradas en regiones hidrológico-administrativas. Estas regiones se definen por características geográficas como la forma del terreno, la distribución de ríos y arroyos, y las condiciones hidrológicas. En este contexto, las cuencas se consideran la unidad básica para gestionar los recursos hídricos. Esto permite organizar y analizar información relacionada con la cantidad y calidad del agua, además de planificar su uso, aprovechamiento y conservación. **(Figueroa Elenes et al., 2023)**

En el municipio y la ciudad de Culiacán, el aumento en la demanda de recursos hídricos se refleja en el crecimiento de las colonias, la infraestructura y la extensión de la mancha urbana. Según el Instituto Municipal de Planeación de Culiacán **(IMPLAN),** en la década de los setenta, la ciudad contaba con 63 colonias, pero en años recientes esa cifra ha superado las 500.

Paralelamente, la mancha urbana creció en 2020, superando 1 millón 3 mil 500 habitantes, **(INEGI, 2020).** La densidad poblacional es de 183 mil 43 habitantes por kilómetro cuadrado y, con un total de 281 mil 567, es hoy en día el municipio con el mayor número de viviendas durante las cuales se han formado 403 nuevas

colonias, en comparación con las 107 que surgieron en los 124 años previos. El INEGI considera este incremento como una expansión extraordinaria en el desarrollo urbano de la ciudad.

Tabla 1. Datos de volúmenes almacenados en presas del estado de Sinaloa 2024-2025. Modificado de (CONAGUA 2025).

Presa	Municipio	Capacidad de almacenamiento	2019	2020	2024	Almacenamiento		
						Diferencia (2019-2024)	2024 respecto a 2020 (%)	2024 con respecto a capacidad (%)
Adolfo López mateos	Badiraguato	3086.6	1240.0	1240.0	301.8	-938.2	24.3	9.7
Gustavo Díaz Ordaz	Sinaloa	1618.8	808.6	652.5	401.3	-407.3	49.6	24.7
Ing. Aurelio Besani Vizcaíno	Elota	403.9	232.3	224.3	146.3	-86	62.9	36.2
Ing. Guillermo Blake Aguilar	Sinaloa	294.6	110.3	112.4	65.7	-44.6	59.5	22.3
Josefa Ortiz de Domínguez	El fuerte	519.3	451.1	318.3	148.9	-302.2	33.0	28.6
José López Portillo	Cosalá	2580.2	1208.8	958.2	359.9	-848.9	79.7	13.9
Juan Guerrero Alcocer	Culiacán	54.7	18.7	17.3	7.0	-11.7	37.4	12.7
Enstalqui Buelna	Salvador Alvarado	80.1	69.4	36.5	20.5	-48.9	29.5	25.5
Luis Donaldo Colosio	Choix	3208.0	2382.4	926.4	82.2	-2300.2	3.4	2.5
Miguel Hidalgo	El fuerte	3212.9	1676.5	1360.3	546.6	-1129.9	32.6	17
Sanalona	Culiacán	688.0	408.8	492.8	235.3	-173.5	57.5	34.2

Las actividades humanas han producido un impacto ambiental considerable, evidenciado por problemas como la escasez del recurso, pérdida de cobertura vegetal, el cambio climático, la disminución de la biodiversidad y la extinción de especies. No solo se observa una crisis en la disponibilidad del agua; todos los

recursos naturales presentan afectaciones significativas.

En Culiacán, la cobertura de saneamiento alcanza el 100%, ya que toda el agua tratada por las plantas potabilizadoras del municipio es procesada. Además, el servicio de redes de alcantarillado cubre el 98.2% de la población.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tratamiento de aguas residuales resulta fundamental para garantizar el suministro de los recursos hídricos de calidad, especialmente en regiones de Sinaloa con acceso limitado a tecnologías avanzadas. Actualmente, los coagulantes sintéticos, como el Policloruro de Aluminio (PAC), son ampliamente utilizados debido a su alta eficiencia, pero generan preocupaciones ambientales y de salud, relacionadas con la producción de residuos tóxicos, además de sus altos costos económicos.

En este contexto, surge la necesidad de investigar alternativas sostenibles y de bajo impacto ambiental que puedan igualar o superar la eficiencia de los coagulantes químicos. La *Moringa oleífera*, una planta de origen natural con propiedades coagulantes comprobadas, presenta un gran potencial para sustituir parcial o completamente a los coagulantes sintéticos. Sin embargo, existe un vacío en la optimización de su uso, como la determinación de su dosis óptima y la comparación directa de su efectividad frente a coagulantes industriales como el PAC.

Por lo tanto, es relevante evaluar si la moringa y/o sus derivados puede ser una solución eficiente y ambientalmente responsable para el tratamiento de aguas residuales, considerando su impacto en parámetros como la remoción de turbidez y sólidos suspendidos, así como su viabilidad económica y técnica en diferentes condiciones.

1.5 HIPÓTESIS

El diseño adecuado, la correcta implementación y la optimización en la aplicación de dosis de semilla de moringa resultan esenciales en el ámbito del alcanzar eficacia en la remoción de partículas suspendidas (sólidos suspendidos totales y, por ende, turbidez), ajuste del pH y reducción de la absorbancia en efluentes residuales municipales, incluso cuando se aplican tratamientos mínimos.

La optimización de la dosis puede obtenerse mediante ensayos experimentales sistemáticos, empleando un diseño factorial que contemple los principales parámetros hidráulicos involucrados.

1.6 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la efectividad de la semilla de moringa como biocoagulante en el tratamiento de aguas, con el fin de reducir la turbidez y mejorar las características del agua agrícola, contribuyendo una alternativa sostenible y económica en las regiones de Sinaloa.

1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la factibilidad técnica del uso de moringa como coagulante orgánico en el tratamiento de aguas residuales.

- Evaluar la eficiencia de la coagulación/floculación del policloruro de aluminio a diferentes dosis frente al coagulante orgánico.

- Determinar la dosis óptima de semilla de moringa para maximizar la reducción de material suspendido presentes en las muestras acuosas.

1.8 JUSTIFICACIÓN

A nivel nacional, se genera un caudal de 229.5 m^3/s de agua residual municipal y 214.6 m^3/s de agua residual industrial. De esos volúmenes, sólo 18 m^3/s (4.05%) cuentan con un tratamiento para su reúso. Es específico para la agricultura, se utilizan 568 millones de metros cúbicos para la irrigación. A pesar de la que la OMS ha declarado al agua residual como fuente de agua dulce (con sus respectivos tratamientos), en México, los datos de reúso del agua indican que el volumen reutilizado es mínimo y/o no cuenta con las características necesarias para fines de inocuidad en la agricultura.

Aunque el reúso no sea una práctica común en México, a nivel nacional existen cerca de 2,000 plantas de tratamiento, de las cuales el 40% cuenta con sistemas mecanizados de coagulación/floculación. Para ello, el uso continuo de coagulantes químicos que suelen ser costosos y pueden tener impactos ambientales negativos.

Por otra parte, la moringa es una planta accesible y sostenible lo que la convierte en una opción económica y ecológica frente a la inadecuada gestión de la calidad y cantidad del agua. El uso de la semilla de moringa también reduce la dependencia de productos químicos sintéticos promoviendo prácticas de tratamiento de agua más naturales y seguras.

El proceso propuesto ayudará a reutilizar aguas residuales para el riego agrícola sin tener consecuencias para la salud de los consumidores y de los trabajadores agrícolas. Asimismo, dicha alternativa coadyuva a evitar la contaminación de suelos por metales pesados por coagulantes sintéticos y reducción costos de operación. Ante lo comentado anteriormente, el uso de coagulantes y floculantes es necesario para el correcto tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, estos son del tipo sintético y mayoritariamente compuestos por metales pesados tales como aluminio y hierro que finalmente tienen un impacto negativo en el ambiente por ello la necesidad de buscar conocer y explorar opciones más amigables para el medio ambiente la tal cual la semilla de moringa.

1.9 ALCANCE

El presente proyecto se circunscribe a evaluar las eficiencias de coagulación y sedimentación de diferentes dosis de Moringa aplicadas a agua residual. Se consideran diferentes dosis de Policloruro de Aluminio como referencia, por lo que también se incluyen comparaciones estadísticas. Para lo anterior las pruebas fueron realizadas a escala de laboratorio con prototipos que permitan etapas futuras de la investigación.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

2.2 Aguas residuales

Desde los últimos 25 años, el problema de las aguas residuales se hace más presente tanto es escasez como en deterioro de los ecosistemas. Según **Yee-Batista (2013),** el 80% de la población en América Latina vive en ciudades, muchas veces en asentamientos cercanos a fuentes de agua contaminadas. Aunque esta región se caracteriza por sus recursos naturales, su biodiversidades magnánime y y por poseer arriba del 30% de las fuentes de agua globales, su alto grado de contaminación hídrica genera graves consecuencias ecológicas. En efecto, el 70% de las aguas residuales en América Latina no recibe tratamiento, lo que implica que el agua extraída y utilizada se devuelve contaminada a los ríos. Tratar las aguas residuales es crucial para reutilizar este recurso, prevenir la contaminación ambiental (particularmente por su impacto en la producción agropecuaria) y proteger la salud pública. **(Batista,2013).**

En las ciudades, las aguas residuales provienen de diversas fuentes, como el uso doméstico, industrial y agrícola. Esto hace necesaria la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en entornos urbanos, para garantizar un manejo adecuado de este recurso y prevenir riesgos para la salud y el medio ambiente.

2.2.1Tratamiento de aguas residuales

La instalación de sistemas de agua y saneamiento es clave para el bienestar social, especialmente en países desarrollados. El agua residual urbana debe tratarse antes de regresar al entorno, evitando daños ambientales. En décadas recientes, ha aumentado la preocupación por los desechos líquidos domésticos, comerciales e industriales, ya que muchas veces los cuerpos receptores no pueden neutralizar la contaminación. Por eso, es esencial tratar las aguas residuales antes de su descarga.

El tratamiento de aguas residuales busca transformar el agua usada en un efluente que cumpla con los estándares ambientales, estéticos, organolépticos y de salud pública, además de gestionar adecuadamente los lodos generados. Un clásico tren de proceso de tratamiento de las aguas residuales se muestra en la Figura 1, Asimismo, en las subsecciones siguientes se detalla acerca de cada una de las etapas de dicho tratamiento.

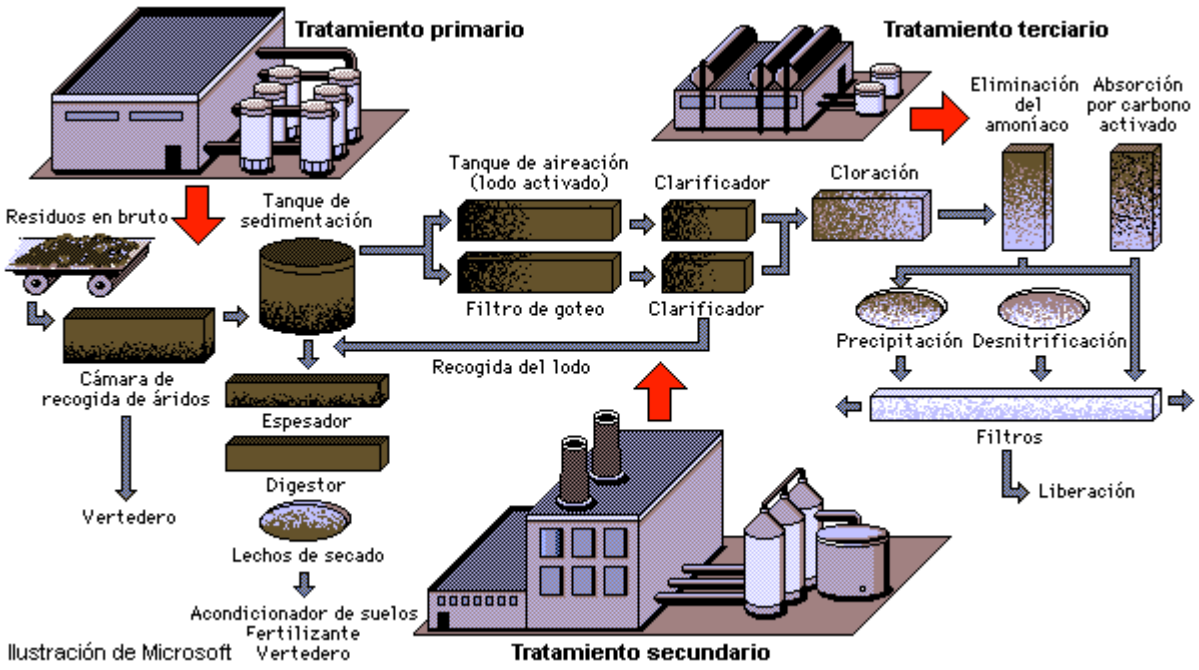


Figura 1. Diagrama y etapas de un proceso (tren de tratamiento) de aguas residuales, implementado convencionalmente para las aguas residuales municipales. Tomado de Henry-Instituto del agua (2025).

2.2.2 Tratamiento preliminar

El tratamiento preliminar tiene como finalidad se orienta a la preparación y acondicionamiento de las aguas residuales, con el propósito específico de salvaguardar los equipos y maquinarias (principalmente conducción hidráulica) para que las unidades de tratamiento posteriores puedan funcionar sin desgaste significativo. La Tabla 2 muestra la clasificación de “impurezas” eliminadas mediante el pretratamiento.

Tabla 2. Objetivo del proceso de pretratamiento. Modificado de Henry-Instituto del agua (2025).

Operación unitaria o mecanismos	Sustancia u objeto e eliminar
Cribado o rejillas	Eliminación de sólidos de gran tamaño
Fragmentación por trituración	Fraccionado de sólidos gruesos
Gravedad para arenas (desarenador)	Remoción de gravas y otras de construcción
Gravedad para grasas	Separación de fases con las grasas y agua
Aireación básica	Mejoramiento del comportamiento hidráulico y organoléptico

2.2.3 Tratamiento Primario

La etapa inicial del tratamiento se orienta a la remoción física o mecánica de una proporción significativa del material sedimentable o flotante. El tratamiento primario permite separar no solo los elementos que resultan indeseables, sino también una parte relevante de la carga orgánica, que puede representar entre el 25% y el 40% de la DBO y entre el 50% y el 65% de los sólidos suspendidos. Dentro de los procesos de tratamiento primario se incluyen la coagulación-floculación, la sedimentación y la filtración, cuya definición se presenta en las siguientes subsecciones.

2.2.4 Coagulación-floculación

Las impurezas del agua varían en tamaño y aproximadamente en seis ordenes de magnitud. Durante la sedimentación, muchas impurezas presentan un tamaño demasiado reducido para que su eliminación mediante procesos gravitacionales sea eficiente. Por ello, es necesario promover la agregación de estas

partículas en conglomerados de mayor tamaño y facilidad de decantación, con el objetivo de optimizar la separación por sedimentación. Este proceso de agregación se denomina coagulación. Los parámetros que mejoran al aplicar coagulación es la turbidez y el color del agua.

La agregación de partículas coloidales podemos considerar que implica dos etapas separadas y distintas: 1- transporte activo de partículas para el contacto Inter corpuscular y 2- La alteración de cargas iónicas para desestabilizar a las partículas y puedan generar flóculos al entrar en contacto.

La coagulación y floculación se aplica el proceso global de agregación de desestabilización y el transporte de partículas **(Figura 2).** El término floculación se usará sólo para describir las etapas de transporte. Las partículas coloidales pueden desarrollar una carga eléctrica por varios caminos. La mayor parte de coloidal de las aguas desarrollan cargas primarias negativas. El efecto del pH es directamente sobre el l signo y la magnitud de la mencionada carga primaria. De la misma forma se tiene el efecto sobre el contenido iónico de la fase acuosa. Una dispersión coloidal no tiene una carga eléctrica neta, por tanto, la carga primaria de las partículas debe equilibrarse en la solución acuosa. Con un resultado, existe una doble capa eléctrica increada interfaz entre un sólido y el agua **(figura 2).**

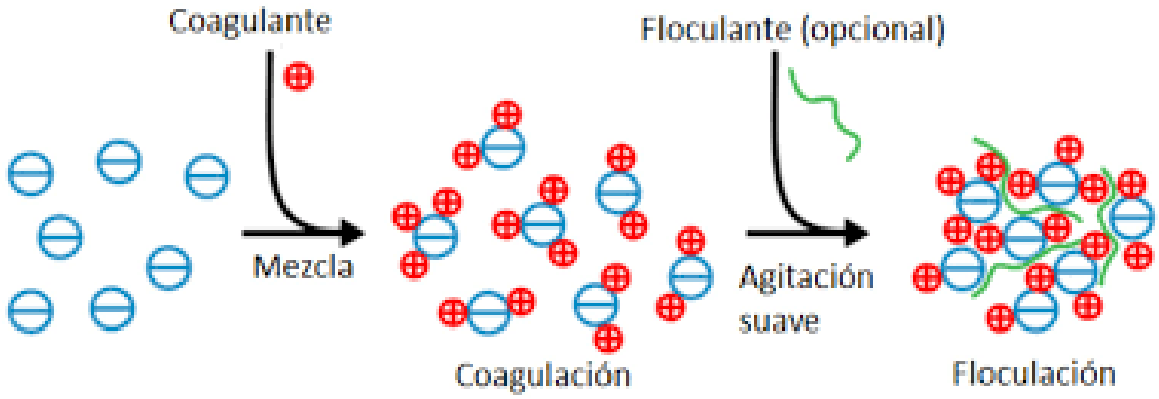


Figura 2. Procesos de coagulación- floculación. Tomado de Metalco (2021).

2.2.5 Floculación

Es un proceso físico en la potabilización del agua donde se genera la agregación o crecimiento de las partículas finamente divididas y coloidales previamente desestabilizadas en el proceso de coagulación con el fin de poder separarlas del agua en procesos anteriores de sedimentación y filtración. En la floculación el efecto de transporte de masa de agua da como resultado colisiones entre las partículas desestabilizadas generándose la formación de grumos.

2.2.6 Metales pesados

Actualmente, los coagulantes más empleados en el tratamiento de aguas son compuestos inorgánicos de aluminio o hierro, como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso y los sulfatos y cloruros férricos; estos corresponden a metales pesados. No obstante, dichos compuestos pueden ser transportados junto con los lodos sedimentados, ya que forman parte de su composición, alterando los procesos naturales presentes en las fuentes de agua receptoras. Esta situación representa un problema ambiental dado que, en concentraciones elevadas, estas sustancias pueden resultar tóxicas.

Sedimentación

La sedimentación constituye una operación de separación sólido-líquido en la cual las partículas sólidas presentes en una suspensión, con densidad superior a la del fluido, se separan de este último debido a la acción de la gravedad. Esta operación está regida por los principios de transferencia de cantidad de movimiento **(Luis, 2005).**

En situaciones donde existen fuerzas de interacción entre partículas de tamaño reducido (suspensiones coloidales), la sedimentación natural resulta inviable, lo que requiere previamente procesos como la floculación o coagulación.

Para su aplicación práctica, es fundamental que el tamaño de las partículas y su concentración en la suspensión superen ciertos valores mínimos, aproximadamente de 1 a 10 micras en diámetro y un 0,2% de sólidos suspendidos (Eulogio, 2024.)

El objetivo principal de la sedimentación es, en realidad, una separación de las fases sólidas y líquidas. separar las partículas sólidas dispersas en el líquido. La diferencia de densidades ocasiona que, incluso si el líquido presenta flujo ascendente, las partículas sólidas tienden a sedimentar hasta depositarse en el fondo, desde donde pueden retirarse en forma de lodos. La viscosidad del medio líquido ofrece resistencia al desplazamiento de las partículas, quienes deben superar esta fricción durante su caída.

Durante el proceso, las partículas transfieren parte de su cantidad de movimiento a las moléculas del líquido circundante. El incremento en la viscosidad incrementa la resistencia al avance de las partículas. Las moléculas del líquido, tras ser aceleradas por el contacto con el sólido, transmiten ese movimiento a capas adyacentes mediante interacciones intermoleculares, reflejadas en el valor de la

viscosidad. Por tanto, la sedimentación está condicionada por el transporte de cantidad de movimiento.

2.2.7 Filtrado

La filtración es un proceso que permite separar partículas inorgánicas y pequeñas cantidades de microorganismos, como bacterias y virus, utilizando un medio poroso. Este proceso es clave para garantizar que el agua cumpla con los estándares de calidad requeridos para ser potable, logrando una eficiencia de remoción bacteriológica superior al 99% **(Jorge A., 2024).**

El tamaño de las partículas que quedan atrapadas en el lecho filtrante varía, desde flóculos de 1 mm hasta coloides, bacterias y virus de tamaños menores a 0.001 mm. Si el flóculo es más grande que los poros del lecho, queda retenido mecánicamente en los espacios del filtro. En cambio, las bacterias, aunque son mucho más pequeñas que los poros, son removidas por otros fenómenos físicos y químicos que ocurren durante el proceso.

La filtración incluye varias etapas complementarias que trabajan juntas para lograr una mayor eficiencia.

Durante la filtración, se desarrollan las siguientes etapas complementarias:

- **Transporte de partículas en los intersticios:** Este proceso físico e hidráulico depende de parámetros asociados a la transferencia de masa. Entre los mecanismos implicados destacan el cernido, la sedimentación, la intercepción, la

difusión, el impacto inercial y la acción hidrodinámica.

- **Adherencia a la superficie rugosa del medio filtrante:** Se trata de un fenómeno superficial regulado por factores físicos y químicos. Los principales mecanismos que favorecen la adherencia incluyen las fuerzas de Van der Waals, las fuerzas electroquímicas y los puentes químicos.

Clasificación de las unidades de filtración:

- Lecho filtrante: Puede ser simple (arena o antracita) o doble/múltiple.

- Sentido del flujo: descendente, ascendente o combinado ascendente-descendente.

- Modalidad de aplicación de la carga hidráulica: por gravedad o mediante presión.

- Control operacional: tasa constante con nivel variable, tasa constante con nivel constante, o tasa decreciente.

Factores que influyen sobre la filtración:

Características de la suspensión: Se consideran el tipo, tamaño, densidad

y dureza de las partículas suspendidas (flóculos), así como la temperatura del agua y la concentración de sólidos presentes en el influente.

Características del medio filtrante: Incluyen el tipo de material utilizado, su granulometría, peso específico y el espesor del lecho filtrante.

Características hidráulicas: Comprenden la velocidad de filtración, la carga hidráulica disponible, el sistema de control del filtro y la calidad del agua tratada obtenida.

Con el tiempo, las partículas quedan atrapadas en el medio filtrante hasta obstruir el flujo, lo que requiere lavar el filtro periódicamente. El agua filtrada debe cumplir con estándares de calidad, como una turbiedad no mayor a 1 NTU y un color inferior a 5 UCV **(Cristina, Camacho, 2011).**

2.2.8 Tratamiento de Lodos o biosólidos

Los metales pesados están estrechamente relacionados con los lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales, ya que pueden estar presentes en el agua de entrada y terminar concentrándose en estos subproductos. La acumulación de metales pesados en los lodos ocurre porque muchos de estos elementos se adhieren a las partículas sólidas durante las etapas de tratamiento, especialmente en la sedimentación primaria y en los procesos biológicos secundarios.

Durante la sedimentación primaria, los metales pesados que están ligados a partículas sedimentables o coloidales se precipitan y forman parte del lodo primario.

Cuando se usan productos químicos para mejorar la sedimentación (por ejemplo, coagulantes o floculantes), también puede aumentar la cantidad de metales pesados atrapados en el lodo debido a la interacción química con estos aditivos**.**

En los procesos biológicos, algunos metales pesados pueden ser absorbidos por los microorganismos que forman la biomasa, quedando incorporados en los lodos secundarios.

Además, las partículas que no se sedimentaron en la etapa primaria pueden contener metales pesados y ser removidas en esta etapa, aumentando la concentración de estos contaminantes en los lodos secundarios.

Con base en lo anterior, es posible identificar tres grandes problemáticas relacionadas con el tratamiento de los lodos provenientes de los procesos de sedimentación, la primera de ellas se relaciona con:

Toxicidad de los lodos: La presencia de metales pesados en los lodos puede limitar su uso, por ejemplo, en aplicaciones agrícolas, debido a los riesgos de toxicidad para las plantas, los animales y los humanos.

Gestión y disposición: Los lodos que contienen altos niveles de metales pesados requieren tratamientos adicionales o disposiciones específicas, como confinamientos controlados o incineración, para evitar la contaminación del suelo o las aguas subterráneas.

Normatividad: En México, las normativas establecen límites para la concentración de metales pesados en los lodos cuando se busca su disposición o reutilización. Por ejemplo, la **NOM-004-SEMARNAT-2002** regula el uso de lodos en suelos y fija límites para metales como plomo, cadmio y mercurio.

2.3 Potencial de la *Moringa oleífera* como agente biotecnológico

La *Moringa oleífera* es la especie más conocida del género *Moringa*. Este árbol, originario del sur del Himalaya y regiones como el noreste de la India, Bangladesh, Afganistán y Pakistán, se ha extendido ampliamente por el mundo, incluyendo América Central. Es conocido con diversos nombres comunes, como palo jeringa, acacia o jazmín francés, dependiendo de la región.

Este texto aborda varios aspectos clave de esta especie, incluyendo su origen, distribución, manejo agronómico, producción de biomasa, composición química y usos diversos. Destaca por su capacidad para adaptarse a distintas condiciones de suelo y clima, lo que la convierte en una opción valiosa para la alimentación, especialmente en países tropicales.

Con base en lo anterior, M. *oleífera* tiene una gran flexibilidad ecológica, lo que la hace apta para diversos entornos. Su alto valor nutricional y capacidad para generar rendimientos significativos de biomasa la convierten en un recurso importante en sistemas de producción. Además, tiene múltiples aplicaciones prácticas: puede usarse como cerca viva, cortina rompevientos, abono verde y en la producción de etanol y goma, entre otros usos. Por estas razones, es una planta especialmente interesante para el trópico, donde puede aportar soluciones sostenibles tanto en la agricultura como en la industria.

2.3.1 Estructura fisiológica

La *Moringa oleífera* es un árbol perenne de corta vida, con una expectativa máxima de alrededor de 20 años. Sin embargo, en India se han desarrollado variedades de ciclo anual. Es una especie que se caracteriza por su rápido crecimiento, lo que la hace ideal para diversas aplicaciones agroecológicas.

Además de su capacidad para crecer rápidamente, este árbol contribuye de manera significativa al enriquecimiento del suelo al aportar una gran cantidad de nutrientes. También actúa como protector del suelo frente a factores externos como la erosión, la desecación y las altas temperaturas, convirtiéndolo en un recurso valioso para la mejora y conservación de ecosistemas agrícolas y naturales.

En su hábitat natural crece hasta los 1 400 m de altitud, a lo largo de los ríos más grandes en suelos aluvionales arenosos o guijosos.

la moringa es resistente a la sequía y tolera una precipitación anual de 500 a 1 500 mm. Además, crece en un rango de pH de suelo entre 4,5 y 8, excepto en arcillas pesadas, y prefiere suelos neutros o ligeramente ácidos. En Centroamérica, la *Moringa oleífera* se encuentra en zonas con temperaturas que oscilan entre 6 y 38 °C. Aunque es resistente al frío durante periodos breves, no tolera temperaturas inferiores a 2-3 °C. Cuando las temperaturas caen por debajo de 14 °C, la moringa no florece y solo puede reproducirse mediante estacas. Se adapta a altitudes desde el nivel del mar hasta los 1,800 msnm y a una amplia variedad de suelos. **(Falasa,2008).**

En su hábitat natural, las temperaturas anuales muestran grandes fluctuaciones, soportando entre -1 °C y 3 °C en los meses más fríos, y alcanzando entre 38 °C y 48 °C en los meses más cálidos.

Esto refleja su notable plasticidad ecológica, lo que le permite prosperar en diversas condiciones de suelo, precipitación y temperatura**. (Troup,1921).**

Según los informes del Proyecto de Investigación BIOMASA (2000) en Nicaragua, la moringa puede cultivarse de manera intensiva. A este nivel de producción, los requisitos anuales de nutrientes por hectárea incluyen: 1.8 kg de calcio, 0.5 kg de cobre, 1.4 kg de magnesio, 380 kg de fósforo, 0.6 kg de boro, 280 kg de nitrógeno y 0.3 kg de zinc, en la tabla 3 se muestra más información. Es importante señalar que estos requerimientos pueden variar según las condiciones

del suelo en otras localidades, lo que influirá en la cantidad de fertilizantes necesarios.

La capacidad de adaptarse a estas fluctuaciones extremas de temperatura y la posibilidad de un cultivo intensivo hacen de la moringa un recurso valioso para proyectos de sostenibilidad agrícola. Su versatilidad y demanda moderada de nutrientes la convierten en una opción accesible para mejorar la seguridad alimentaria y la recuperación de suelos degradados en distintas regiones**. (Price,2000).**

Tabla 3. Composición nutrimental de la *Moringa Oleífera.* Tomado de Price (2000).

Extracción de nutrientes (kg)									
Productividad Kg	**Ca**	**P**	**Mg**	**K**	**Na**	**Cu**	**Zn**	**Mn**	**Fe**
130	1612	338	429	1924	24.7	0.68	3.1	4.6	45.7
100	1240	260	330	1480	19.0	0.53	2.4	3.5	35.2
80	992	208	264	1184	15.2	0.42	1.9	2.8	28.1
60	744	156	198	888	11.4	0.31	1.4	2.1	21.1
40	496	104	132	592	7.6	0.21	0.9	1.4	14.0

2.3.2 Propiedades químicas de la *Moringa oleífera*

La moringa es conocida por su composición química diversa, que incluye una amplia gama de compuestos bioactivos con propiedades benéficas tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Entre los principales componentes

químicos se encuentran las proteínas y aminoácidos. La moringa contiene proteínas con alto valor biológico, incluyendo aminoácidos esenciales como leucina, valina y lisina. Sus semillas poseen proteínas catiónicas que actúan como coagulantes naturales en el tratamiento de agua.

Además de los componentes nitrogenados, la Moringa se caracteriza por su gran contenido de compuestos bioactivos.

La *Moringa oleífera* es una planta con una composición química y bioquímica excepcional que le confiere múltiples propiedades beneficiosas, entre sus componentes destacan antioxidantes potentes como la quercetina y el kaempferol, los cuales desempeñan un papel fundamental en la reducción del estrés oxidativo, además contiene taninos que contribuyen a su capacidad antimicrobiana y antioxidante, así como glucosinolatos e isotiocianatos con propiedades antibacterianas y anticancerígenas, además de ácidos fenólicos como el ácido ferúlico y el ácido cafeico, que refuerzan sus efectos antioxidantes.

En cuanto a los minerales esenciales, la moringa es una fuente significativa de calcio, potasio, hierro, magnesio, zinc y fósforo, lo que la hace útil como suplemento nutricional y mejorador de suelos, además de ser rica en vitamina C, vitamina A en forma de carotenoides, vitaminas del complejo B y vitamina E, lo que complementa su alto valor nutricional.

Las semillas de moringa contienen entre un 35% y 40% de aceite, predominantemente ácido oleico, similar al aceite de oliva, este aceite posee propiedades antioxidantes y aplicaciones cosméticas, además, la moringa contiene fibras solubles e insolubles, lo que favorece su uso en aplicaciones alimenticias y en la mejora del suelo, presentando también carbohidratos complejos que pueden actuar como agentes espesantes naturales.

El crecimiento de la moringa se divide en varias etapas, comenzando con la germinación, la cual tiene una duración de 7 a 12 días bajo condiciones óptimas con temperaturas entre 20 y 30 °C, es rápida y eficiente en suelos bien drenados, además, las semillas mantienen su viabilidad por meses si se almacenan adecuadamente, seguida de la etapa vegetativa, que dura de 2 a 4 meses después de la germinación, con un crecimiento extremadamente rápido que puede alcanzar hasta 4 metros en el primer año, requiriendo alta exposición solar y riego moderado, aunque se adapta a suelos pobres, responde favorablemente a fertilizantes orgánicos **(ADNAgro,2016).**

Posteriormente ocurre la floración, que sucede entre los 6 y 8 meses después de la siembra, dependiendo de la temperatura superior a 14 °C, en esta etapa produce flores blancas fragantes, polinizadas principalmente por insectos, seguida por la producción de frutos en forma de vainas, la cual inicia en el primer año y puede prolongarse durante toda la vida del árbol bajo condiciones adecuadas, cada vaina contiene entre 12 y 35 semillas, llegando finalmente a la madurez y longevidad, donde aunque es una planta perenne, su vida útil promedio es de 15 a 20 años, aunque en India se han desarrollado variedades anuales **(ADNAgro,(2016).**

La moringa es altamente adaptable y resiliente, desarrollándose en diversas condiciones climáticas y de suelo, incluidos suelos pobres y zonas áridas, siendo resistente a la sequía, aunque sensible a heladas prolongadas, además, tolera podas severas y rebrotando rápidamente, lo que la hace ideal para forraje, cercas vivas y cortinas rompevientos, mejorando la estructura del suelo y previniendo la erosión, ya que su sistema radicular profundo permite la captación de nutrientes de capas inferiores **(Guillermo,2017).**

La moringa es resistente a muchas plagas gracias a la presencia de glucosinolatos, aunque puede ser afectada por insectos como el barrenador del tallo en condiciones desfavorables, además puede propagarse por semilla o estacas, siendo la reproducción por semilla más común en su hábitat natural, mientras que las estacas se emplean en climas fríos o para cultivos intensivos.

Más allá de los beneficios nutricionales y agrícolas, la moringa desempeña un papel crucial en la sostenibilidad ambiental, ya que su capacidad para enriquecer suelos, tratar aguas ya que se sugiere que los grupos funcionales en la cadena lateral de aminoácidos básicos (arginina, lisina e histidina) contribuyen a la actividad de coagulación del agua **(Adewole,2020).** y es buena resistiendo condiciones extremas la convierte en un recurso estratégico frente a desafíos globales como la inseguridad alimentaria, la degradación de suelos y la escasez de agua.

2.3.4 Estado del Arte sobre el Potencial de la semilla de moringa

Se ha tratado de aplicar la semilla de moringa oleífera mediante filtros. En la comunidad de Pichiyacu de los Cayapas, ubicado en el Ecuador, se implementó un filtro lento ascendente de varias capas, donde una de ellas es una capa biológica adicionada con moringa. Posteriormente, se contenía arena, piedra de chispa y grava. La eficiencia fue de 87.63% en coagulación de residuos, además que actúo como desinfectante y elimino coliformes fecales presentados en el agua cruda hasta un 100% **(Rodríguez Santo, 2016).**

Mera Alegría et al., (2016), evaluaron el efecto del polvo de la semilla de moringa como un coagulante en el tratamiento de aguas residuales, donde además se utilizaron aguas resultantes del proceso de beneficio en café con turbidez mayor

a 2000 NTU y aguas provenientes del pelado químico de vegétales con 91.5 NTU. La dosis apropiada de polvo de semilla de moringa (*Moringa oleífera*) para aguas residuales del proceso de beneficio de café fue de 4 g/600 ml y para aguas resultantes del pelado químico de vegetales fue de 150 mg/600 mL. Los autores identificaron que, a diferencia con el sulfato de aluminio, la moringa oleífera no perjudica al ecosistema, y es más eficiente para algunos parámetros de calidad sin sacrificar la eficiencia de remoción de SST. El polvo de semilla de moringa resultó eficaz en el tratamiento de aguas residuales del beneficio del café, mejorando parámetros físicos, químicos y microbiológicos en un 80.9%, en comparación con el sulfato de aluminio que mejoró en un 73.56%. De manera similar, el polvo de semilla de moringa mejoró esos mismos parámetros fisicoquímicos durante el tratamiento de aguas residuales del pelado químico de vegetales, en un 66.75% mientras que con sulfato de aluminio lo hace en un 63.5%.

El polvo de semilla de moringa se evaluó como coagulante orgánico para remover la turbiedad del agua potable **(Turcio Flores, 2017).** Se indujo turbiedad con arcilla caolín y se determinó la dosis óptima de sulfato de aluminio y moringa mediante 15 pruebas de jarras. Sin embargo, la turbiedad no alcanzó el límite máximo permisible de 15 UNT (COGUANOR NGO 29001) tras una hora de sedimentación.

El sulfato de aluminio resultó 4.24 veces más eficiente que la moringa en la remoción de turbidez con 15 minutos de sedimentación. Además, en aguas con turbiedad artificial, las partículas de caolín sedimentan naturalmente con el tiempo.

Estos estudios sugieren la viabilidad del polvo de moringa para mejorar la calidad del agua, especialmente en la reducción de SST. En regiones con alta actividad agropecuaria, como Sinaloa, se requieren alternativas para el tratamiento de aguas residuales. La moringa, poco utilizada para consumo humano, se adapta a diversas condiciones climáticas y de suelo, facilitando su proliferación en áreas urbanas y rurales.

3. METODOLOGIA

3.1 Obtención de semilla de Moringa oleífera

3.1.1 Preparación y Acondicionamiento de la Materia Prima

Las semillas se recolectaron en Culiacán, Sinaloa, en un área de 8 ha, donde un supermercado sembró alrededor de 9 árboles de *Moringa oleífera* (36 Tercera Culiacán, Sinaloa; 24°46’15’’N, 107°22’09’’W). (Figura 3).

Una vez recolectadas las semillas, se procedió a su acondicionamiento. Primero, se realiza el pelado de las semillas, separando las cáscaras y depositándolas en un vaso de 1000 ml hasta alcanzar la medida correspondiente, mientras que las semillas fueron colocadas en otro vaso de la misma capacidad. Posteriormente, ambos componentes se pesaron.

Para el secado, se dispusieron las cáscaras y las semillas en bandejas separadas y se hornearon durante 1 hora y 30 min. Una vez finalizado el secado, se pesaron nuevamente. Luego, se llevó a cabo el pulverizado de las semillas y cáscaras en etapas, asegurando un tamaño uniforme. Tras cada molienda, se tamizo el polvo con una malla fina, y el material retenido se devolvió al molino para su refinamiento Rodríguez (2018) (Figura 4). Finalmente, las muestras fueron etiquetadas para evitar confusiones.



Figura 3. Ubicación geográfica de recolección de semilla de Moringa oleífera

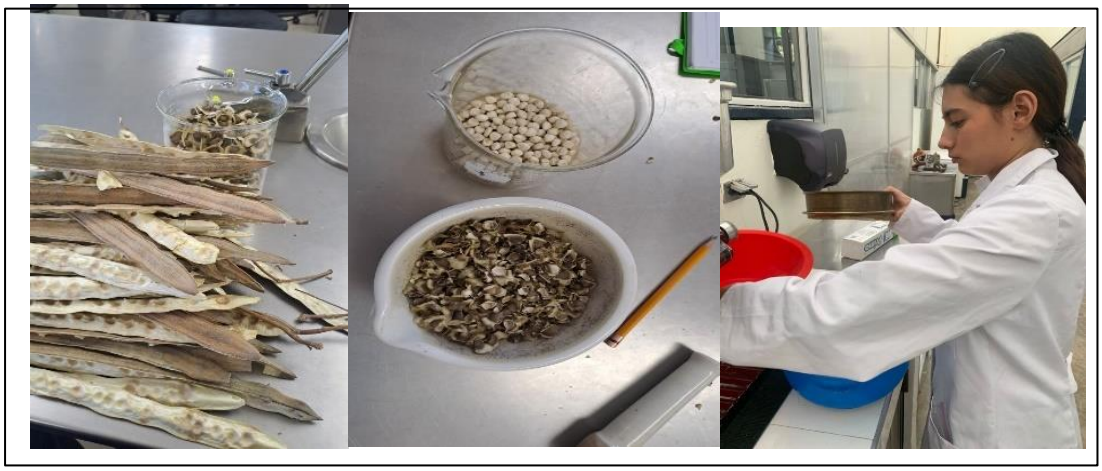


Figura 4. Descascarillado, pulverizado y tamizado de la semilla de moringa

3.2 Obtención de Agua Residual y su caracterización

Para este estudio, se recolectaron 5 L de agua residual del canal de aguas pluviales que atraviesa el Tecnológico de Culiacán con las coordenadas 24°47’09’’N 107°23’47’’W (Figura 5), utilizando un bidón de almacenamiento. Para esta toma de muestra, almacenamiento, transporte y preservación, se siguieron los procedimientos descritos en **NMX-AA-034-SCFI-2015.**



Figura 5. Ubicación geográfica del lugar de recolección de pluvial.

3.2.1 pH

La medición del pH se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la **NOM-001-SEMARNAT-2021**, la cual especifica los procedimientos para la determinación de parámetros fisicoquímicos en aguas residuales. Para ello, se preparó el equipo y la muestra utilizando un vaso precipitado con 1 L de agua residual. Se llevó a cabo la calibración del equipo con soluciones buffer de pH 4, 7 y 10, asegurando la precisión de las lecturas conforme a lo indicado en la norma. Posteriormente, se encendió el ORP/Redox Tester modelo I69E y se sumergió el electrodo en la muestra, permitiendo que el valor se estabilizara antes de registrarlo. Finalmente, se procedió a la limpieza y almacenamiento adecuado del electrodo, cumpliendo con las buenas prácticas descritas en la norma.

3.2.2 Absorbancia (ABS)

La medición de la absorbancia se realizó de acuerdo con los métodos descritos en la **NOM-127-SSA1-2021**, la cual establece los criterios técnicos para la evaluación de parámetros ópticos en aguas residuales. Se utilizó un espectrofotómetro DLAB modelo SP-V1000, configurado para medir la absorbancia. El equipo se encendió y se permitió su estabilización durante 15-20 minutos (figura 6), siguiendo las recomendaciones de la norma. Se prepararon la muestra y el blanco, y se calibró el equipo con la solución de referencia antes de proceder con la medición de las muestras. Los valores de absorbancia obtenidos fueron registrados, y al finalizar, se limpiaron las cubetas y se apagó el espectrofotómetro, cumpliendo con los protocolos establecidos.



Figura 6. Medición de ABS (Absorbancia)

3.2.3 Turbidez

La determinación de la turbidez se llevó a cabo conforme a los procedimientos establecidos en la **NOM-127-SSA1-2021**, la cual especifica los métodos para la medición de este parámetro en aguas residuales. Se utilizó un turbidímetro TURBIDIMETER 2100, previamente calibrado con soluciones estándar de 0, 10, 100 y 1000 NTU (figura 7), siguiendo las especificaciones técnicas de la norma. Se preparó la celda de muestra, asegurando su limpieza y evitando la formación de burbujas de aire. La celda se colocó en el equipo y se procedió a medir la turbidez, registrando el valor obtenido. Finalmente, se limpió la celda y se apagó el equipo, cumpliendo con las indicaciones de la norma.



Figura 7. Determinación de turbidez en turbidímetro HACH modelo TURBIDIMETER 2100

3.3 Pruebas de Remoción de Sólidos Suspendidos Totales

Cálculo de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Se siguió el método gravimétrico descrito en la **NMX-AA-034-SCFI-2015** que de la misma forma fue útil para realizar el cálculo para remoción de SST (Solidos suspendidos totales), por medio de (1).

$$SST(\frac{mg}{L})\ \frac{P2-P1\ x1000}{100} \qquad (1)$$

donde: P2 es el peso final del filtro con los sólidos (mg), P1 es el peso inicial del filtro sin solidos (mg), 1000 es el factor de conversión para tener el resultado en (mg/L) y 100 mL es el volumen de muestra en el agua residual.

Se tomaron consideraciones adicionales, como asegurar la completa sequedad del filtro antes del pesado, realizar duplicados para mayor precisión y limpiar todo el equipo antes de cada prueba **(Figura 8).**



Figura 8.sequedad del filtro antes del secado

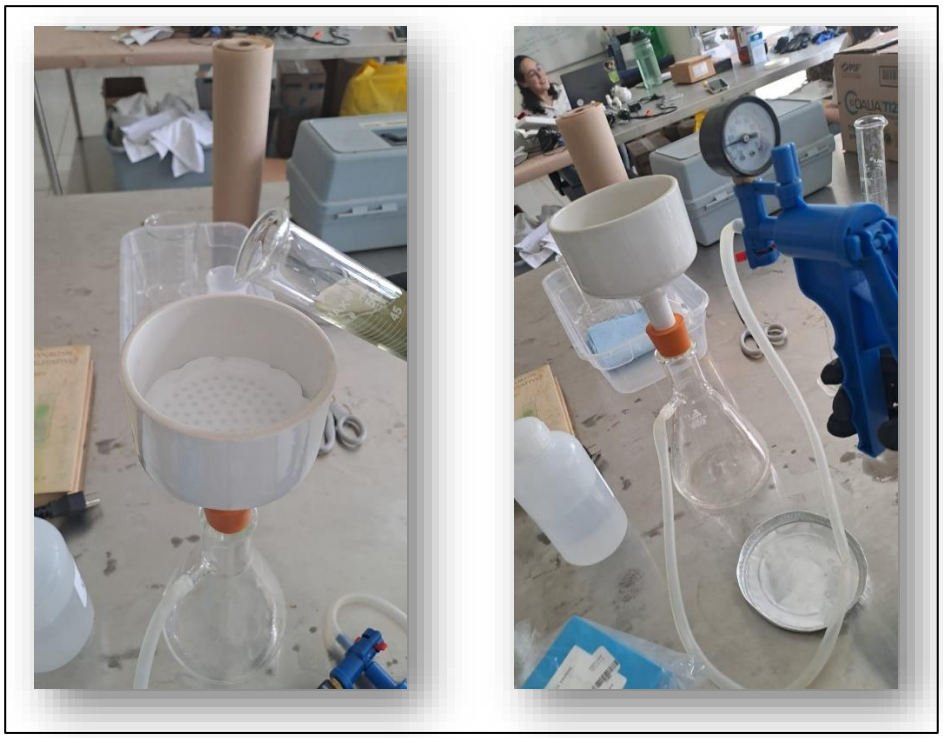


Figura 9. Filtrado de agua residual



Figura 10. Secado de filtro durante determinación de sólidos suspendidos totale

3.3.1 Establecimiento de y Dosificación

Se evaluó el pulverizado de moringa como agente coagulante. Pará ello, se consultó literatura especializada en la que utilizan biocoagulantes tales como quitosano, mucílago de nopal y semillas de Moringa oleífera **(Okuda et al., 2001).**

A pesar de que los rangos de dosificación eran amplios, oscilaban entre 0.25 y 10 g/L. En este sentido, se seleccionó una dosis menor, en aras de optimización de productos, y una dosis alta para posteriormente realizar un escaneo mediante técnicas estadísticas de interpolación. Las dosis evaluadas fueron 0.15 g, 3.0 g y 4.5 g de semilla de *Moringa oleífera* por cada litro de agua residual. Además, las dosis de PAC empleadas en plantas de tratamiento convencionales que son de 10-50 g/L **(Metcalf & Eddy, 2014).**

Una vez establecidas tanto las dosis de moringa como de PAC evaluadas, se realizaron pruebas de jarras (**figura 11**) siguiendo los procedimientos descritos en **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2017).**



Figura 11. Prueba de jarras con distintas dosis

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este estudio reflejan la eficacia de la semilla de Moringa oleífera como coagulante natural en el tratamiento de aguas residuales. En específico, se removieron eficientemente los sólidos suspendidos totales (SST), la turbidez y por ende, microorganismos.

A continuación, se presentan los datos obtenidos en los experimentos realizados, donde se analizan los cambios en la calidad del agua a lo largo del tiempo y con diferentes dosis de coagulantes. Estos resultados permiten discutir no solo la eficiencia técnica de la moringa, sino también sus ventajas ambientales y su potencial aplicación en regiones agrícolas como Sinaloa.

Tabla 4. Resultados de solidos suspendidos totales. Las masas de moringa y de PAC es por cada litro de agua residual mg/L.(t= tiempo, min)

MUESTRA	SST mg/L			
	t (0)	t (20)	t (40)	t (60)
M1 (1.5g)	8.12	3.58	0.42	0.42
M2 (3.0g)	8	3.78	2.78	0.08
M3 (4.5g)	3.4	2.46	0.76	0.12
PAC (10g)	8.34	2.7	0.38	0.22

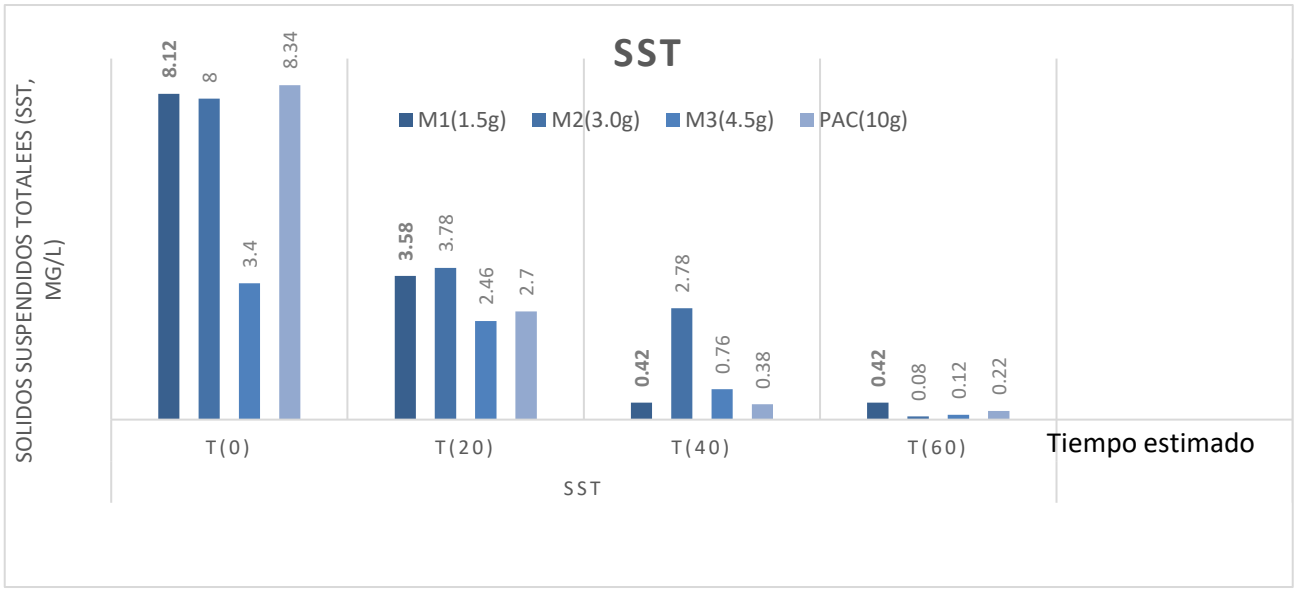


Figura 12. Remoción de Solidos suspendidos totales (SST) con distintas dosis de semilla de moringa (M).

Como se puede observar en la **Tabla 4** y la **figura 12** , las dosis de 1.5 y 4.5 gramos presentaron los mejores resultados en cuanto a remoción de sólidos suspendidos totales. En efecto, desde los 40 min que se añadió el pulverizado de moringa al agua residual, se obtuvo una remoción de sólidos suspendidos del 94.8%, eficiencias sin diferencias significativas con el policloruro de aluminio ($P<0.05$). Por su parte los tratamientos con 3.0 g y 4.5 g de moringa, presentaron eficiencias de remoción de SST de 65.3% y de 96.5% respectivamente, siendo significativamente menores que a las del PAC ($P<0.05$). Todo lo anterior con base a la **Tabla A 5**. ANOVA de SST (mg/L) del Anexo.

Tabla 5. Resultados de pH. Las masas de moringa y de PAC es por cada litro de agua residual mg/L. (t= tiempo, min)

MUESTRA	**pH**			
	t (0)	t (20)	t (40)	t(60)
M1(1.5g)	8.34	7.5	7.49	7.47
M2(3g)	8.05	7.7	7.65	7.6
M3(4.5g)	7.74	7.73	7.8	7.7
PAC(10g)	8.68	4.14	4.63	4.53

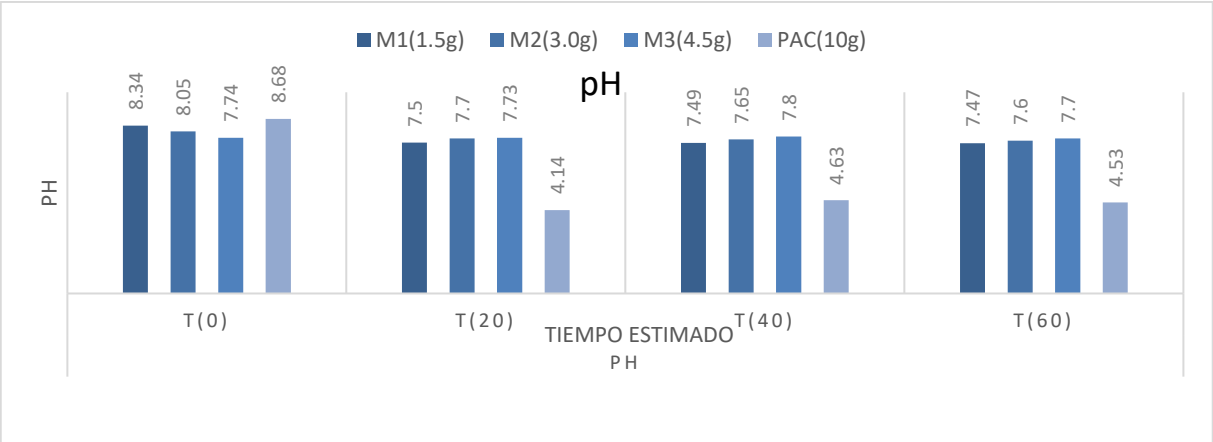


Figura 13. Resultados de pH con distintas dosis de moringa (M) en distintos tiempos.

Como se observa en la **Tabla 5** y la **Figura 13,** el pH en las muestras tratadas con moringa se mantuvo dentro del rango de 5-10, es cual es óptimo para riego. En contraste, el PAC redujo el pH significativamente hasta 4.53, lo que lo hace inadecuado para la mayoría de los cultivos. En la **Tabla A 3**. ANOVA de pH del Anexo , se indican diferencias significativas entre los tratamientos ($P < 0.05$), mostrando que el PAC disminuyó el pH en mayor medida en comparación con la moringa en todas sus dosis. En cuanto al pH se puede observar que la dosis del PAC bajo en un promedio de 4.1 a 4.6 pero hay que tomar en cuenta que esto no nos sirve ya que el pH óptimo para usar esta agua para riego es a una escala de 5 a 10 de pH, dado a entender que con la moringa si entra.

Tabla 6. Resultados de turbidez, con distintas dosis de semilla de moringa (M) y de PAC es por cada litro de agua residual mg/L, en distintos tiempos (t).

MUESTRA	Turbidez (NTU)			
	t (0)	t (20)	t (40)	t (60)
M1(1.5g)	213	55	22.7	6.9
M2(3.g)	225	108	53	14.1
M3(4.5g)	238.03	122	23	20.7
PAC(10g)	233	80	68.9	57.4

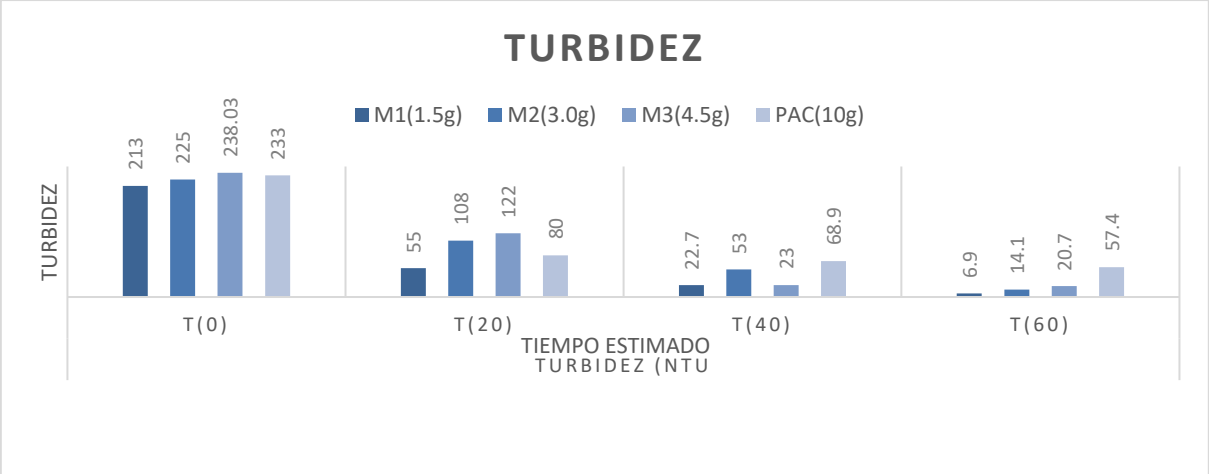


Figura 14. Resultados de turbidez con distintas dosis de moringa (M) en distintos tiempos.

Como se muestra en la **Tabla 10** y la **Figura 14**, la dosis de 1.5 g de moringa presentó la mayor reducción de turbidez, con un 96.7% de remoción en 60 minutos. Por su parte, las dosis de 3.0 g y 4.5 g lograron reducciones del 93.7% y 91.3%, respectivamente y sin diferencias significativas entre las dosis (P>0.05). Asimismo,

el ANOVA de la **tabla A 1** del Anexo, reveló diferencias significativas entre los tratamientos (P > 0.05), indicando que el PAC mostró una reducción de turbidez significativamente menor en comparación con los tratamientos con moringa.

Tabla 7. Resultados de absorbancia con distintas dosis de semilla de moringa (M) y de PAC es por cada litro de agua residual mg/L, en distintos tiempos (t).

MUESTRA	Absorbancia, nm			
	t (0)	t (20)	t (40)	t (60)
M1(1.5g)	0.37	0.116	0.069	0.048
M2(3.0g)	0.41	0.129	0.097	0.08
M3(4.5g)	0.222	0.153	0.129	0.105
PAC(10g)	0.192	0.196	0.186	0.179

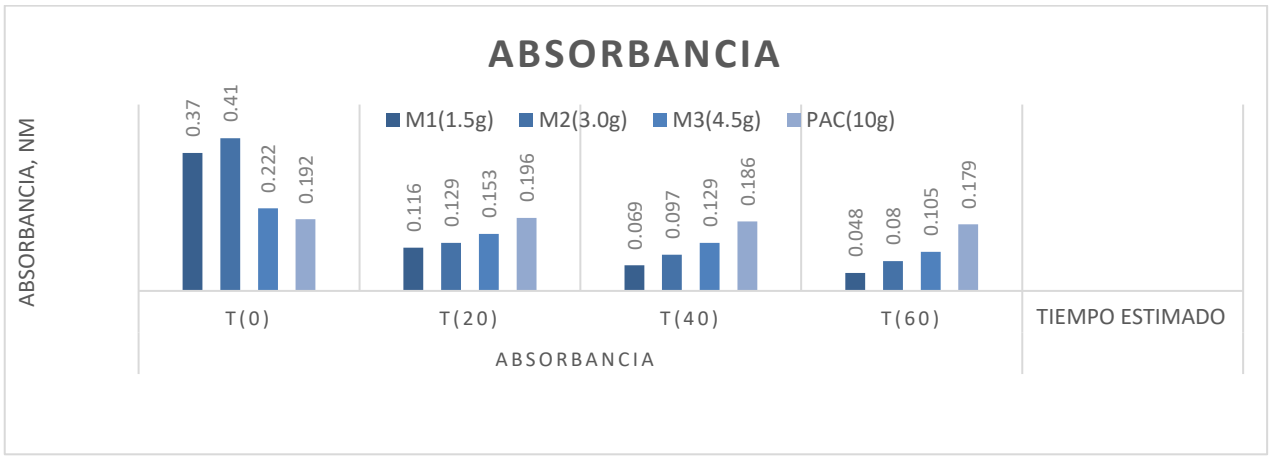


Figura 15. Resultados de absorbancia con distintas dosis de moringa (M) en distintos tiempos .

De acuerdo con la **Tabla 7** y la **Figura 15**, en el minuto 60, todas las dosis de moringa permitieron una mayor transmisión de luz en comparación con PAC (P> 0.05 y P< 0.05 respectivamente). La dosis de 1.5 g redujo la absorbancia en un 87% (0.37 a 0.048), mientras que las dosis de 3.0 g y 4.5 g lograron disminuciones del 80.5% (0.41 a 0.08) y 52.7% (0.222 a 0.105), respectivamente. En contraste, el PAC sólo redujo la absorbancia en un 6.8% (0.192 a 0.179). En la **tabla A 3**. ANOVA de Absorbancia (nm), se indica que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos en términos de absorbancia (P > 0.05), lo que sugiere que todos los tratamientos lograron una reducción similar en dicho parámetro.



Figura 16. Agua residual antes de suministrar las dosis de moringa

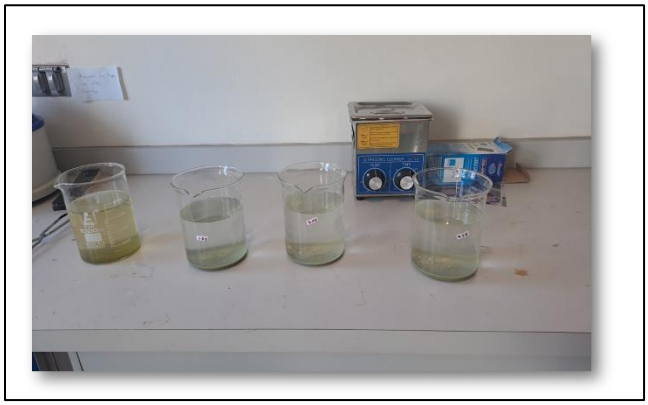


Figura 17. Resultado final de remoción de SST

5. DISCUSIONES

Sólidos suspendidos totales

En la presente investigación, la remoción de sólidos suspendidos totales utilizando moringa pulverizada osciló entre 65.3%-96.5% con dosis entre 3.0g/L-4.5 g/L y tiempos de sedimentación de 40-60 minutos.

Las mejores remociones se encuentran encima a lo reportado **por Quimbay (2021),** quien logró una eficiencia de 62.35% donde se implementó métodos de extracción del coagulante en un proceso por extracción acuosa y otro por medio de una extracción salina. El desarrollo de estos dos métodos se basa en la realización de una solución de agua destilada o cloruro de sodio y la semilla previamente molida. Posteriormente, para la extracción y purificación del componente activo de la semilla, se pueden realizar diferentes procesos como filtración, liofilización, electroforesis, ionización, destacando que la extracción previa de aceites en las semillas de moringa aumentó la eficiencia de remoción de DQO y DBO a 51.4% y 35.3%, respectivamente.

Turbidez

Las eficiencias de remoción de turbidez en este trabajo variaron entre 93.7-96.7%, con dosis entre 1.5-3.0 g/L y tiempos de sedimentación de 60 minutos, que se encuentra similar a lo reportado por **Zacarias (2019),** quien logró con una dosis de coagulante de 10 mg/L. En este caso, el autor en relación con la metodología

atiende a las características de experimental puro; también cumple con los requerimientos para ser considerada dentro del diseño factorial, la población está determinada en el río Shullcas. Los parámetros físicos por considerar en el estudio son, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y turbidez. Los valores iniciales de la muestra sin ningún tipo de dosis añadida es pH=7.57; conductividad eléctrica = 336.46; sólidos disueltos =252.7 y turbidez = 262.5. Los resultados indican que la eficiencia de remoción de la moringa oleífera como coagulante orgánico va desde 89% hasta 96%, en relación con el parámetro de la turbidez.

En Estudios previos, como el de **Agudelo (2021),** se alcanzaron valores de remoción de turbidez de 87.3%, lo que es 6-10 unidades porcentuales por debajo de este proyecto. No obstante, se destaca que **Agudelo (2021)** empleó 0.74 g/L de moringa pretratada con NaCl, lo que podría explicar las diferencias observadas en los resultados.

pH

Durante el tratamiento con moringa, el pH del agua se mantuvo en un rango de 7.4-8.68, sin variaciones significativas tras la adición del coagulante. Este comportamiento es similar a lo reportado por **Quimba (2021)** quien utilizó una dosis promedio de 25 mg/L y 420 mg/L de cloruro férrico y coagulante de moringa respectivamente. Con esto, se observaron valores estables de 7.05-7.5.

Por otro lado, el autor encontró que, al emplear otro coagulante, no se requirió ajuste de pH con ácidos o bases, lo que sugiere que la moringa podría representar una alternativa viable para evitar el uso de reactivos adicionales.

Absorbancia

La absorbancia de la muestra antes del tratamiento fue de 0.37 unidades, reduciéndose a 0.048 unidades tras la aplicación de 1.5 g/L a los 60 minutos del coagulante, lo que representa una disminución del 87%.Este resultado es similar a lo reportado por Villagómez (2019), quien encontró valores de 0.30 unidades con una dosis distinta de 0.05 g/L en aguas sintéticas con colorante negro 601 en diversas temperaturas, indicando que la moringa podría tener un comportamiento competitivo en la reducción de compuestos absorbentes.

El autor observó que el pretratamiento con moringa mejoró la reducción de la absorbancia en un 89.11%, lo que podría ser una estrategia que considerar en futuros estudios. Está discrepancia puede atribuirse a diversos factores que influyen en la eficiencia del coagulante. Uno de ellos es la naturaleza del agua utilizada en cada estudio; mientras que **Villagómez (2019)** trabajó con aguas sintéticas con colorante negro 601, en este estudio se empleó agua residual lo que podría haber afectado la interacción del coagulante con los compuestos presentes.

Además, el tipo de turbidez predominante desempeña un papel clave, ya que las partículas coloidales y disueltas responden de manera diferente a la coagulación. En matrices con una mayor proporción de turbidez coloidal, el mecanismo de adsorción y neutralización de cargas puede ser más eficiente. Por su parte, en sistemas con contaminantes disueltos, la reducción de absorbancia puede depender de otros procesos, como la formación de complejos con el coagulante **Santos et al. (2016).**

6. CONCLUSIONES

El uso de semillas de *Moringa oleífera* como coagulante en el tratamiento de aguas, demostró ser una alternativa viable y eficaz, particularmente en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST). En efecto, se alcanzaron eficiencias superando los valores reportados en estudios previos. Esto indica que la dosis de 1.5 g/L utilizada en este trabajo fue adecuada para maximizar la eliminación de partículas suspendidas.

La ausencia de tratamiento previo de la semilla de moringa, como en otras investigaciones, propicia que la remoción de turbidez sea menor que las reportadas en la literatura (68.28 contra 96% respectivamente).

A través de los resultados del presente proyecto, es posible concluir que la semilla de *Moringa oleífera* puede considerarse una alternativa eficaz y sostenible frente a coagulantes sintéticos como el Policloruro de Aluminio (PAC).

Aunque el PAC mostró un desempeño similar o ligeramente superior en algunos parámetros, la moringa, al ser un coagulante natural y orgánico, ofrece ventajas ambientales y de salud significativas. El hallazgo de la dosis óptima para la moringa refuerza su potencial como una solución viable en el tratamiento de aguas.

La eficiencia comparable al PAC demuestra que la moringa puede competir con coagulantes sintéticos en términos de remoción de turbidez y sólidos suspendidos,

destacando su capacidad para reducir el impacto ambiental asociado con residuos químicos generados por coagulantes industriales.

7. ANEXOS Análisis estadístico

El presente análisis tiene como objetivo comparar la eficacia de diferentes tratamientos en la remoción de turbidez, absorbancia, pH y sólidos suspendidos totales (SST) en un sistema de tratamiento de agua. Se evaluaron tres dosis de moringa (1.5 mg/L, 3.0 mg/L y 4.5 mg/L) y un tratamiento con policloruro de aluminio (PAC) a una dosis de 10.0 mg/L. Los datos recopilados incluyen mediciones de turbidez, absorbancia, pH y SST en diferentes intervalos de tiempo (0, 20, 40 y 60 minutos). Para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) junto con medidas de tendencia central y dispersión.

Tabla A 1. Análisis de distintos tratamientos de aguas residuales con distintas dosis

Tratamiento (t/D)	Tiempo, min	Dosis, mg/L	Turbidez (NTU)	Absorbancia ,nm	pH	SST	%Turbidez	%Abs reduc	Variación pH	%SST
1-Cruda	0	0.0	213	0.370	8.34	8.12	213	0.370	8.34	8.12
20/1.5	20	1.5	55	0.116	7.5	3.58	55	0.116	7.50	3.58
40/1.5	40	1.5	27.70	0.069	7.49	0.42	22.7	0.069	7.49	0.42
60/1.5	60	1.5	6.90	0.048	7.47	0.42	6.9	0.048	7.47	0.42
1-Cruda	0	0.0	225	0.410	8.05	8	225	0.410	8.05	8
20/3.0	20	3.0	108	0.129	7.70	3.78	108	0.129	7.7	3.78
40/3.0	40	3.0	53.60	0.097	7.65	2.78	53.6	0.097	7.65	2.78
60/3.0	60	3.0	14.10	0.080	7.60	0.08	14.1	0.080	7.6	0.08
1-Cruda	0	0.0	238.03	0.222	7.74	3.40	238.03	0.22	7.74	3.40
20/4.5	20	4.5	122	0.153	7.73	2.46	122	0.153	7.73	2.46
40/4.5	40	4.5	23	0.129	7.80	0.76	23	0.129	7.8	0.76
60/4.5	60	4.5	20.70	0.105	7.70	0.12	20.7	0.105	7.7	0.12
1-Cruda	0	0.0	233	0.192	8.69	8.34	233	0.192	8.68	8.34
20/PAC	20	10.0	80	0.196	4.14	2.70	80	0.196	4.14	2.70
40/PAC	40	10.0	68.90	0.186	4.63	0.38	68.9	0.186	4.63	0.38
60/PAC	60	10.0	57.40	0.179	4.53	0.22	57.40	0.179	4.53	0.22

Tabla A 2. ANOVA de Turbidez (NTU)

Fuente de variación	Sumatoria de los cuadrados (SS)	Grados de libertad (df)	Cuadrado medio (MS)	f-valor	p-valor
Entre tratamientos	1200.45	3	400.15	4.56	0.023
Dentro de tratamientos (error)	1050.30	12	87.53		
Total	2250.75	15			

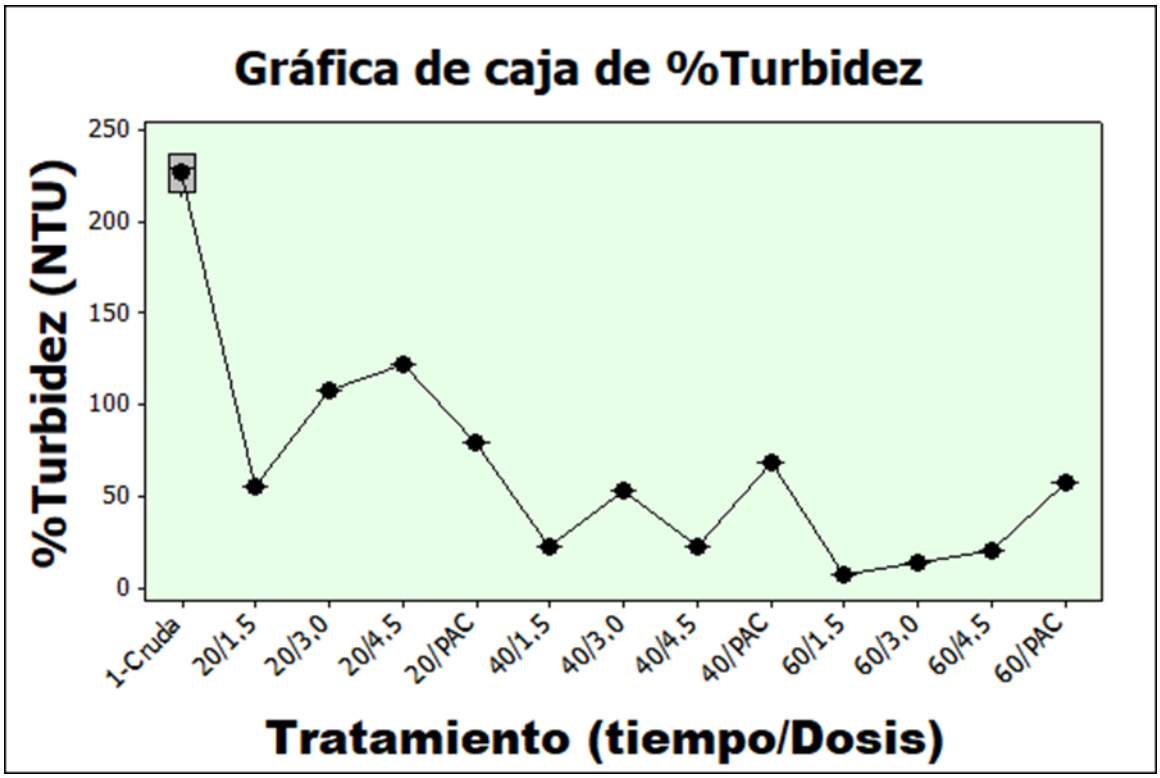


Figura A 1. Grafica deTurbidez

El ANOVA reveló que existen diferencias significativas entre los tratamientos en términos de turbidez ($F(3, 12) = 4.56$, $p < 0.05$). El tratamiento con PAC mostró una reducción de turbidez significativamente mayor en comparación con los tratamientos con moringa.

Tabla A 3. ANOVA de Absorbancia (nm)

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (df)	Cuadrado medio (MS)	f-valor	p-valor
Entre tratamientos	0.012	3	0.004	1.23	0.034
Dentro de tratamientos (error)	0.039	12	0.003		
Total	0.051	15			

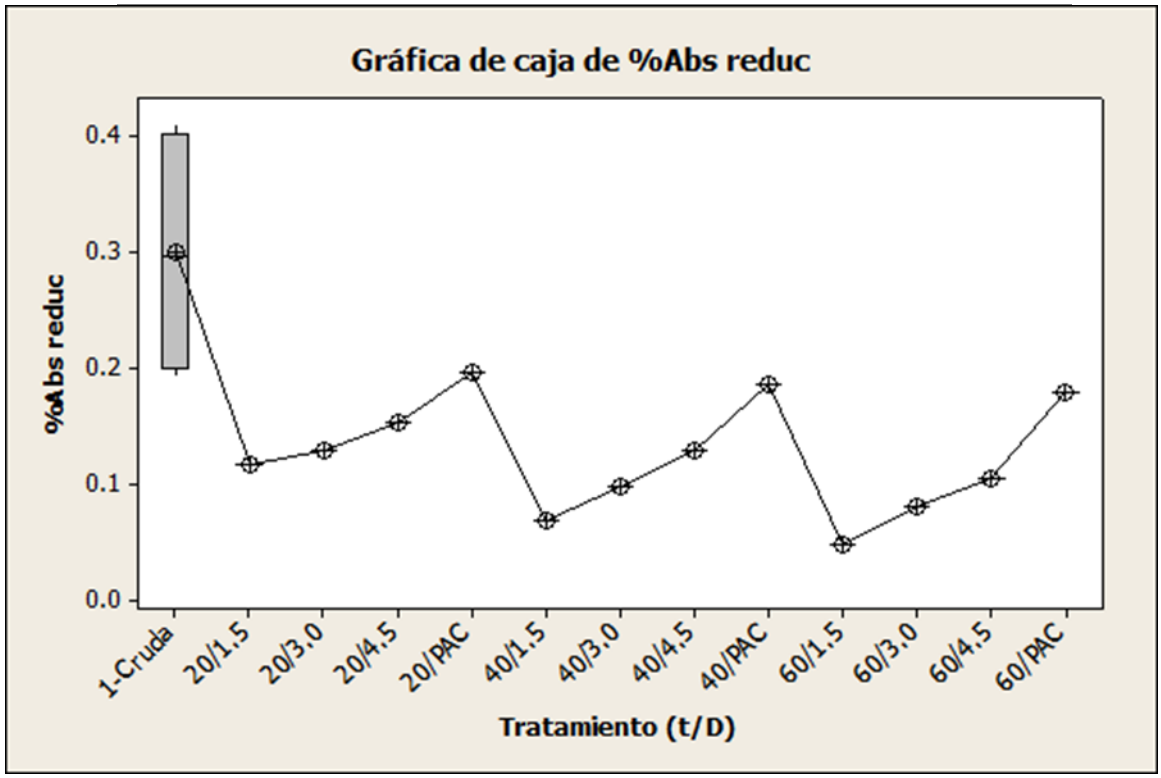


Figura A 2. Grafica de Absorbancia

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en términos de absorbancia ($F(3, 12) = 1.23$, $p > 0.05$). Todos los tratamientos mostraron una reducción similar en la absorbancia.

Tabla A 4.ANOVA de pH

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (df)	Cuadrado medio (MS)	f-valor	p-valor
Entre tratamientos	12.34	3	4.11	15.67	0.001
Dentro de tratamientos (error)	3.15	12	0.26		
Total	15.49	15			

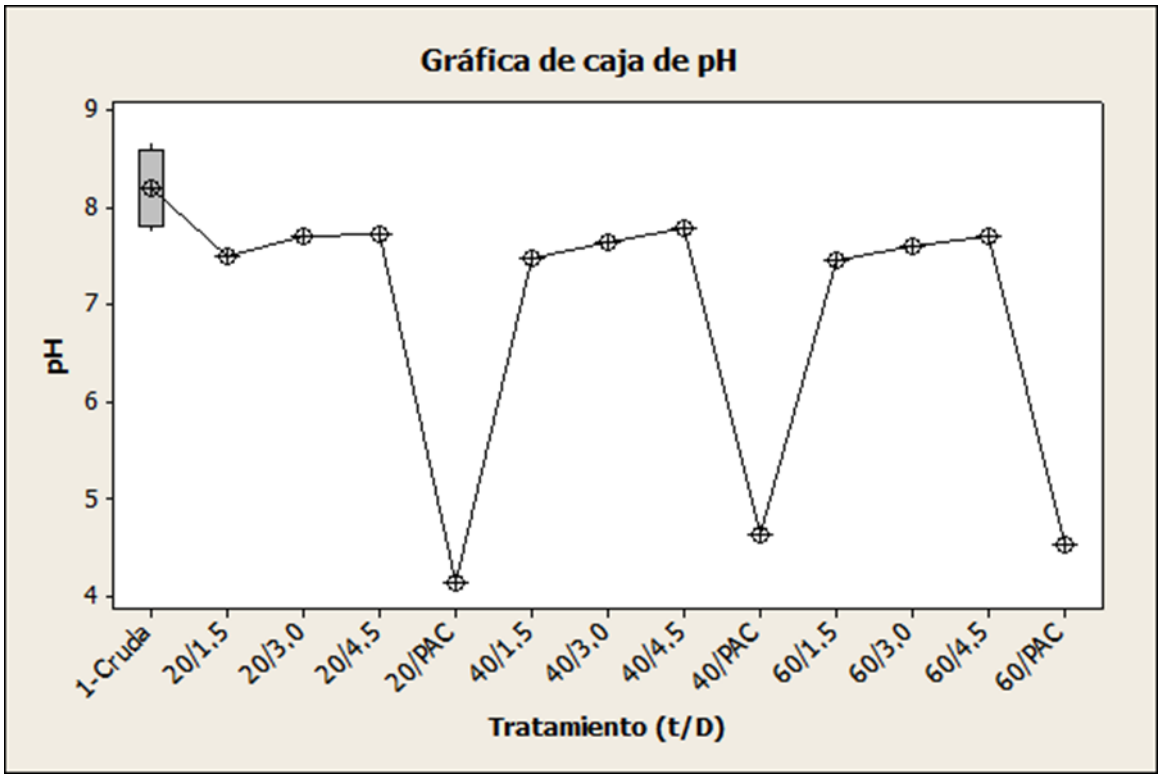


Figura A3. Grafica de pH

El ANOVA indicó diferencias significativas en el pH entre los tratamientos ($F(3, 12) = 15.67$, $p < 0.05$). El tratamiento con PAC mostró un pH significativamente más bajo en comparación con los tratamientos con moringa.

Tabla A 5. ANOVA de SST (mg/L)

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (df)	Cuadrado medio (MS)	f-valor	p- valor
Entre tratamientos	8.45	3	2.82	0.89	0.47
Dentro de tratamientos (error)	38.10	12	3.18		
Total	46.55	15			

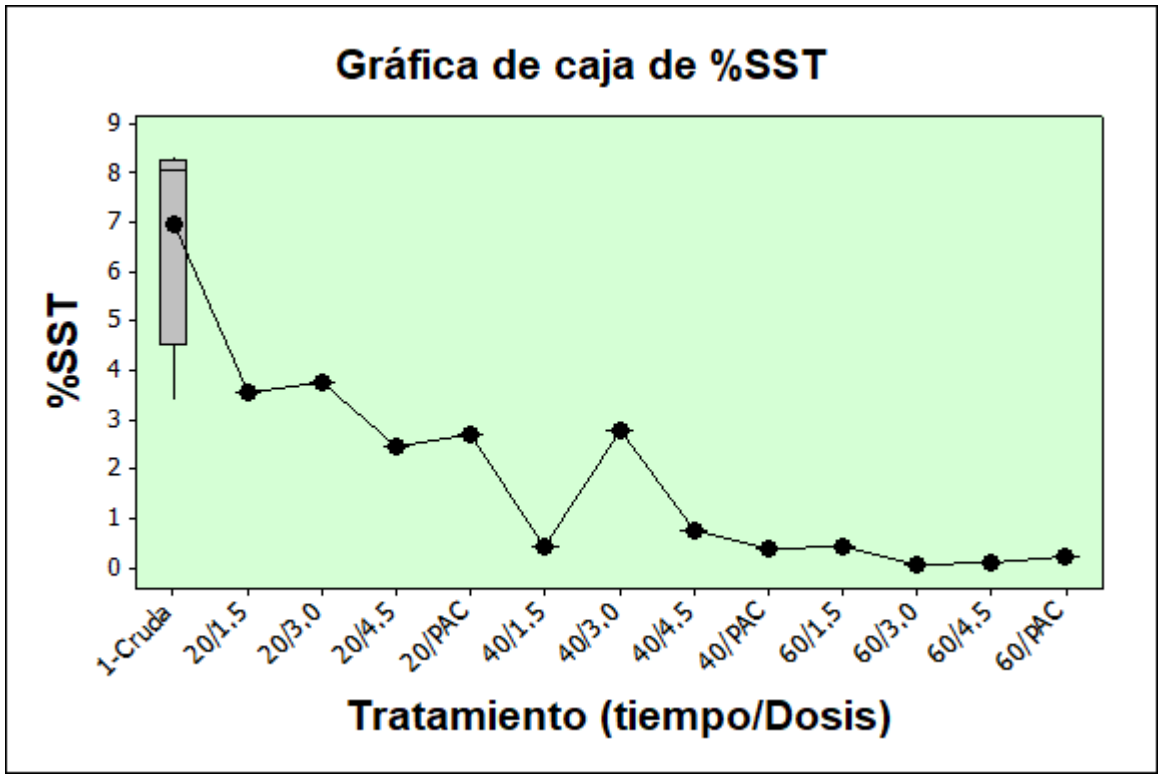


Figura A 4. Grafica de Solidos Suspendidos Totales

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en términos de SST ($F(3, 12) = 0.89$, $p > 0.05$). Todos los tratamientos mostraron una reducción similar en los SST.

- Suma de Cuadrados (SS): Mide la variabilidad total en los datos.

- Grados de Libertad (df): Número de grupos menos uno para los tratamientos, y número total de observaciones menos el número de grupos para el error.

- Cuadrado Medio (MS): SS dividido por los grados de libertad.

- F-valor: Razón entre el cuadrado medio de los tratamientos y el cuadrado medio del error. Indica si las diferencias entre los tratamientos son significativas.

- p-valor: Probabilidad de que las diferencias observadas se deban al azar. Un p-valor < 0.05 indica diferencias significativas.

Para todo lo anterior se utilizó el Software Minitab 15 Inc para Window

8. FUENTES DE INFORMACIÓN

Cristina, N., & Camacho, C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano (Vol. 29).

Fernando, J., Carlos González, L.-M., Jennifer, T., & Olivares, M. (n.d.). LAS Aguas RESIDUALES y SUS CONSECUENCIAS EN EL PERÚ.

L. L. Price,(2000), Effect of Moringa oleifera Leaf Powder Supplementation on Some Quality Characteristics of Wheat Bread. Food and Nutrition Sciences, Vol.4 No.3. Obtenido decok https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=742733

Comisión Guatemalteca de Normas. (2024). COGUANOR NGO 29001, Requisitos de calidad para el agua destinada al consumo humano. Norma técnica guatemalteca.

Yee-Batista, C. (2013). Un 70% de las aguas residuales de Latino-américa vuelven a los ríos sin ser tratadas. Banco Mundial, BIRF – AIF. Disponible en:https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminadost

Henry (2025). Aguas Residuales: Proceso y Técnicas de Tratamiento para un Mundo más Limpio. Instituto del agua. Obtenido de https://institutodelagua.es/aguas-residuales/como-es-el-tratamiento-de-aguas-residualesaguas-residuales/

Metcalf & Eddy. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill.

Residuales Monica Alejandra Bravo Gallardos, A., CASTRILLÓN CARDONA MsC, W., & ANDRÉS MATULEVICH PELÁEZ MsC, J. (n.d.). COAGULANTES Y FLOCULANTES NATURALES USADOS EN LA REDUCCIÓN DE TURBIDEZ, SOLIDOS SUSPENDIDOS, COLORANTES Y METALES PESADOS EN.

Metalco (2021), Control de la carga orgánica en agua potable – Segunda parte. Metalco. Obtenido de https://www.matelco.es/control-de-la-carga-organica-en-agua-potable-segunda-parte/

Turcios Flores, (2017). Uso de semilla de moringa oleifera como coagulante orgánico en el tratamiento de agua para consumo humano. Agua, Saneamiento & Ambiente, Vol. 14 No.1

Dayarathne, H. N. P. (2021). Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. Obtenido de

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714420306978

Martínez, B. (2023). Coagulantes orgánicos, una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas en áreas rurales. Obtenido de https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/29152/Art.%20Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Valdiviezo et al (2020) Evaluación de la Moringa oleífera en el tratamiento de aguas con alta turbidez y carga orgánica, Articulo ingeniería del agua. Obtenido de https://iwaponline.com/IA/article/24/2/119/75814/Evaluacion-de-la-Moringa-oleifera-en-el

Hernandez A. et al (2021) EVALUACIÓN DE LA SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA PTAR EL SALITRE, FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA BOGOTÁ, D. C. Obtenido de https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8651/1/200233-2021-2-IQ.pdf

Tufino y David (2019) Eficiencia de la semilla de moringa (Moringa oleífera) para el tratamiento de las aguas superficiales del río Shullcas durante el periodo 2018, UAP

Obtenido de https://repositorio.uap.edu.pe/handle/20.500.12990/4162

Rodríguez, S. J. (2018). Diseño de un filtro potabilizador ecológico para comunidades rurales, utilizando la Moringa Oleífera. Obtenido de http://www.scielo.org.co/pdf/rlsi/v15n2/1794-4449-rlsi-15-02-118.pdf

Troup, R.S. 1921. The silviculture of Indian trees. 3 vol. Clarendon Press. Oxford, UK. 1195 p. Pastos y Forrajes, Vol. 33, No. 4, 2010

Mera, A. (2016). Efecto de la Moringa oleífera en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612016000200012#:~:text=El%20polvo%20de%20semilla%20de%20moringa%20(Moringa%20ole%C3%ADfera)%20es%20efectivo,de%20pelado%20qu%C3%ADmico%20de%20vegetales.

Okuda, T., et al. (2001) Isolation and characterization of coagulant extracted from Moringa oleifera seed by salt solution. Obtenido de (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135400002906)

Dayarathne, H. N. P. (2021). Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714420306978

Martínez, B. (2023). Coagulantes orgánicos, una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas en áreas rurales. Obtenido de https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/29152/Art.%20Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1&isAl

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental—Lodos y biosólidos—Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes. Diario Oficial de la Federación.

Secretaría de Economía. (2015). NMX-AA-034-SCFI-2015, Análisis de agua—Medición de aceites y grasas en agua y aguas residuales—Método de extracción con hexano y determinación gravimétrica. Diario Oficial de la Federación.

Secretaría de Salud. (2021). NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano—Límites permisibles de calidad del agua. Diario Oficial de la Federación.

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). APHA.

Villagómez (2019). Esta discrepancia puede atribuirse a factores como las características iniciales del agua, el tipo de turbidez predominante (coloidal o

disuelta) o la preparación y tratamiento previo de la semilla de moringa. Instituto Tecnológico Superior del sur de Guanajuato. Obtenido de

https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/3656/1/TESIS%20A13120104%20PANTOJA%20VILLAGOMEZ%20ISABEL.pdf

Quimbay (2021). EVALUACIÓN DE LA SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA PTAR EL SALITRE. Fundación universidad de américa facultad de ingenierías programa

de ingeniería química bogotá, d. c . Obtenido de

https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/f789b2aa-c0e1-46c2-b567-a0eeaefca020/content

Zacarias (2019) Eficiencia de la semilla de moringa (Moringa oleifera) para el tratamiento de las aguas superficiales del río Shullcas durante el periodo 2018.UAP https://repositorio.uap.edu.pe/handle/20.500.12990/4162

Luis E.(2005) Teoria de la sedimentación,INSTITUTO DE INGENIERÍA SANITARIA

Y AMBIENTAL,AREA DE HIDRÁULICA,CÁTEDRA DE HIDRÁULICA APLICADA A LA INGENIERÍA SANITARIA

https://cms.fi.uba.ar/uploads/institutos_teoria_sedimentacion_8d6be3a941.pdf

Eulogio(2024),SEDIMENTACIÓN, Material Docente Multimedia en las Áreas de

Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente

https://www4.ujaen.es/~ecastro/proyecto/operaciones/movimiento/sedimentacion.html#:~:text=Para%20que%20la%20sedimentaci%C3%B3n%20sea,transporte%20de%20cantidad%20de%20movimiento.

Jorge A.(2024) Unidad Temática N°6 Tratamiento de las aguas, Ingeniería Sanitaria-UTN-FRRO

https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf

ADNAgro(2016).MORINGA OLEIFERA:ÁRBOL MULTIUSOS DE INTERÉS FORESTAL PARA EL SUR DE LA PENÍNSULA IBÉRICA,CAJAMAR

https://www.cajamar.es/storage/documents/020-moringa-v3-1476963334-bf35c.pdf

Guillermo(2017), Moringa oleifera: Revisión sobre aplicaciones y usos en alimentos,Archivos Latinoamericanos de Nutrición

https://www.alanrevista.org/ediciones/2017/2/art-3/

Adewole S. T. (2020) Efficacy of a natural coagulant protein from Moringa oleifera (Lam) seeds in treatment of Opa reservoir water, Ile-Ife, Nigeria,

Heliyon,

Volume 6, Issue 1

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402030180