

**EVALUACIÓN DE LA SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA PTAR EL SALITRE**

**CHRISTIAN FELIPE HERNANDEZ AGUDELO
DANIELA QUIMBAY JÁCOME**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

Director

JUAN ANDRÉS SANDOVAL HERRERA

Ingeniero Químico

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D. C.**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Juan Andrés Sandoval Herrera
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Juan Camilo Cely Garzón
Firma del Jurado

Claudio Alberto Moreno Arias
Firma del Jurado

Bogotá, D.C. Agosto de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director de Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

Le dedico este logro a Dios y a mis padres, porque sin ellos no hubiera sido posible realizar mi carrera profesional, porque siempre me han apoyado en la realización de mis sueños a lo largo de mi vida y de mis estudios, porque ellos son mi motor en la vida. A mi pareja, porque se ha convertido en un pilar de fortaleza para mí, por estar a mi lado en los momentos más difíciles, escuchándome, apoyándome y por todos esos consejos que me ayudaron a seguir adelante. A mi abuelo Jesús Humberto Hernández Ardila, porque aunque no pudo estar a mi lado al final de este hermoso camino, sé que siempre va a estar a mi lado y que todos esos consejos y regaños que algún día me dio, me impulsaron a cumplir este sueño.

Christian Felipe Hernández Agudelo.

Primeramente, agradecerle a Dios por ser mi guía y permitirme cumplir esta meta.

Dedico este proyecto a mis padres, por ser uno de los pilares más importantes en este proceso en el cual me ayudaron cada vez que se presentaba alguna dificultad. A mi familia en general, quienes compartieron momentos significativos conmigo y siempre estuvieron dispuestos a apoyarme incondicionalmente en cualquier momento.

Gracias a mis amigos y a Juan por estar presentes en cada paso, por ayudarme a ver de lo que era capaz de lograr.

Por último, agradecerle a mi compañero Christian, por aguantarme y apoyarme en cada momento difícil que afrontamos durante la realización del proyecto.

Daniela Quimbay Jacome.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, le doy gracias a Dios y a mis padres, Wilson Hernández y María Fernanda Agudelo por acompañarme en todo momento y haberme permitido cumplir este sueño. Por todos los consejos que me dieron a lo largo de mi carrera, para seguir adelante y hacer las cosas correctamente.

Le doy gracias a mi pareja Angie Paola Alvis, por entregarme la fortaleza necesaria para no desfallecer nunca, por motivarme a seguir adelante, por ayudarme a ser cada día una mejor persona y un mejor profesional. Por estar a mi lado recorriendo todo este camino, disfrutando de los buenos momentos y superando los obstáculos.

Al Ing. Juan Andrés Sandoval y el Ing. Felipe Correa, que se desempeñaron como director y codirector en la realización de este trabajo. Que desde el primer día que les comentamos la idea a trabajar, nos apoyaron con todo su conocimiento y ayudaron para que este trabajo se pudiera realizar de forma correcta, cumpliendo los objetivos apropiadamente.

A la familia Alvis Granada por apoyarme en la ejecución de este trabajo, por ese granito de arena aportado para que este proyecto y este sueño se pudieran cumplir de forma satisfactoria.

A la Planta de Tratamiento de Agua Residual PTAR El Salitre por abrirnos las puertas de sus instalaciones para la realización de este proyecto, además de apoyarnos con su conocimiento para el correcto desarrollo del mismo.

Por último, quiero agradecer a mis amigos y a mi compañera Daniela Quimbay por acompañarme a lo largo de toda mi carrera y en la realización de este proyecto de grado.

Christian Felipe Hernández Agudelo.

A mi familia por apoyarme cada día a cumplir mi meta, ser partícipes de mi educación, por la colaboración y consejos recibidos.

Al ingeniero Juan Sandoval por su dedicación, entrega, colaboración y consejos para culminar el proyecto

Al ingeniero Felipe Correa por su colaboración y dedicación en este proyecto

A los profesores que han sido parte del proceso y los cuales nos ayudaron a culminar de manera íntegra el proceso de nuestra carrera.

A la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR EL Salitre por colaborarnos y abrirnos las puertas de sus instalaciones, también apoyarnos con su conocimiento para el correcto desarrollo del proyecto.

Daniela Quimbay Jacome.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	16
1. MARCO TEORICO	17
1.1. Aguas residuales domésticas	17
1.2. Tratamiento de aguas residuales	17
1.3. Coagulación	18
1.4. Coagulante	18
1.5. Coagulantes químicos	19
1.6. Cloruro Férrico	19
1.7. Coagulante natural	20
1.8. Moringa Oleífera	20
1.8.1. <i>Cultivo de Moringa.</i>	20
1.8.2. <i>Cultivo de Moringa en Colombia.</i>	21
1.8.3. <i>Usos de la Moringa</i>	21
1.9. Mecanismos de la Coagulación	23
1.9.1. <i>Compresión de la doble carga.</i>	23
1.9.2. <i>Absorción y neutralización de cargas.</i>	24
1.9.3. <i>Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado.</i>	25
1.9.4. <i>Adsorción y Puente.</i>	25
1.10. Test de jarras	25
1.11. Alcalinidad	26
1.12. DBO	26
1.13. DQO	26
1.14. Solidos suspendidos totales	27
1.15. Proteínas coagulantes activas	27
1.16. Métodos de extracción de coagulante	27

2. CONDICIONES DE OPERACIÓN	28
2.1. Obtención del coagulante	28
2.2. Proceso de Descascarillado	29
2.3. Proceso de Molienda y Tamizado	29
2.4. Extracción del Aceite	30
2.5. Recuperación del Hexano	32
2.6. Extracción del componente activo	33
2.7. Condiciones de operación del coagulante	34
2.7.1. <i>Caracterización del coagulante.</i>	34
2.7.2. <i>Dosis de coagulante de moringa.</i>	35
2.7.3. <i>Test de Jarras.</i>	37
3. DETERMINACIÓN DE PARAMETROS FISICOQUÍMICOS DE LAS MUESTRAS	40
3.1. Determinación de pH	41
3.2. Determinación de Turbiedad	43
3.3. Determinación de Conductividad	45
3.4. Determinación de Alcalinidad	48
3.5. Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO)	51
3.6. Determinación de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	54
3.7. Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)	56
4. ANÁLISIS DE COSTOS	60
4.1. Costo de materia prima	60
4.2. Costos de producción	61
4.3. Cuantificación del valor comercial	63
4.4. Análisis de Costos	64
5. CONCLUSIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tratamiento de aguas residuales.	18
Figura 2. Proceso de Coagulación.	19
Figura 3. Usos de la moringa.	22
Figura 4. Propiedades de la moringa.	23
Figura 5. Compresión de la doble capa.	24
Figura 6. Mecanismo de Coagulación.	25
Figura 7. Obtención del coagulante.	28
Figura 8. Semilla de Moringa Oleífera.	29
Figura 9. Harina de Semilla de Moringa Oleífera.	30
Figura 10. Montaje de Soxhlet.	31
Figura 11. Harina de Semilla de Moringa Oleífera.	32
Figura 12. Montaje de recuperación de hexano.	32
Figura 13. Montaje de filtración de coagulante.	33
Figura 14. Coagulante de Semilla de MO.	34
Figura 15. Dosificación vs Turbiedad.	36
Figura 16. Dosificación vs Demanda Biológica de Oxígeno.	37
Figura 17. Equipo de Test de jarras.	38
Figura 18. pH portátil.	41
Figura 19. Gráfica de variación del pH.	42
Figura 20. Gráfica de pH.	43
Figura 21. Turbidímetro portátil.	43
Figura 22. Gráfica de remoción de turbiedad.	44
Figura 23. Gráfica de turbidez.	45
Figura 24. Conductímetro portátil.	46
Figura 25. Gráfica de variación de la conductividad.	47
Figura 26. Gráfica de conductividad.	48
Figura 27. Titulador de alcalinidad portátil.	49
Figura 28. Gráfica de la variación de la alcalinidad.	50

Figura 29. Gráfica de alcalinidad.	51
Figura 30. Prueba de DQO.	52
Figura 31. Gráfica de remoción de la Demanda Química de Oxígeno.	53
Figura 32. Gráfica de la DQO.	54
Figura 33. Prueba de DBO.	54
Figura 34. Gráfica de remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno.	55
Figura 35. Gráfica de DBO.	56
Figura 36. Prueba de SST.	57
Figura 37. Gráfica de variación de Sólidos Suspendedos Totales.	58
Figura 38. Gráfica de SST.	58

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

°C: Grado Centígrado.

μS: Microsiemens.

C₆H₁₄: Hexano

CaCO₃: Carbonato de Calcio.

cm: Centímetro.

COP: Peso Colombiano.

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

FeCl₃: Cloruro Férrico o Cloruro de Hierro.

g: Gramo

Kg: Kilogramo.

kW: Kilowatt.

kWh: Kilowatt – hora.

L: Litro.

M: Masa molar.

m³: Metro Cubico.

mg O₂: Miligramo de Oxígeno.

mL: Mililitro

MO: Moringa Oleífera.

mS: Milisiemens.

NaCl: Cloruro de Sodio

nm: Nanómetro.

NTU: Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

ppm: Partes por millón.

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

rpm: Revoluciones por minuto.

SST: Solidos Suspendidos Totales.

RESUMEN

Para el tratamiento de aguas residuales uno de los principales procesos es la coagulación y floculación. Para poder desarrollar este proceso se requiere de la utilización de un agente externo denominado coagulante. Normalmente estos compuestos son de origen químico; sin embargo, en la actualidad muchos de estos generan afectaciones a la salud humana y al medio ambiente. Es por esto, que se han venido estudiando compuestos de origen natural que puedan tener un desempeño similar o mejor con respecto a las remociones que presentan los coagulantes químicos.

En el presente trabajo de grado, se estudió el desempeño de un coagulante de semilla de moringa oleífera para el tratamiento de las aguas residuales de la PTAR El Salitre. Se evaluaron los resultados obtenidos en el agua tratada con el coagulante natural y con el coagulante químico usado por la PTAR (Cloruro Férrico). En esta evaluación se encontró que el coagulante natural presentó mejores resultados en pruebas como pH, Turbiedad, DBO, DQO y SST, en esta última prueba se obtuvo el mejor desempeño con una variación promedio de 62,35%.

Se concluye que la implementación del coagulante natural ofrece una solución a las afectaciones a la salud del ser humano y al medio ambiente, además de proporcionar unos mejores resultados en la mayoría de las pruebas fisicoquímicas. No obstante, los costos de implementación aumentaron en un 32,76% con respecto a la utilización del coagulante químico.

PALABRAS CLAVE: Tratamiento de agua, Aguas Residuales, PTAR, Coagulante, Moringa Oleífera, Cloruro Férrico.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los principales compuestos del planeta y a su vez uno de los recursos más necesarios para la vida del ser humano. A pesar de que este compuesto comprende millones de kilómetros cúbicos, solo un pequeño porcentaje corresponde al agua potable [1]. Es por eso que se busca aumentar el porcentaje de agua residual a la cual se le realiza un tratamiento previo a su vertimiento, con el fin de mejorar las condiciones de los cuerpos acuíferos del planeta.

El proceso de coagulación y floculación, es un proceso de tratamiento primario para aguas residuales, donde se implementan diferentes compuestos químicos dentro de los cuales está el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, que se caracterizan por tener una alta eficiencia, cumpliendo con todos los requerimientos fisicoquímicos y microbiológicos. A pesar de la alta eficiencia que presentan estos compuestos químicos, en muchos casos no se tienen en cuenta las repercusiones que puede llegar a provocar su uso, debido a algunas trazas que quedan en el agua tratada y que ocasionan daños tanto al medio ambiente como a la salud del ser humano [2].

A partir de estas problemáticas expuestas y cumpliendo con la aplicación de la Química Verde en los diferentes procesos industriales, se ha propuesto la implementación de un coagulante natural para el tratamiento de las aguas residuales aprovechando el gran potencial que presentan diferentes productos en los procesos de coagulación.

Este proyecto tiene como objetivo evaluar un coagulante natural a base de la semilla de Moringa Oleífera para el tratamiento de aguas residuales en la PTAR El Salitre. Esta planta de tratamiento es un complejo tecnológico en el cual se recolecta el agua que proviene de la zona norte de la ciudad de Bogotá, la cual llega por medio de un sistema de alcantarillado y canales. En esta planta de tratamiento se dispone de un caudal de 4 m³/s lo que equivale aproximadamente a unos 345.600 m³/día y se realiza un tratamiento primario químicamente asistido de las aguas residuales, donde se llega a remover entre un 30-40% de DBO y un 50-60% de los sólidos.

Además de esto se evaluarán los costos generados en el proceso de coagulación con el coagulante de Moringa a escala de laboratorio, donde se determinará el costo de producción y las pruebas realizadas para la evaluación del mismo con el agua de la PTAR. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó información confidencial suministrada por parte de la planta, por lo tanto, no se encuentra referenciada o anexada en el documento.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Evaluar un coagulante obtenido a partir de la semilla de la Moringa Oleífera para el tratamiento de aguas residuales.

Objetivos Específicos:

- Establecer las condiciones de operación necesarias para el uso del coagulante de semilla de Moringa Oleífera para el tratamiento del agua residual.
- Comparar el desempeño del coagulante de la semilla de Moringa Oleífera respecto a coagulantes tradicionales.
- Analizar los costos del proceso de coagulación con harina de semilla de Moringa.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se encontrará información teórica complementaria y específica, que ayude al lector a comprender de una forma más clara los temas y conceptos que se van a utilizar a lo largo del desarrollo del documento.

1.1. Aguas residuales domésticas

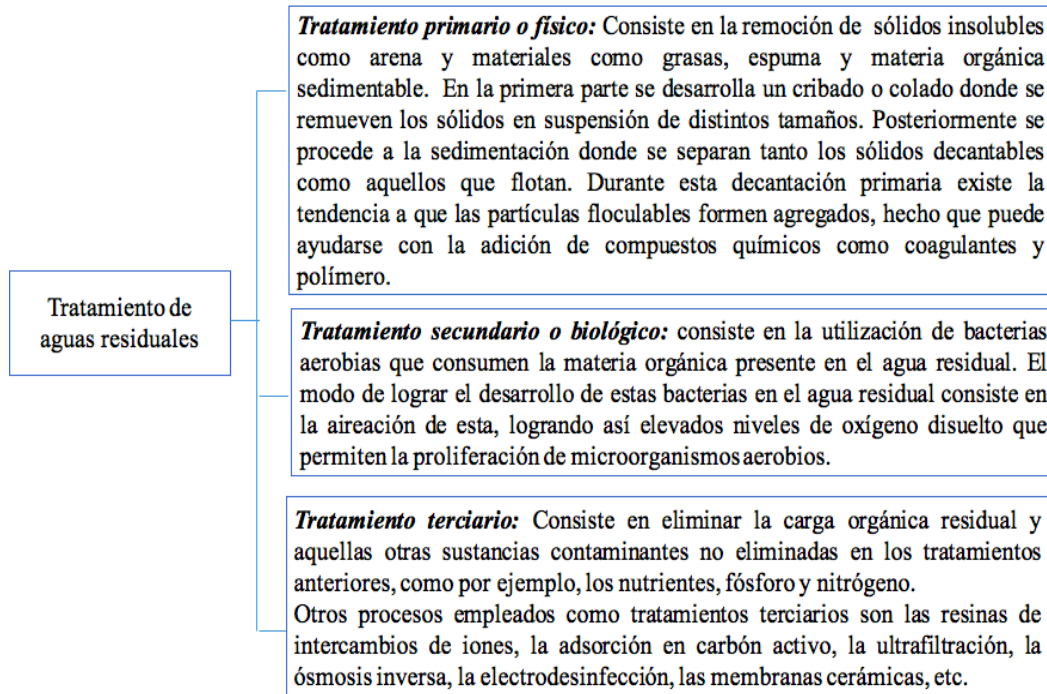
Las aguas residuales domésticas, o aguas negras, son todas aquellas que proceden de actividades del hogar como la limpieza, el aseo personal y las deyecciones del ser humano. Este tipo de agua suele contener una gran cantidad de materia orgánica, microorganismos y residuos de productos de aseo [3].

1.2. Tratamiento de aguas residuales

Es una secuencia de procesos químicos, físicos y biológicos que se le realiza a todo tipo de aguas residuales, con la finalidad de eliminar todos los compuestos o sustancias contaminantes presentes en esta. Puede involucrar procedimientos simples como un asentamiento y filtrado, hasta procesos más complejos con una purificación total del agua. Este proceso se divide en tres fases (tratamiento primario, secundario y terciario) como se puede evidenciar en la figura 1 y su metodología dependerá de las capacidades y/o necesidades que posea la planta de tratamiento [4].

Figura 1.

Tratamiento de aguas residuales.



Nota. La figura describe los diferentes tipos de tratamiento para aguas residuales.

1.3. Coagulación

Es un proceso esencial de los sistemas convencionales de tratamiento de agua y comprende todas las reacciones y mecanismos que dan como resultado la agregación de partículas en el agua que se está tratando. Tiene como objetivos facilitar la eliminación de contaminantes microbiológicos, remover materia orgánica natural y adsorber contaminantes inorgánicos disueltos, mediante la desestabilización de cargas, de forma que la carga superficial de las partículas en suspensión se modifique para aumentar la adherencia de unas a otras. Para el proceso de desestabilización existen diferentes métodos, dentro de los cuales se pueden mencionar la compresión de doble capa; la neutralización de carga superficial; la adsorción y el puente entre partículas; y, en un caso específico como la electrocoagulación, la aplicación de campos externos [5].

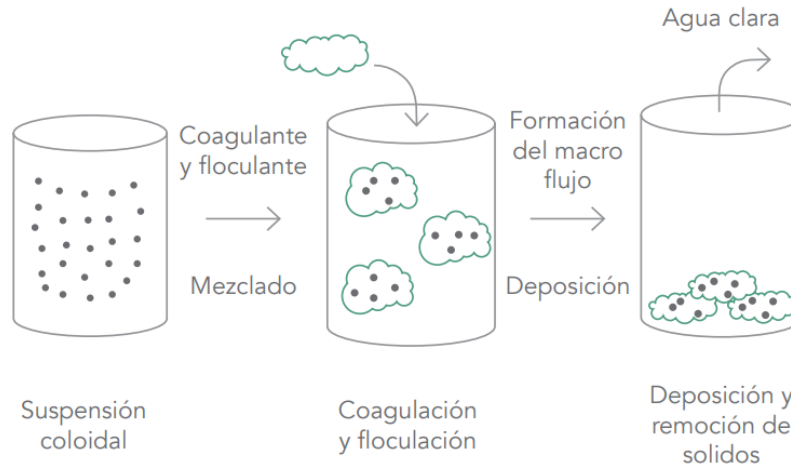
1.4. Coagulante

Corresponde a sustancias sintéticas o naturales que al adicionarse al agua son capaces de producir una reacción química, especialmente con la alcalinidad del agua, para formar un precipitado, o una

aglomeración de las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, como se representa en la figura 2 [6].

Figura 2.

Proceso de Coagulación.



Nota. La figura representa el proceso de coagulación. Tomado de: Desarrollo de un coagulante orgánico a partir de la semilla de Moringa para la empresa comercial DACETEX LTDA. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7789/1/6151576-2020-I-IQ.pdf>

1.5. Coagulantes químicos

Tradicionalmente son los más utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Incluyen compuestos inorgánicos de aluminio o hierro, como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso, policloruro de aluminio y cloruro férrico. Su desempeño varía dependiendo del rango de pH específico en el que tiene una mínima solubilidad y una máxima precipitación. Además, se deben tener en cuenta las características químicas del agua cruda para su selección y dosificación [7].

1.6. Cloruro Férrico

Es un compuesto químico electrolito que posee una alta solubilidad con el agua, el cual es utilizado a escala industrial para el proceso de coagulación. se elabora formando un complejo de cloruro de polialuminio con polímero. Por lo tanto, la estructura molecular se agranda; se mejora la capacidad de neutralización y adsorción de puente. Es un químico ideal para tratar agua cruda altamente

contaminada con materia orgánica, así como agua de baja temperatura y baja turbiedad o baja temperatura y alta turbiedad [8].

1.7. Coagulante natural

Es una fuente alternativa con un gran potencial debido a su biodegradabilidad y a que no genera daños al medio ambiente en comparación con coagulantes inorgánicos y polímeros sintéticos. En su mayoría son de origen vegetal, con presencia de agentes coagulantes activos como carbohidratos, taninos y proteínas. Algunas especies vegetales sobre las que se han realizado estudios son las semillas de maíz, Nirmali, *Jatropha curcas*, frijol común, *Cassia obtusifolia*, entre otros. El material que ha recibido mayor grado de atención corresponde a las semillas de Moringa oleífera gracias a sus componentes activos, los cuales son proteínas catiónicas de diferentes pesos moleculares, además de su capacidad antimicrobiana [9].

1.8. Moringa Oleífera

Es un árbol originario de la India que se puede cultivar en regiones con un clima tropical y subtropical por todo el mundo. Posee una gran importancia debido a su alta aplicabilidad en varios sectores como el alimenticio, medicinal, cosmético, tratamiento de aguas, debido a sus grandes beneficios y propiedades [10].

1.8.1. Cultivo de Moringa

El árbol de Moringa se ha adaptado bien a los trópicos y subtrópicos. Las características del árbol son: altura entre 10-12 m, tronco leñoso y recto de diámetro entre 20-40 cm, rápido crecimiento alcanzando en un año 5 m de altura, algunas variedades son anuales y pueden alcanzar a vivir hasta 20 años. Además, posee copa abierta tipo paraguas y presenta gran resistencia a plagas y enfermedades.

El cultivo del árbol aporta gran cantidad de nutrientes al suelo, al tiempo que lo protege de factores externos como la erosión y la desecación. Se puede propagar de manera sexual o asexual. Puede cultivarse en suelos pobres con escasez de lluvia. Además de esto, es de rápido crecimiento y fácilmente cultivable en zonas secas del trópico, con un rendimiento de 500 000 plantas por hectárea. Requiere precipitación anual entre los 250 mm y 4 000 mm, temperatura entre 15 °C -

30 °C y suelos con pH entre 4,5 - 9, arenosos o con un buen sistema de drenaje. Puede soportar períodos cortos de sequía y con temperaturas hasta los 0 °C, aunque con reducción en su crecimiento [11].

Cuando se siembra la moringa como árbol para que produzca semillas, en el primer año se obtienen 1 000 kilos por hectárea. En el segundo, 2 000 kg. A partir del tercer año en adelante produce 3 000 kg por hectárea hasta los 25 años, cuando finaliza su vida útil [12].

1.8.2. Cultivo de Moringa en Colombia

En Colombia se han adelantado cultivos del árbol bajo estas condiciones en los departamentos de Bolívar, Tolima, Meta y Antioquia, principalmente para fines de comercialización en agricultura y como complemento nutricional de la dieta de la población [11].

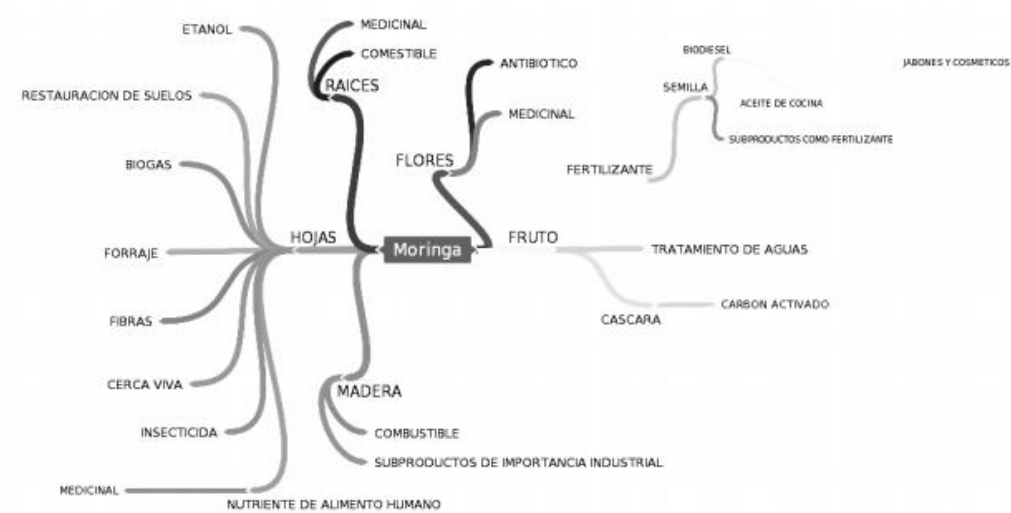
La moringa se adapta a las condiciones climatológicas y suelos de la región Caribe colombiana. Haciendo de esta un potencial importante para cultivar, debido a que conserva sus propiedades nutricionales de origen e incluso puede llegar a superarlas [13].

1.8.3. Usos de la Moringa

En la figura 3 se pueden observar los diferentes usos de la Moringa respecto a sus partes. Hay que destacar que, aunque predominan los usos medicinales o comestibles, también se ha usado en la parte ambiental (tratamiento de aguas y remediación de suelos) y como combustible, pero aún falta aprovechar muchas partes del árbol.

Figura 3.

Usos de la moringa.



Nota. La figura representa la variedad de usos y aplicaciones que posee la Moringa. Tomado de: El árbol moringa (*Moringa oleifera* Lam.): una alternativa renovable para el desarrollo de los sectores económicos y ambientales de Colombia. <https://cutt.ly/3nC3njZ>

En los últimos cinco años se realizaron estudios que han demostrado las actividades biológicas de los compuestos de la moringa en el organismo, como se muestra en la figura 4. En esta se encuentran las partes del árbol que beneficia cada efecto descrito y el tipo de estudio en el cual se determinó este.

Figura 4.*Propiedades de la moringa.*

Parte del árbol	Efecto descrito	Tipo de estudio
Semillas	Antiinflamatorio en colitis ulcerosa	In vivo (rata)
Hoja	Antioxidante en esteatosis hepática	In vivo (ratón)
Hoja	Antioxidante directo e indirecto	In vitro (hepatocitos ratón)
Corteza	Inmunomodulador/antiinflamatorio vascular	In vitro (monocitos humanos)
Hojas	Antiinflamatorio vascular	In vitro (macrófagos ratón)
Semilla	Antioxidante hepático en dietas grasas	In vivo (ratón) e in vitro (hepatocitos ratón)
Semilla	Control de la diabetes mellitus tipo 1	In vivo (rata)
Hoja	Control de la diabetes mellitus tipo 2	In vivo (humanos)
Hoja	Protector en intoxicación por arsénico	In vivo (ratón)
Hoja	Disminuye la fatiga muscular	In vivo (ratas)
Semilla y vaina	Antimicrobiano bacterias multirresistentes	Cultivo (Gram+ y Gram-)
Semilla	Antimicrobiano en biofilms	Biofilms
Hoja	Antimicrobiano bacterias multirresistentes	Cultivo (Gram-)
Hoja, semilla, tallo, vaina y flores	Antimicrobiano (<i>Vibrio spp.</i> y <i>E. coli</i>)	En agua contaminada
Semilla	Antimicrobiano (<i>E. coli</i> y <i>B. subtilis</i>)	En agua contaminada
Hoja	Antiséptico de manos (<i>E. coli</i>)	In vivo (humanos)

Nota. En la tabla se muestran las propiedades descritas de *Moringa oleífera* en los diferentes estudios realizados en los últimos cinco años. Tomado de: *Moringa oleífera*:

Revisión sobre aplicaciones y usos en alimentos. <https://cutt.ly/YmMcZXr>

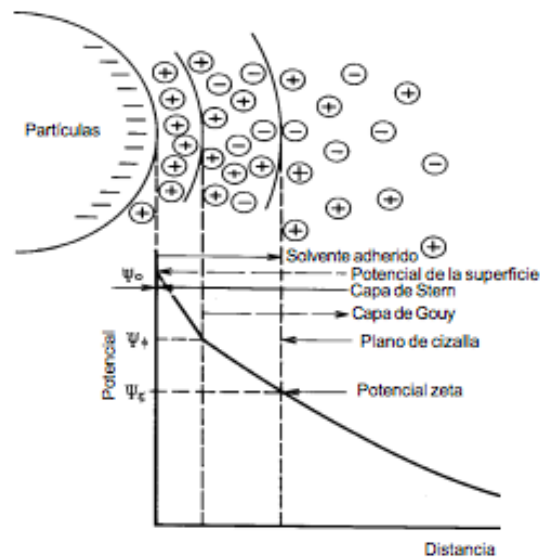
1.9. Mecanismos de la Coagulación

La desestabilización de las partículas suspendidas en el agua se puede lograr por los siguientes mecanismos fisicoquímicos:

1.9.1. Compresión de la doble capa

Generalmente ocurre cuando las partículas coloidales con carga negativa son atraídas por iones positivos a una zona de interfaz; estas cargas forman “la doble capa”. Se realiza una desestabilización y coagulación, basada en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión. La repulsión entre las partículas coloidales disminuye, al aumentar los iones con carga opuesta derivados del coagulante. Si la distancia que separa a las partículas es superior a la distancia máxima a la cual comienza la floculación, entonces las partículas no se atraen [14]. Como se muestra en la figura 5.

Figura 5.
Compresión de la doble capa.



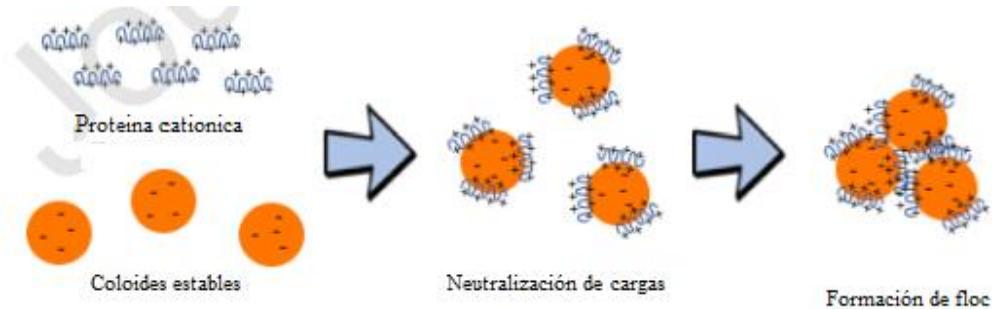
Nota: Modelo de la doble capa difusa de Stern-Gouy
Tomado de: Coagulación. Cap. 4.
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf>

1.9.2. *Absorción y neutralización de cargas*

Este mecanismo ocurre cuando el coagulante y las partículas contaminantes tienen cargas opuestas, para que estas logren ser desestabilizadas. En la figura 6 se muestra el proceso de coagulación, en el cual las partículas tienden a aglomerarse por la influencia de las fuerzas de Van der Waals, permitiendo la desestabilización de la suspensión coloidal. Cuando se adiciona un exceso de coagulante al agua a tratar, se produce la reestabilización de la carga de la partícula; esto se puede explicar debido a que el exceso de coagulante se absorbe en la superficie de la partícula, las partículas volverán a dispersarse produciendo una carga invertida a la carga original [9].

Figura 6.

Mecanismo de Coagulación.



Nota: Mecanismo de coagulación/ floculación de la proteína catiónica de la semilla de MO.

Tomado de: A review of Moringa oleífera seeds in water treatment: Trends and future challenges. doi: 10.1016/j.psep.2020.09.044

1.9.3. Atrapamiento de Partículas dentro de un Precipitado

Este proceso consiste en la desestabilización de las partículas coloidales presentes en el agua al adicionar la cantidad suficientes de coagulante, formando un conglomerado de partículas sólidas al cual se le denomina *floc*. La presencia de aniones y de partículas coloidales permiten que la formación del precipitado sea más acelerada, lo cual quiere decir que en una mayor concentración de partículas en suspensión se puede llegar a necesitar una menor cantidad de coagulante [15].

1.9.4. Adsorción y Puente

Se da principalmente con agentes de cadena larga y alto peso molecular que pueden interactuar, o absorber, partículas coloidales presentes en el agua. La molécula de polímeros absorbe los contaminantes creando un “puente”, formando flóculos más grandes y fuertes. Este tipo de mecanismo es eficaz teniendo en cuenta la cantidad requerida de coagulante, ya que si se tienen bajos valores de este puede llegar a no formar los suficientes contactos de puente y con valores altos se podría producir una reestabilización en la suspensión [9].

1.10. Test de jarras

Es un procedimiento experimental que se emplea para determinar la dosificación más efectiva de coagulante para un agua específica, donde se verifica especialmente variación de pH y formación de *floc*. Permite tener un control en el proceso de la coagulación y floculación en una planta de tratamiento, especialmente cuando la calidad del agua fluctúa rápidamente. Este procedimiento

también se puede utilizar con el objetivo de determinar las velocidades de sedimentación para el diseño de los tanques y conocer el potencial de agua cruda para una filtración directa [16].

1.11. Alcalinidad

Se define como la capacidad del agua para neutralizar ácido o aceptar protones, indica el cambio del pH al añadir cantidades del ácido. En aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos; se expresa en miligramos de carbonato cálcico equivalente por litro ($\text{mg CaCO}_3/\text{L}$) [17].

1.12. DBO

La Demanda Biológica de Oxígeno, o DBO, es una de las principales pruebas realizadas en el tratamiento de aguas residuales. Se aplican métodos estandarizados en el laboratorio, con el fin de determinar los requerimientos relativos de oxígeno que presentan las aguas residuales; consiste en medir el oxígeno consumido durante un proceso de incubación previamente especificado, para la degradación bioquímica de la materia orgánica. Puede permitir la medición del oxígeno utilizado para oxidar formas reducidas de nitrógeno, a menos que se emplee un inhibidor químico. Hay diferentes aspectos que pueden influir en la medición de dicha prueba, como el pH, la toxicidad, la aclimatación de la semilla y la temperatura [18].

1.13. DQO

La Demanda Química de Oxígeno es la cantidad de oxidante químico que se necesita para poder oxidar los materiales contenidos en el agua y se expresa en $\text{mg de O}_2/\text{L}$. Cuantifica la cantidad de materia orgánica total susceptible de oxidación química (biodegradable y no biodegradable) que hay en una muestra líquida y se utiliza para establecer el nivel de contaminación. Es un método aplicable tanto en aguas naturales como residuales. Para este análisis, se emplea generalmente un agente químico fuertemente oxidante en un medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. Se deben considerar las posibles interferencias provocadas por la existencia de sustancias inorgánicas que pueden ser susceptibles a una oxidación como los sulfuros, sulfitos o yoduros y sustancias orgánicas como carbohidratos, fenoles, lejías residuales, productos proteicos, entre otros [19].

1.14. Sólidos suspendidos totales

La determinación de sólidos suspendidos totales es una variable en la cual se determina la cantidad de materia que permanece como residuo después de un proceso de secado, realizado a una temperatura de 103 - 105 °C. Este valor incluye el material no disuelto que es la porción de sólidos retenidos en el filtro y sus unidades son mg ST/L [20].

1.15. Proteínas coagulantes-activas

El extracto de semilla de moringa posee una gran cantidad de proteínas con una alta actividad coagulante dentro de las cuales están MO 2.1, MO 3.1, MO 4.1, además de lectinas como Cmol y WSMol que poseen una actividad coagulante similar al sulfato de aluminio. Por otro lado, al purificar el componente activo del coagulante a partir de la semilla de la moringa con cloruro de sodio se desarrolla un polielectrolito orgánico compuesto principalmente de grupos aminos e hidróxidos [10].

En diversos estudios se ha mostrado que estas proteínas cuyo tamaño es de aproximadamente 60 aminoácidos [21], poseen una alta actividad coagulante por medio del mecanismo de neutralización de cargas; brindando buenos resultados al ser aplicado en el tratamiento de aguas. En el caso de las lectinas se encontró que estas poseen una alta similitud a las proteínas floculantes de la semilla de moringa, por lo tanto, pueden ser usadas para el desarrollo de un coagulante de origen natural [22].

1.16. Métodos de extracción de Coagulante

En cuanto a los métodos de extracción del coagulante en la literatura se encuentran 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, entre otras [23].

En el proceso de extracción salina se ha demostrado que la fuerza iónica que se presenta en la solución, permite mejorar la eficiencia en la extracción del componente activo de la semilla [24].

2. CONDICIONES DE OPERACIÓN

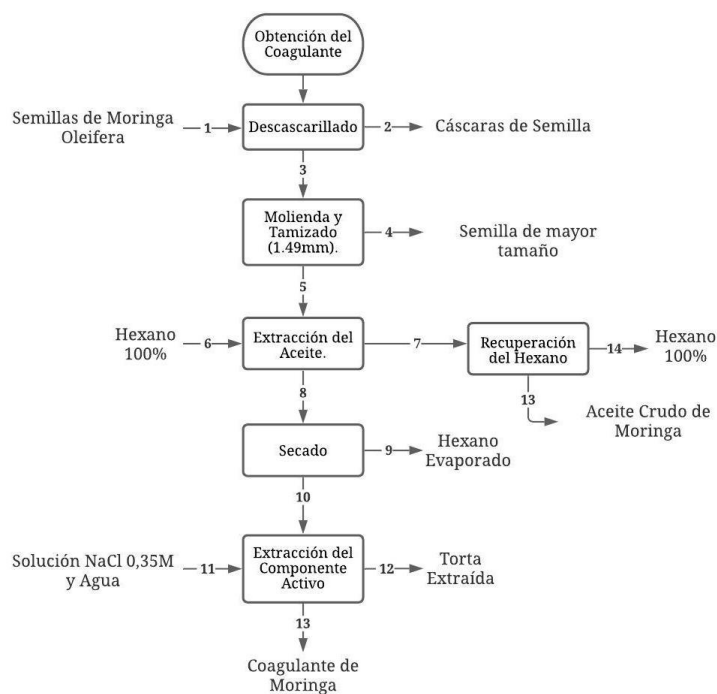
En este capítulo se van a explicar los procesos y operaciones unitarias correspondientes al proceso de obtención del coagulante a base de semilla de moringa oleífera incluyendo la caracterización del mismo; además de esto se van a describir las condiciones de operación óptimas para su aplicación en el agua de la PTAR El Salitre.

2.1. Obtención del coagulante

Para la obtención del coagulante a partir de la semilla de la Moringa Oleífera se realizaron procesos de molienda, tamizado, extracción del componente activo y filtración; tal como lo muestra la figura 7 y los cuales se describirán a continuación. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que las semillas escogidas para la investigación son semillas maduras con un color café oscuro, ya que presentan una mejor acción coagulante [25]. Los balances de materia obtenidos de cada proceso se pueden encontrar en el anexo 1.

Figura 7.

Obtención del coagulante.



Nota: Proceso de obtención del coagulante con corrientes de salida y cantidades.

2.2. Proceso de Descascarillado

En este proceso se le retira la cáscara a la semilla debido a que el porcentaje másico de proteínas contenido en la semilla descascarada aumenta en aproximadamente un 10%, como lo muestra Ndabigengesere en su investigación [23]. Este proceso se desarrolla de forma manual con el fin de disminuir los costos de producción, ya que en la actualidad se puede dar de manera automática disminuyendo el tiempo de operación.

Después de esto, se realiza un lavado de las semillas con el fin de eliminar todas las impurezas y trazas provenientes del proceso de descascarillado; por último, se secan las semillas en un horno de mufla a una temperatura de 104 °C por una hora. Este proceso se realizó para disminuir la humedad en la semilla y de esta manera obtener un mejor rendimiento en el proceso de obtención del coagulante, la semilla que se implementó en el desarrollo del proyecto contiene un porcentaje de humedad de 38% aproximadamente. En la figura 8 se muestra el antes y el después del descascarillado.

Figura 8.

Semilla de Moringa Oleífera.



Nota: Semilla de Moringa Oleífera con cáscara a mano izquierda y descascarada a mano derecha.

2.3. Proceso de Molienda y Tamizado

El proceso de molienda se realizó en un molino industrial Siemens con el fin de obtener un polvo de semilla, que posteriormente se llevó a un proceso de tamizado mediante un tamiz de 16” U.S Standard Sieve series 21”, del cual se logra una harina fina con un tamaño de partícula uniforme,

inferior a los 1,49 milímetros, como se muestra en la figura 9. El objetivo de esta etapa es facilitar la disolución entre el polvo y la solución de cloruro de sodio.

Figura 9.

Harina de Semilla de Moringa Oleífera.



Nota: Harina de Semilla de Moringa Oleífera con aceite después del proceso de tamizado.

2.4. Extracción del Aceite

Se estima que la semilla de Moringa Oleífera posee aproximadamente un 40% de su peso en aceite; por eso se requiere realizar una extracción del aceite, ya que este no posee ninguna actividad coagulante y podría comprometer el agua tratada debido a los lípidos residuales que puede generar [26].

El proceso de extracción del aceite se llevó a cabo mediante el proceso de Soxhlet, como se ve en la figura 10, en el cual se utilizó como agente extractor el hexano (C_6H_{14}). Este agente posee un fácil manejo, bajo punto de ebullición, fácil recuperación con pérdidas mínimas, bajo costo y fácil disponibilidad con respecto a otros solventes como éter de petróleo, cloroformo, acetona, entre otros [23].

Se emplearon 150 mL de agente extractor y 15 g de harina de moringa por cada extracción. Se implemento esta cantidad de hexano para permitir el correcto desarrollo del proceso. El proceso Soxhlet alcanzó un promedio de 14 a 15 sifones por cada extracción, como se especifica en la investigación de Castellanos y Marín [24]. Posteriormente, la torta residual fue llevada a una mufla a 99 °C por una hora aproximadamente, con el fin de lograr la evaporación del agente extractor presente en la torta, ya que este tiene un punto de ebullición de 69 °C y se esperaba una torta residual seca. La torta seca resultante (Figura 11) obtuvo un peso promedio de 10,71 g.

Figura 10.

Montaje de Soxhlet.

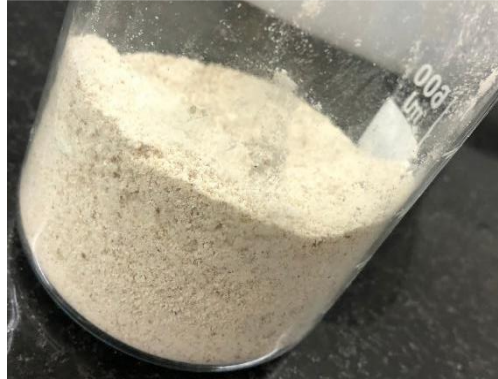


Nota: Montaje de Soxhlet para la extracción del aceite en la harina de semilla de MO.

En total se realizaron 22 extracciones por medio del Proceso Soxhlet, de las cuales se obtuvieron aproximadamente 236 g de harina de semilla de Moringa seca.

Figura 11.

Harina de Semilla de Moringa Oleífera.



Nota: Harina de Semilla de Moringa Oleífera sin aceite después del proceso de Soxhlet y secado.

2.5. Recuperación del Hexano

La fase líquida resultante del Soxhlet se llevó a un proceso de recuperación del agente extractivo por medio de una destilación simple, como se muestra en la figura 12, la cual consiste en hervir una mezcla líquida que se encuentra normalmente en disolución y posteriormente condensar los vapores que se han generado, donde el componente más volátil, el hexano, se va a recoger en el proceso de condensación y el compuesto no volátil (Aceite de Moringa) se va a mantener en el matraz de destilación [27].

Figura 12.

Montaje de recuperación de hexano.



Nota: Montaje de recuperación de hexano para la extracción del aceite.

En total se recuperaron 2 174 mL de hexano de los 3 300 mL que se utilizaron en el proceso de la extracción del aceite y se produjeron aproximadamente 200 mL de aceite crudo de moringa.

2.6. Extracción del componente activo

Para la extracción del componente activo del coagulante se realizó una disolución de agua y cloruro de sodio (NaCl) 0,35 M a la cual se le agregó el polvo de semilla de moringa con una concentración de 70 g/L. Esta disolución se agitó durante un periodo de 30 min a una velocidad de 250 rpm, tal como lo recomienda la investigación de Arango Susana, Ortega Wendy, Álvarez Alejandro y Medina José [28]. Posteriormente, se desarrolló la filtración para separar las dos fases, donde en la fase líquida resultante va a quedar el agente coagulante de interés, como se evidencia en la figura 13.

Figura 13.

Montaje de filtración de coagulante.



Nota: A la izquierda la solución con NaCl con la harina de moringa y a la derecha la filtración del componente activo

Al terminar el proceso de filtración se obtuvieron 2380 mL de coagulante extraído (figura 14). En este extracto se encuentran las proteínas y compuestos con actividad coagulante como MO 2.1, MO 4.1, Cmol, entre otros [10]. En la investigación de Gassenschmidt se realizó la caracterización

de la proteína MO 2.1, donde se muestra que esta proteína presenta 60 aminoácidos en su estructura y que contiene una gran cantidad de glutamina, arginina y prolina en su secuenciación [29].

Adicionalmente en otros estudios se determinó que el extracto de semilla de moringa puede generar una reducción en los huevos de helminto en el agua, además de presentar una actividad antibacteriana [30].

Figura 14.

Coagulante de Semilla de MO.



Nota: Coagulante obtenido después de filtración.

2.7. Condiciones de Operación del Coagulante

Para establecer las condiciones de operación óptimas del coagulante a base de semilla de moringa se realizaron diferentes pruebas por medio de un test de jarras, en las que se modificó la dosificación del coagulante. Este proceso se realizó con el agua de la PTAR El Salitre, la cual proviene de la parte norte de la ciudad de Bogotá.

2.7.1. Caracterización del Coagulante

Para la caracterización del coagulante se evaluaron algunas propiedades fisicoquímicas del coagulante tales como pH, densidad, conductividad, absorbancia y turbidez. El resultado de estas propiedades se muestra en la tabla 1 a continuación.

Tabla 1.

Caracterización del Coagulante de Moringa.

Parametros	Resultados
Densidad (g/mL)	1,06
Turbidez (NTU)	759,75
Absorbancia (nm)	0,99
pH	5,11
Conductividad (μS)	16,49

Nota: Propiedades fisicoquímicas del coagulante a base de semilla de Moringa.

2.7.2. Dosis de coagulante de moringa

Para la determinación de la dosis de coagulante, se manejó un intervalo de 3,5 a 15 mL y se tuvieron en cuenta los resultados de las pruebas fisicoquímicas realizadas, las cuales se van a especificar en el siguiente capítulo. En la tabla 2 se puede observar el rango de dosis escogidas de coagulante y la determinación de la concentración del coagulante en (mg/L) por medio de la ecuación 1 [31].

Ecuación 1.

Dosis de coagulante.

$$Dosis = \frac{Concentración \left(\frac{mg}{L} \right) \times Vol. Agua a tratar \times 1000}{Concentración del coagulante}$$

Ecuación 2.

Concentración de coagulante.

$$Concentración = \frac{70 \text{ gr}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = 70000 \text{ ppm}$$

- Concentración del coagulante: 70 000 ppm
- Volumen de agua a tratar: 1 Litro

Tabla 2.

Concentración de Coagulante.

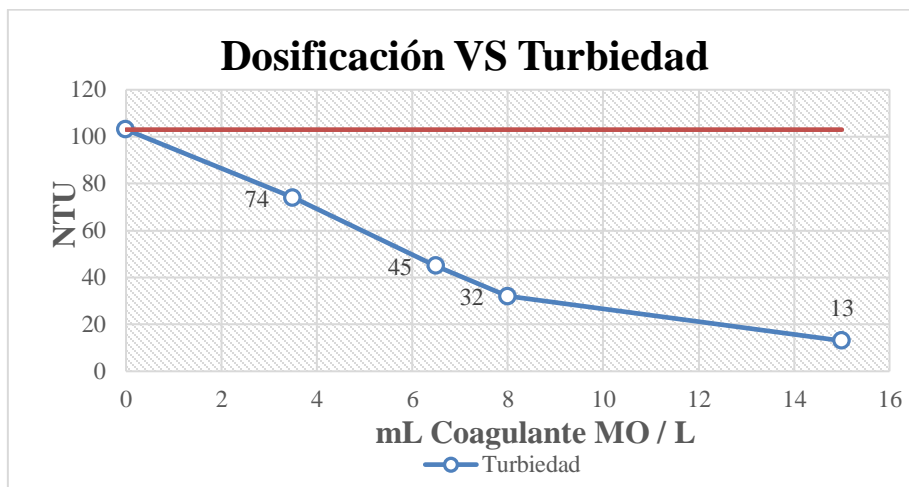
Dosis (mL)	Concentración (mg/L)
3,5	245
4	280
4,5	315
5	350
5,5	385
6	420
6,5	455
7	490
7,5	525
8	560
15	1 050

Nota: Concentración de coagulante correspondiente a la dosificación.

Para la determinación de la dosis óptima se evaluaron los parámetros fisicoquímicos del agua tratada con las diferentes dosificaciones utilizadas. Los resultados de las pruebas realizadas se muestran en el anexo 2. A partir de estos resultados se escogieron dos pruebas determinantes: Turbiedad y DBO. Para definir el rango de dosificación con el mejor desempeño. Los resultados de estas pruebas se muestran en la figura 15 y 16, respectivamente.

Figura 15.

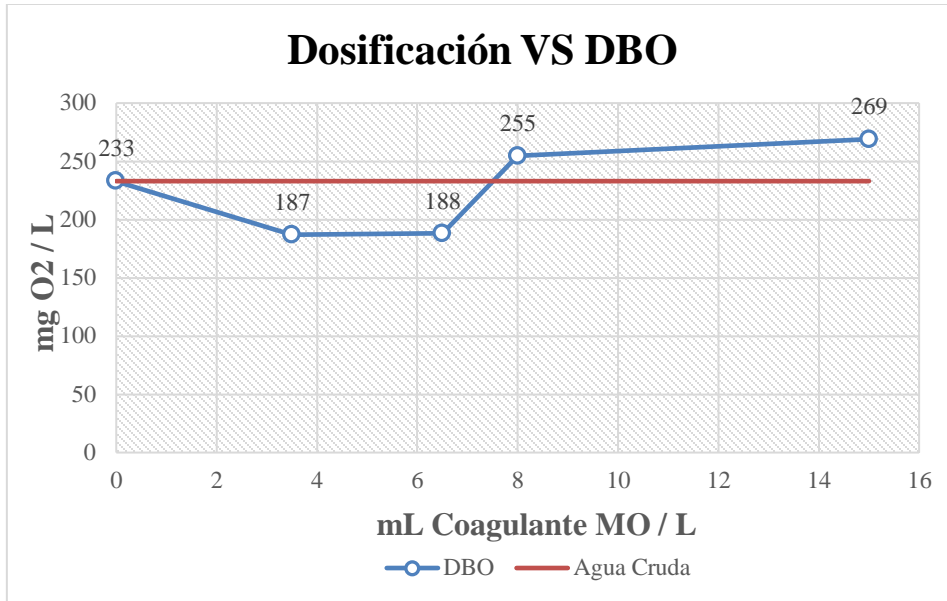
Dosificación vs Turbiedad.



Nota: Comportamiento de la turbiedad con aumento de la dosificación.

Figura 16.

Dosificación vs Demanda Biológica de Oxígeno.



Nota: Comportamiento de la DBO con aumento de la dosificación.

Con estos resultados se puede evidenciar que en cuanto a la remoción de la turbiedad su comportamiento es directamente proporcional, mostrando que al aumentar la dosificación del coagulante se va a aumentar la remoción de este parámetro. Mientras que en el caso de la DBO después de una dosificación de 6,5 mL/L se presenta una tendencia a aumentar la Demanda Biológica de Oxígeno, obteniendo un valor mayor al presentado al aplicar una dosis de 8 mL/L en el agua sin tratamiento previo. Este aumento en la DBO puede estar ocasionado por una mayor concentración de materia orgánica, que a su vez genera una menor cantidad de oxígeno disuelto [40].

Por lo tanto, de acuerdo con estos resultados se determinó que para el tratamiento del agua residual de la PTAR El Salitre se va a manejar una dosificación entre 5 a 6,5 mL/L.

2.7.3. Test de Jarras

El ensayo de jarras se utiliza en las plantas de tratamiento de aguas con la finalidad de simular el proceso de tratamiento del agua, manejando a escala de laboratorio los procesos de clarificación, coagulación, floculación y sedimentación [32]. Este proceso se realizó con un test de jarras Phipps

& Bird, el cual se muestra en la figura 17 y con este se evaluó el comportamiento de los coagulantes utilizados.

El procedimiento que se empleó en este ensayo es el determinado por parte de la PTAR El Salitre que consta de una mezcla rápida a 150 rpm durante un periodo de 2 minutos y la adición del coagulante se va a hacer a lo largo de la mezcla rápida en el minuto 1:45; posteriormente, se realiza una mezcla lenta durante 10 minutos en la cual se disminuyen las revoluciones hasta 40 rpm, simulando el proceso de floculación; finalmente se realiza un proceso de sedimentación donde se retiran los agitadores de paletas y las jarras se dejan en reposo por un periodo de 6 minutos. Este proceso se realizó con unas condiciones similares a las propuestas por parte de Rojas Sahara, Sánchez Adán y Sánchez Joaquín [33].

Figura 17.

Equipo de Test de Jarras.



Nota: Procedimiento de test de jarras

Para llevar a cabo este trabajo y darle cumplimiento al primer objetivo, se determinó la dosificación óptima del coagulante a usar en la PTAR El Salitre y se comparó con el cloruro férrico, el cual es el coagulante utilizado en este momento por parte de la planta. Con esto se busca determinar los mejores rendimientos y la eficiencia del coagulante. Basta comentar que en este caso no se evaluó una variación del pH debido a que el agua cruda utilizada en la planta es un agua residual cuyo pH no varía de manera significativa, esto se puede evidenciar en los datos históricos recopilados hasta el año 2020 que maneja la PTAR El Salitre donde se muestra que el rango de pH presentado por el agua residual varía entre 7.03 y 7.65.

Sin embargo, se ha demostrado que la efectividad del coagulante de moringa está influenciada por el pH, especialmente cuando se encuentra alrededor del pH óptimo de 7. El coagulante demostró que es eficiente dentro de ciertos rangos de pH de 5 y 7, pues dentro de este rango no se presenta una afectación en el tiempo de formación de flóculos [24].

3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LAS MUESTRAS

En este capítulo se presenta la evaluación del coagulante propuesto a partir de la semilla de Moringa Oleífera para el tratamiento de las aguas residuales en la PTAR El Salitre. Durante el funcionamiento de esta se han evaluado diferentes coagulantes como el sulfato de aluminio, policloruro de aluminio, cloruro férrico, entre otros; y con base en estas pruebas se escogió el cloruro férrico como coagulante, ya que este ha generado unos mejores resultados satisfaciendo las necesidades de la planta; lo que ha llevado a que se siga utilizando en la actualidad por parte de la PTAR El Salitre.

Para el desarrollo de este proyecto se decidió realizar una comparación con el coagulante a base de semilla de moringa y el coagulante utilizado en la actualidad en la PTAR El Salitre, con el fin de evaluar si se presentan resultados óptimos para una posible implementación por parte de la PTAR. Para esta comparación se evaluó el desempeño de ambos coagulantes con respecto al pH, la turbidez, la conductividad, la alcalinidad, DQO, DBO y SST.

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos nombrados anteriormente se realizaron seis mediciones durante tres meses evaluando el comportamiento de estos parámetros con diferentes condiciones iniciales; para cada prueba se tomó en cuenta una medición del agua cruda previa al tratamiento y una medición para el agua tratada tanto con el coagulante propuesto como con el coagulante químico usualmente utilizado.

En cuanto al agua cruda, se tomó una muestra del agua residual proveniente de los tornillos de Arquímedes a la entrada de la PTAR, la cual no presenta ningún tratamiento previo. Para la medición del agua tratada con el cloruro férrico $FeCl_3$, se tomó la muestra del agua tratada proveniente de una estación de muestreo que se encuentra al finalizar el proceso de coagulación y floculación, la cual se toma de manera automática. Y en el caso del agua tratada con el coagulante a base de semilla de moringa, se evaluaron las diferentes muestras del test de jarras trabajadas con el rango de dosificación obtenido en el capítulo anterior y se escogió la muestra que presentó una mayor eficiencia en el proceso de coagulación y floculación. Las condiciones iniciales del agua cruda se encuentran en el anexo 4, donde también se indican los resultados de las pruebas

fisicoquímicas de cada prueba y la dosificación de cada uno de los coagulantes que se aplicó a cada prueba. En el anexo 3 se muestran algunos datos del clima referentes a los días en los cuales se realizaron las pruebas.

3.1. Determinación de pH

El pH del agua residual se determinó mediante un medidor de pH portátil modelo HQ411d, el cual se muestra en la figura 18. Este dispositivo es un instrumento básico sin electrodos, su temperatura tiene medidas de °C y °F, posee una alta fiabilidad, ya que presenta una exactitud de $\pm 0,002$ pH además de facilidad en su uso [34].

Figura 18.

Medidor de pH portátil.



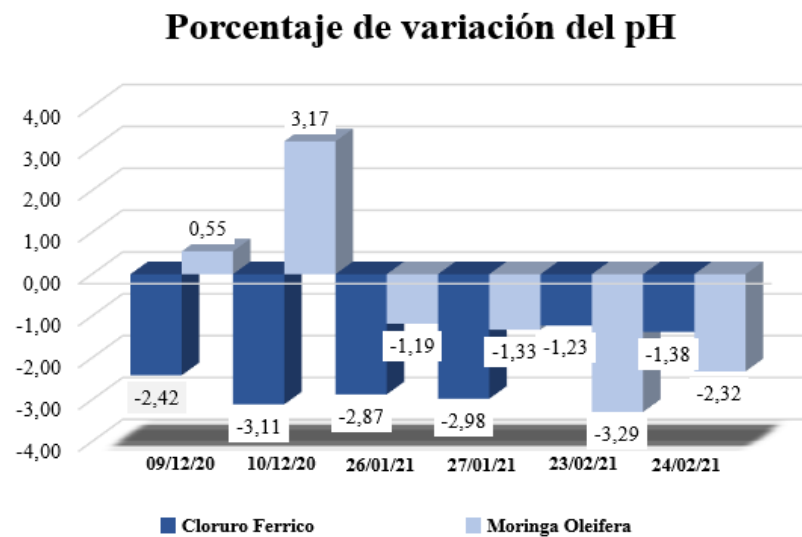
Nota: Medidor de pH portátil modelo HQ411d.

En la figura 19 se pueden identificar los porcentajes de variación en el pH, obtenidos con una dosis promedio de 25 mg/L y 420 mg/L de cloruro férrico y coagulante de moringa, respectivamente. Es posible observar que para el coagulante natural la mayor variación correspondió al mes de febrero, donde el pH varió un 3,29% y la menor variación fue de 0,55% en el mes de diciembre. Respecto al cloruro férrico presentó una mayor variación en el mes de diciembre con un valor de 3,11% y la menor en el mes de febrero con 1,23%.

Por consiguiente, al realizar un promedio de las variaciones en el pH, el coagulante de moringa tuvo una variación promedio de 1,98% y el cloruro férrico 2,33%; con esto se puede evidenciar que el rendimiento del coagulante natural es mejor, ya que lo que se busca en este caso es tener la mínima variación posible de pH al realizar el tratamiento con cualquier coagulante. Además de esto, se puede comprobar también que la variación de la dosificación del coagulante dentro de los rangos de operación manejados, no afecta de manera significativa a la variación del pH.

Figura 19.

Gráfica de variación de pH.

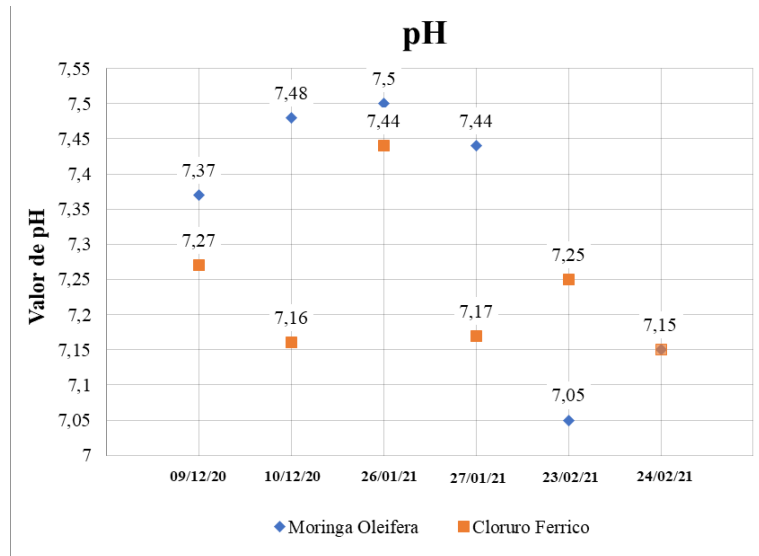


Nota: Gráfica del porcentaje de variación pH del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

En la figura 20 se encuentran los resultados del pH obtenido en el agua tratada con el coagulante natural y el coagulante químico. Con el coagulante natural se presenta un rango mayor en los resultados obtenidos (7,05 - 7,5); sin embargo, la variación que se presenta con ambos coagulantes es irrelevante, ya que se está obteniendo un agua tratada con un pH neutro, por este motivo es que no se ve la necesidad de implementar un proceso de estabilización o neutralización de esta propiedad.

Figura 20.

Gráfica de pH.



Nota: Gráfica de resultados de pH del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

3.2. Determinación de Turbiedad

Para el cálculo de la turbiedad del agua residual se utilizó un medidor modelo 2100N TURBIDIMETER (figura 21), el cual tiene diferentes modos de medición como NTU, EBC, Nephelo; su máxima humedad de funcionamiento es de 90%, este es empleado en los laboratorios de la PTAR El Salitre.

Figura 21.

Turbidímetro portátil.



Nota: Medidor de turbiedad portátil 2100N TURBIDIMETER.

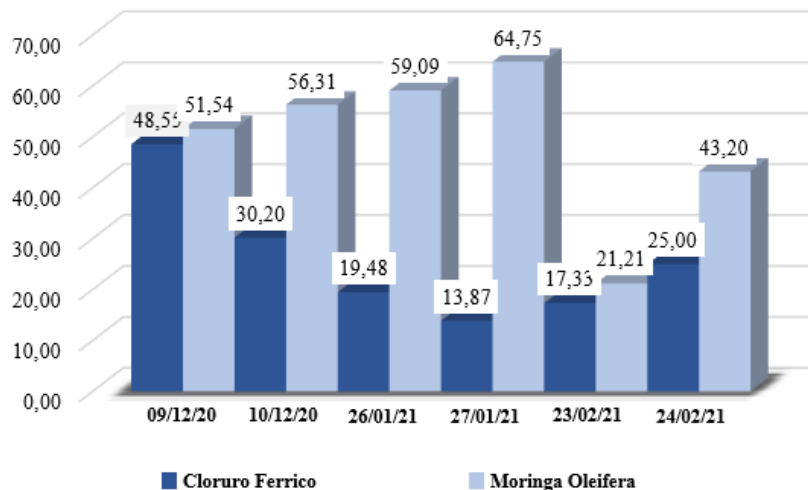
En la figura 22 se pueden identificar los porcentajes de remoción en la turbiedad, obtenidos con una dosis promedio de 25 mg/L y 420 mg/L de cloruro férrico y coagulante de moringa, respectivamente. Para el coagulante natural la mayor remoción correspondió al mes de enero, donde este parámetro alcanzó una remoción de 64,75%. La menor remoción fue de 21,21% en el mes de febrero. Respecto al cloruro férrico se presentó una mayor remoción en el mes de diciembre con un valor de 48,55% y la menor en el mes de enero con 13,87%.

Por consiguiente, al realizar un promedio de las remociones de la turbiedad, el coagulante de moringa tuvo una remoción promedio de 49,35% y el cloruro férrico 25,74%, observándose que el rendimiento del coagulante natural es mejor, ya que lo que se busca en este caso es tener la máxima variación posible de turbiedad al realizar el tratamiento con cualquier coagulante. Esta mayor remoción por parte del coagulante natural se puede dar por la presencia de un polielectrolito orgánico el cual se obtuvo al momento de realizar la extracción del componente activo con el NaCl. Adicionalmente, se puede evidenciar que la variación de la dosificación del coagulante bajo los rangos de operación manejados afecta de manera significativa a la remoción de la turbiedad.

Figura 22.

Gráfica de remoción de turbiedad.

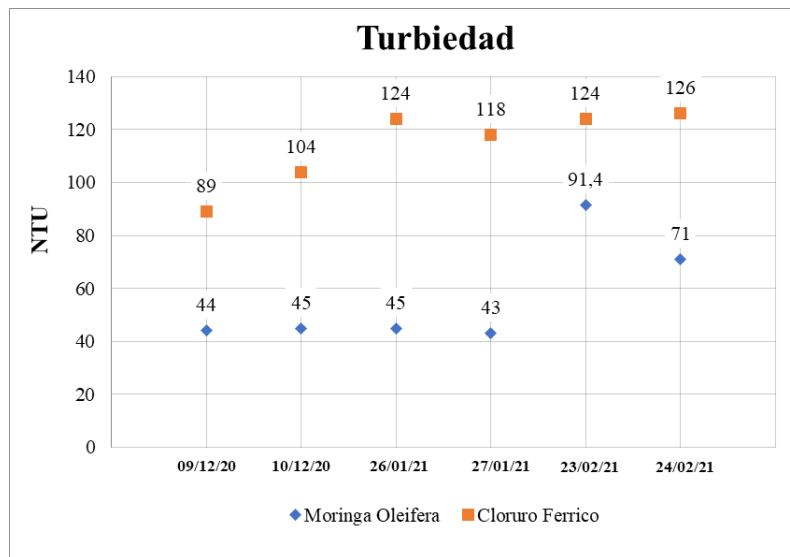
Porcentaje de remoción de la Turbiedad



Nota: Gráfica del porcentaje de remoción de la turbiedad del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

En la figura 23 se muestran los resultados de la turbiedad del agua tratada con los dos coagulantes estudiados. Se puede observar que por parte del coagulante natural y como se demostraba antes con los porcentajes de remoción, hubo una mejoría significativa del 23,61% en esta prueba; sin embargo, se muestra que en las últimas dos mediciones se dio un aumento en los resultados correspondientes al coagulante natural.

Figura 23.
Gráfica de turbidez.



Nota: Gráfica de turbiedad del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

3.3. Determinación de Conductividad

Para el cálculo de la conductividad del agua residual se utilizó un medidor de conductividad portátil denominado HQ14d, como se muestra en la figura 24. Este conductímetro cuenta con una precisión de $\pm 0,5\%$ ($1 \mu\text{S}/\text{cm} - 200 \text{mS}/\text{cm}$), posee una alta fiabilidad, además de que presenta una alta flexibilidad y facilidad en su uso [35]. Cabe señalar que la medición de la conductividad se realizó con una temperatura promedio de 19°C .

Figura 24.

Conductímetro portátil.



Nota: Medidor de conductividad portátil HQ14d.

En la figura 25 se muestran los porcentajes de variación en la conductividad del agua, obtenidos tanto con el coagulante químico utilizado por parte de la PTAR, como con el coagulante natural propuesto. Es posible evidenciar que para el coagulante natural la mayor variación correspondió al mes de febrero, donde la conductividad varió un 33,40% y la menor variación fue de 24,12% en el mes de diciembre. Respecto al cloruro férrico presentó una mayor variación en el mes de febrero con un valor de 4,98% y la menor en el mes de febrero con 0,34%.

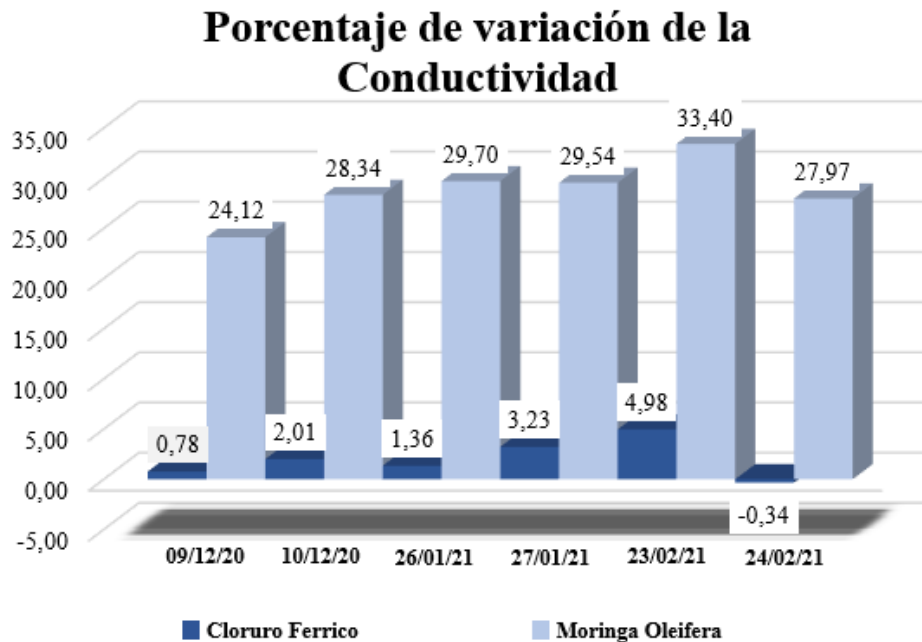
Se evidenció que la utilización del coagulante natural si modifica de manera significativa la conductividad, generando una variación promedio de 28,85%. Mientras que al utilizar el cloruro férrico se generó una variación promedio de 2,12% lo cual no implica una variación significativa en dicho parámetro.

La alta variación de la conductividad cuando se emplea el coagulante a partir de semilla de moringa se puede deber a la utilización del cloruro de sodio en la extracción del componente activo, ya que la salinidad puede transportar una carga eléctrica y hacer que el agua sea capaz de generar electricidad. Y esto debido a que la conductividad es directamente proporcional a la salinidad [36].

Además de esto, se puede evidenciar también que el cambio en la dosificación del coagulante, generó un aumento significativo en dicho parámetro.

Figura 25.

Gráfica de variación de la conductividad.

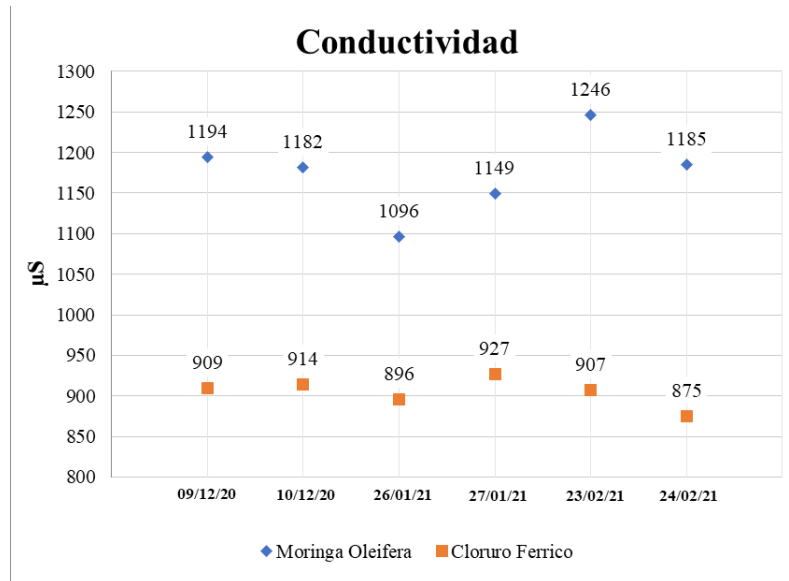


Nota: Gráfica del porcentaje de variación de conductividad del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

En la figura 26 se muestran los resultados de la conductividad del agua tratada con los dos coagulantes estudiados. Se puede observar que por parte del coagulante natural se presentaron valores superiores respecto al coagulante químico, debido a la acción del NaCl en el coagulante natural como se indicó anteriormente. Sin embargo, el comportamiento de los resultados no refleja una variación drástica en el agua tratada con los coagulantes estudiados.

Figura 26.

Gráfica de conductividad.



Nota: Gráfica de conductividad del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

3.4. Determinación de Alcalinidad

Para el cálculo de la alcalinidad del agua residual se utilizó un medidor de alcalinidad tipo TA 20 PLUS, el cual se muestra en la figura 27. Este titulador presenta un volumen de 20 mL, tiene una tolerancia de error de dosificación de $\pm 0,003$ mm, alta flexibilidad y facilidad en su uso. Cabe señalar que por razones externas al desarrollo del proyecto solo se pudo realizar la medición completa de esta prueba en el mes de diciembre.

Figura 27.

Titulador de alcalinidad portátil.



Nota: Medidor de alcalinidad portátil
TA 20 PLUS.

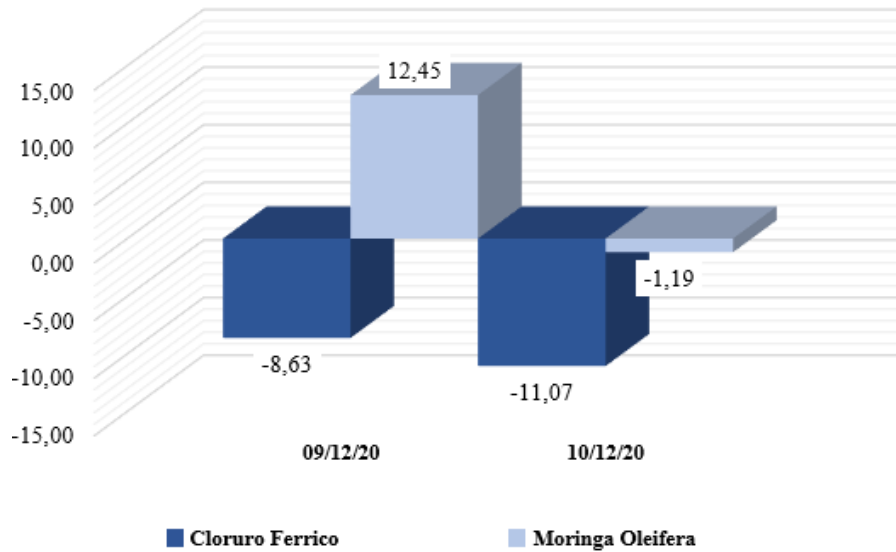
En la figura 28 se puede identificar los porcentajes de variación en la alcalinidad de las pruebas realizadas. En estas pruebas se observa que con el coagulante natural se presentó la mayor variación, la cual corresponde a un aumento del 12.45%. También podemos evidenciar que en con la utilización de FeCl_3 se presenta una disminución en ambas muestras, mientras que en las muestras del coagulante natural se presenta un aumento 12.45% y una ligera disminución de 1.19%. Este comportamiento en la implementación del coagulante natural se puede ver ocasionado ya que la moringa oleífera contiene diferentes compuestos que promueven el aumento de la alcalinidad, como calcio, magnesio y potasio.

Al realizar un promedio de las variaciones en la alcalinidad, el coagulante de moringa tuvo una variación promedio de 6,95% y el cloruro férrico 9,85%. Con esto se puede evidenciar que el rendimiento del coagulante químico es mejor, ya que lo que se busca en este caso es tener la máxima variación posible de la alcalinidad y un menor valor en esta variable al realizar el tratamiento.

Figura 28.

Gráfica de la variación de la alcalinidad.

Porcentaje de variación de la Alcalinidad

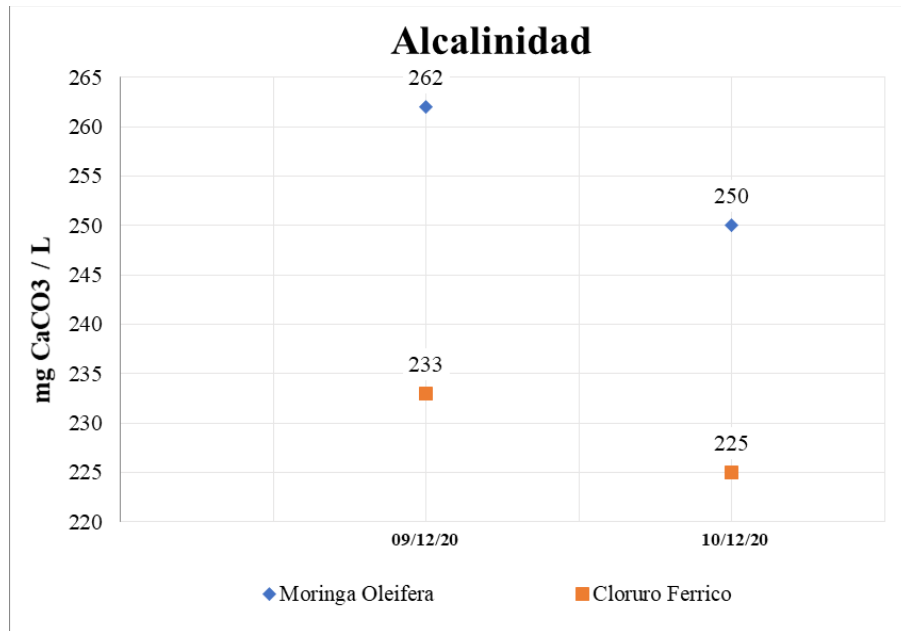


Nota: Gráfica del porcentaje de variación de la alcalinidad del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

En la figura 29 se muestran los resultados del agua tratada con el coagulante de moringa y con el cloruro férrico. Se puede observar en ambas mediciones se presentaron valores superiores con el coagulante natural estudiado, este comportamiento se puede atribuir a los compuestos que presenta la semilla de moringa, como se comentaba anteriormente.

Figura 29.

Gráfica de alcalinidad.



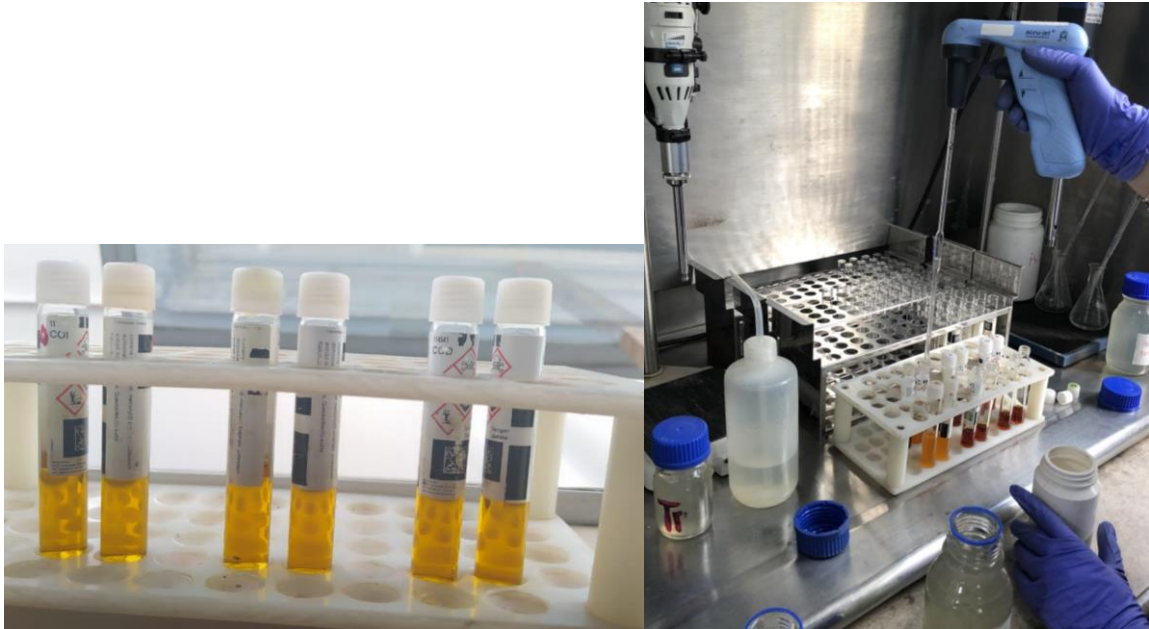
Nota: Gráfica de la alcalinidad del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

3.5. Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para la determinación de la DQO se utilizó un método de reflujo cerrado y volumetría por parte de la PTAR, en el cual se realizaron dos soluciones, la primera de ácido sulfúrico con sulfato de mercurio y la segunda de dicromato de potasio con sulfato de plata; a estas soluciones se les agregó 3 mL de la muestra de agua como se puede observar en la figura 30. Posteriormente, estas soluciones se llevaron a un termociclador a una temperatura de 148 °C durante 2 horas y finalmente se realizó una titulación con sulfato ferroso amoniacal [37].

Figura 30.

Prueba de DQO.



Nota: Soluciones de cada prueba a mano izquierda y la aplicación de agua a cada solución a mano izquierda.

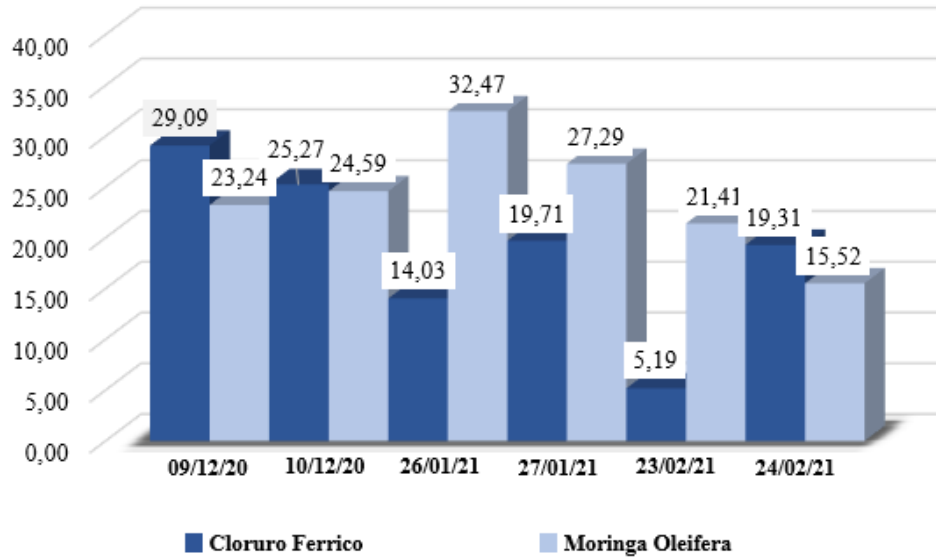
En la figura 31 se identifican los porcentajes de remoción en la DQO del agua, obtenidos tanto con el coagulante químico utilizado por parte de la PTAR, como con el coagulante natural propuesto. Para el coagulante natural la mayor variación correspondió al mes de enero, donde la DQO disminuyó un 32,47% y la menor variación fue de 15,52% en el mes de febrero. Respecto al cloruro férrico presentó una mayor variación en el mes de diciembre con un valor de 29,09% y la menor en el mes de febrero con 5,19%.

Es claro que la utilización del coagulante natural modifica el DQO, generando una variación promedio de 24,08%. Mientras que con el cloruro férrico se generó una variación promedio de 18,76%. Se debe tener en cuenta que con valores altos de DQO y DBO, la remoción es más fácil sin importar el coagulante que se implemente, lográndose mayores porcentajes de remoción. Además de esto, se puede evidenciar también que la variación de la dosificación del coagulante, afectó de manera significativa el aumento en la variación de DQO.

Figura 31.

Gráfica de remoción de la Demanda Química de Oxígeno.

Porcentaje de remoción de la DQO



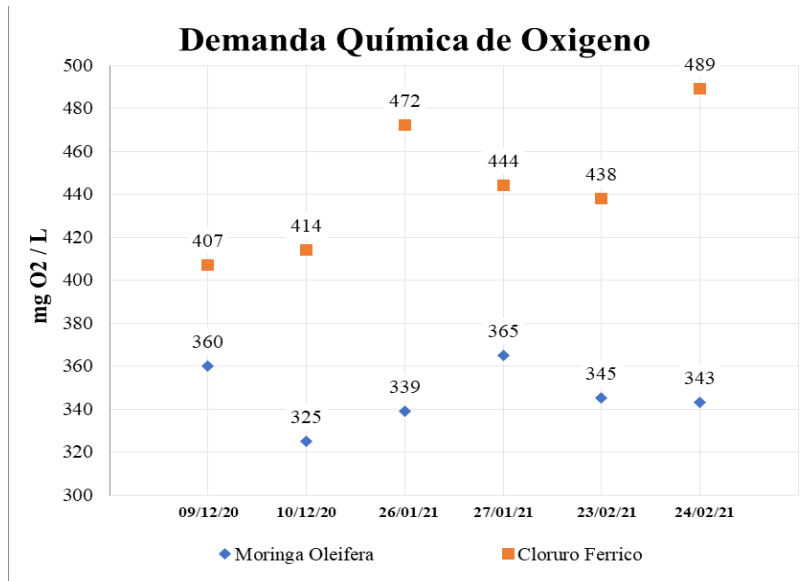
Nota: Gráfica del porcentaje de remoción de la DQO del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

En la figura 32 se muestran los resultados del agua tratada con el coagulante de moringa y con el cloruro férrico. Se evidencia de forma preliminar que, en este parámetro, el coagulante químico convencional presentó un mejor comportamiento, dado que se busca una reducción en dicho parámetro.

Para la determinación de la naturaleza de los contaminantes se evaluó la relación de DBO_5/DQO que presentan los valores del agua tratada con ambos coagulantes, donde generó un resultado promedio de 0,61. De acuerdo con lo que plantea Orozco Carmen para valores $DBO_5 / DQO < 0,2$ el agua residual presenta contaminantes de naturaleza orgánica no biodegradable y para valores $DBO_5 / DQO > 0,6$ el agua residual presenta contaminantes de naturaleza orgánica biodegradable [38]. Por lo tanto, se puede concluir que en el agua residual predominan los contaminantes de naturaleza orgánica biodegradable.

Figura 32.

Gráfica de la DQO.



Nota: Gráfica de la DQO del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

3.6. Determinación de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

Para la determinación de la DBO se siguió con la metodología DBO₅, esto significa que se tiene un periodo de incubación de cinco días y una temperatura de 20°C ± 1°C. Para las botellas Winkler, se tiene un volumen de 300 ml de capacidad con tapa hermética, las cuales, evitan el ingreso de oxígeno al recipiente, estas botellas se muestran en la figura 33 [39].

Figura 33.

Prueba de DBO.



Nota: Botellas Winkler a mano izquierda, control de la temperatura con el oxímetro a mano derecha.

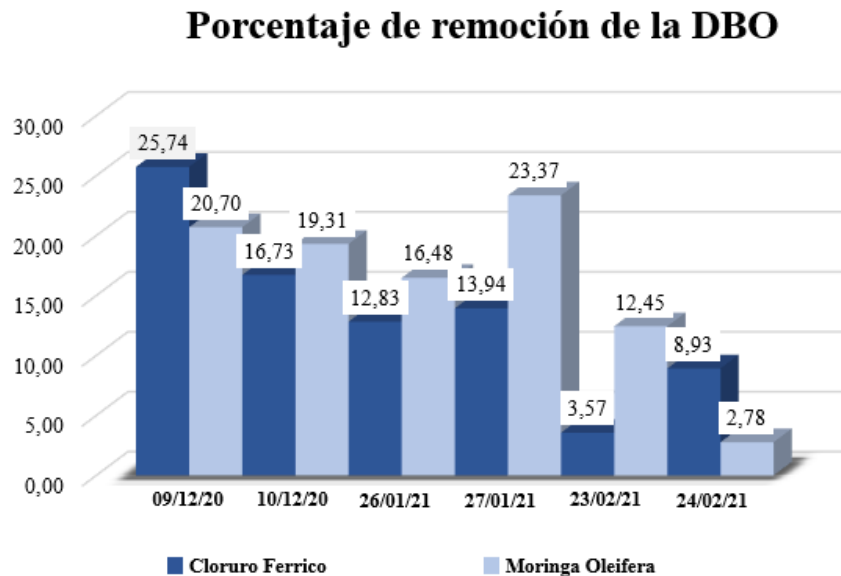
En la figura 34 se muestran los porcentajes de variación en la demanda bioquímica de oxígeno del agua, obtenidos tanto con el coagulante químico utilizado por parte de la PTAR, como con el coagulante natural propuesto. Se puede ver que para el coagulante natural la mayor variación correspondió al mes de enero, donde la DBO varió un 23,37% y la menor variación fue de 2,78% en el mes de febrero. Respecto al cloruro férrico presentó una mayor variación en el mes de diciembre con un valor de 25,74% y la menor en el mes de febrero con 3,57%.

Con el uso del coagulante a base de semilla de moringa se obtuvo una remoción promedio de 15,85%, mientras que con el cloruro férrico como coagulante se obtuvo una remoción promedio de 13,62%. Con esto se puede evidenciar que, aunque la mayor remoción (25,74%) se obtuvo con el cloruro férrico, el coagulante natural propuesto generó en promedio unos mejores resultados.

En el caso de la implementación de un coagulante de uso natural se puede generar una baja remoción en la DBO, ocasionada por una mayor concentración de materia orgánica, que a su vez genera una menor cantidad de oxígeno disuelto [40].

Figura 34.

Gráfica de remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno.

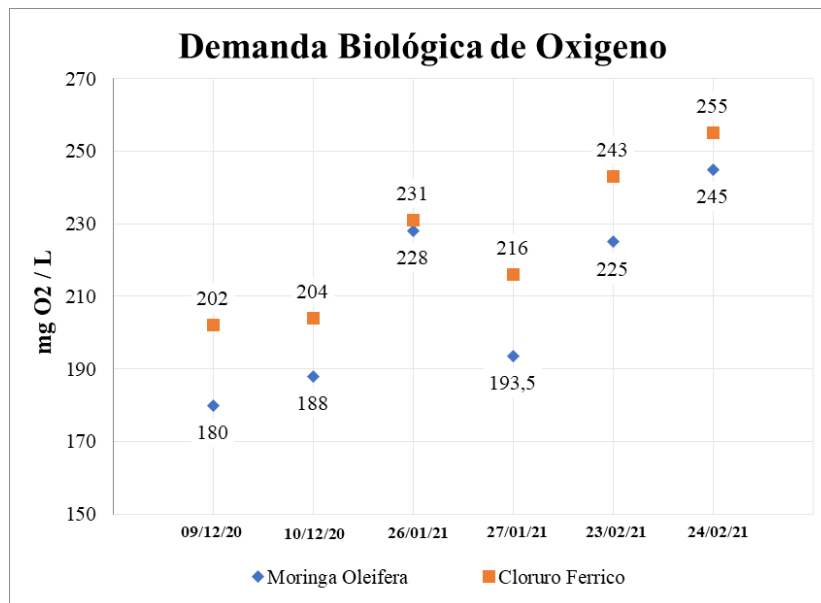


Nota: Gráfica del porcentaje de remoción de la DBO del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

En la figura 35 se muestran los resultados de la Demanda Biológica de Oxígeno del agua tratada con los dos coagulantes estudiados. Se puede observar un rendimiento similar por parte de ambos coagulantes, la menor variación en esta prueba se puede ver ocasionada por la utilización del coagulante natural como se comenta anteriormente. Sin embargo, se concluye que este presentó unos mejores resultados en dicha prueba.

Figura 35.

Gráfica de DBO.



Nota: Gráfica de la DBO del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

3.7. Determinación de Sólidos Suspendedos Totales (SST)

Para la determinación de los sólidos suspendidos totales se utilizó un método gravimétrico que se basa en la retención de partículas sólidas en un filtro por el cual pasa una mezcla homogénea del agua tratada, como se muestra en la figura 36. Posteriormente el papel filtro se lleva a un horno a una temperatura de 103-105 °C para secar la muestra [41].

Figura 36.

Prueba de SST.



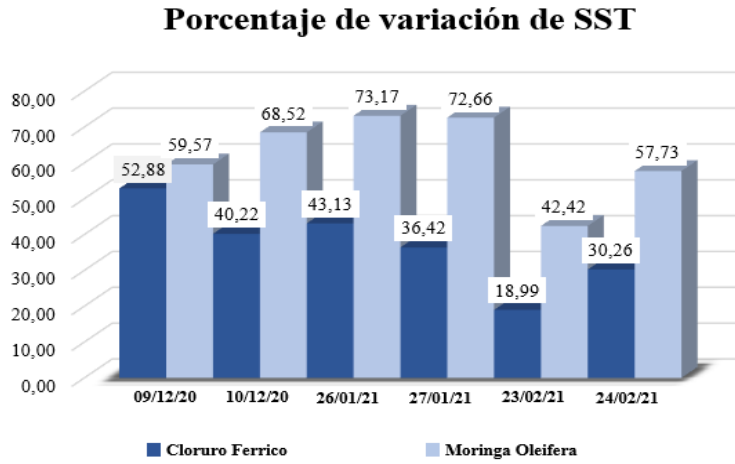
Nota: Resultado de SST de las muestras a mano izquierda, equipo para el desarrollo de SST a mano derecha.

En la figura 37 se puede identificar los porcentajes de variación en los SST, obtenidos con una dosis promedio de 25 mg/L y 420 mg/L de cloruro férrico y coagulante de moringa, respectivamente. Para el coagulante natural la mayor variación correspondió al mes de enero, donde los SST tiene una variación de 73,17% y la menor variación fue de 42,42% en el mes de febrero. Respecto al cloruro férrico presentó una mayor variación en el mes de diciembre con un valor de 52,88% y la menor en el mes de febrero con 18,99%.

Por consiguiente, al realizar un promedio de las remociones de SST, el coagulante de moringa tuvo una remoción promedio de 62,35% y el cloruro férrico 36,98%, con esto se puede evidenciar que el rendimiento del coagulante natural es mejor, ya que lo que se busca en este caso es tener la máxima variación posible de SST al realizar el tratamiento con cualquier coagulante. Adicionalmente, se puede evidenciar que la variación de la dosificación del coagulante bajo los rangos de operación manejados, afectó de manera significativa a la remoción de SST.

Figura 37.

Gráfica de variación de Sólidos Suspendedos Totales.

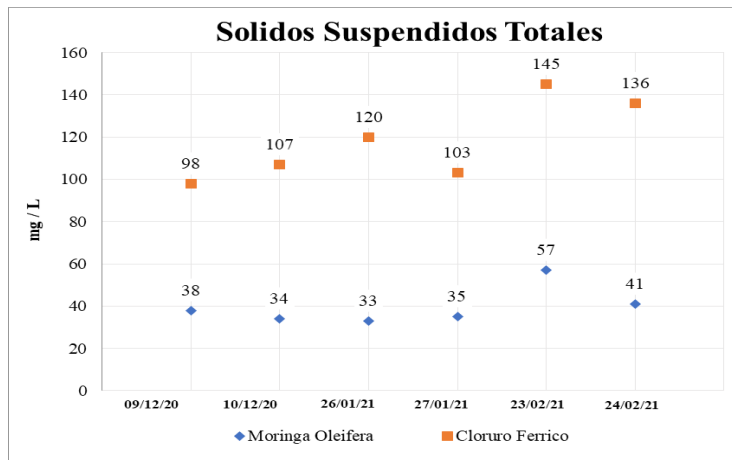


Nota: Gráfica del porcentaje de variación de SST del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

En la figura 38 se muestran los resultados de los Sólidos Suspendedos Totales del agua tratada con ambos coagulantes. Se puede observar que por parte del coagulante natural, y como se demostraba antes con los porcentajes de remoción, hay una mejoría significativa en esta prueba; sin embargo, se evidencia en las últimas dos mediciones un aumento en los resultados correspondientes al coagulante natural.

Figura 38.

Gráfica de SST.



Nota: Gráfica de SST del agua tratada con cloruro férrico y moringa oleífera.

En los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas del tratamiento realizado al agua residual de la PTAR con el coagulante natural propuesto y comparándolos con los resultados que presenta el tratamiento con el coagulante químico utilizado, se puede evidenciar que el coagulante natural presenta un mejor comportamiento en las pruebas de pH, Turbiedad, DBO, DQO y SST. No obstante, en la prueba de conductividad se presentó un aumento en todas las pruebas realizadas, superando el máximo valor presentado en los datos históricos de la PTAR el cual es de 949 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Sin embargo, se puede determinar que el coagulante natural a base de semilla de moringa oleífera presenta un mejor desempeño en general para el tratamiento de las aguas residuales de la planta de tratamiento PTAR El Salitre.

Por otro lado, en las mediciones realizadas en el mes de febrero se presentan variaciones en pruebas como pH, Turbiedad, SST, DBO. Estas variaciones se pueden atribuir a la vida útil del coagulante, tal como lo plantea Camargo María y colaboradores en su investigación, donde se encontró que después de los tres meses de su producción el coagulante disminuye su eficiencia en el proceso de coagulación [42]. Esto también se puede evidenciar en los anexos 4 y 5, donde se muestran los datos obtenidos de las pruebas realizadas para el agua cruda y tratada y los resultados de los porcentajes de remoción. Con base a los datos presentados en el anexo 3 no se evidencia una relación en los resultados de las pruebas realizadas con el nivel de precipitación o la variación de las temperaturas.

4. ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se presenta la evaluación del costo aproximado que tendría el tratamiento del agua residual en la PTAR El Salitre con la implementación del coagulante natural a base de semilla de moringa oleífera comparado con el coagulante químico (cloruro férrico) usado en la actualidad por parte de la PTAR. Esta evaluación se va a realizar con un caudal de 34 560 m³/día, el cual corresponde al 10% de la demanda de la planta de tratamiento, debido a la baja oferta de la materia prima para la producción del coagulante. Se calcula un eventual valor comercial para el coagulante natural propuesto, teniendo en cuenta la cantidad de coagulante necesario, los costos de la materia prima necesaria y los costos de producción del coagulante.

Primero, se determina la cantidad de coagulante natural necesario para tratar el agua a partir de la ecuación 3, teniendo en cuenta la dosificación promedio de coagulante de moringa, la cual corresponde a 420 mg/L y la cantidad de agua que se va a tratar.

Ecuación 3.

Cantidad de Coagulante natural.

$$\text{Cantidad de Coag. Natural} = \text{Dosificación} \times \text{Cantidad de Agua}$$

$$\text{Cantidad de Coag. Natural} = 0,42 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times 34\,560 \text{ (m}^3/\text{día)}$$

$$\text{Cantidad de Coag. Natural} = 14\,515 \text{ (kg/día)}$$

4.1. Costo de materia prima

Para este ítem, se calcularon los insumos requeridos en el proceso de producción del coagulante. En la tabla 3 se muestra la cantidad de insumos necesarios para el tratamiento del agua de la PTAR. El valor total de los insumos se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación 4.

Valor total insumos.

$$\text{Valor total} = \text{Valor comercial} \times \text{Cantidad}$$

Tabla 3.

Costos de insumos.

Insumos	Valor Comercial	Cantidad	Unidad	Valor total
Semilla de moringa	\$ 2 700	11 507,21	kg	\$ 31 069 478
Nacl	\$ 57 040	235,90	kg	\$ 13 455 736
Hexano	\$ 104 940	6 478,56	L	\$ 679 860 254
Agua	\$ 3 601	13 693,58	m3	\$ 49 322 376
Total				\$ 773 707 724

Nota: Tabla de costos de insumos teniendo en cuenta el caudal de agua.

Para este análisis se utilizó un valor para la semilla de moringa oleífera, presentado por parte de la empresa mexicana Bioleafy [43], el cual fue evaluado con la tasa de cambio del día 1 de mayo de 2021; para el costo del hexano y el cloruro de sodio analítico, se realizó una cotización con la empresa Blamis como se muestra en el anexo 6. Para el costo del agua se tomó en cuenta el costo de metro cubico industrial en el mes de diciembre del año 2020 \$ 3 601 COP/m³. [44]

4.2. Costos de producción

En la estimación de los costos de producción se consideraron cada una de las etapas del proceso de producción del coagulante, las cuales se muestran en la figura 7. Para el cálculo del consumo energético total se tuvo en cuenta el consumo energético de cada proceso y el valor comercial industrial de la energía para el mes de enero del año en curso \$630,40 COP/kWh, como se muestra en la ecuación 5 [45].

Ecuación 5.

Valor energético total

$$\text{Valor energético total} = 630,40 \text{ COP/KWh} \times \text{Consumo Energético}$$

Para establecer el costo energético del proceso, se determinaron los equipos necesarios para la ejecución de cada etapa, los cuales se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.
Equipos por etapa

Etapa de Proceso	Equipo
Descascarillado	Molino Descascarador, Modelo: PBSK-14
Molienda	Molino triturador, Modelo: M6FFC-800
Tamizado	Tamizador Industrial, Modelo: ZEUS FTI-1500
Extracción del Aceite	Destilador de Aceites Esenciales, Modelo: GLT-EO 3000
Secado	Secador Rotativo Marca; Baichy de 15 Ton
Extracción del Componente Activo	Tanque de Agitación Modelo: PMC-5000L Filtro Prensa, Modelo: Z1000/2000-40U
Recuperación del Hexano	Destilador de Disolventes, Modelo: HR 600-1200

Nota: Equipos por cada etapa del proceso de producción.

Teniendo en cuenta la cantidad de coagulante (kg/día), se prosiguió a hallar la cantidad de kg de semilla de moringa (11 507,21 kg/día) y la cantidad de litros de coagulante/día (13 693,58 L/día). Para escoger los equipos que necesarios para tratar la demanda del 10% del agua de la PTAR.

Se seleccionó un molino descascarador PSBK-12 con una capacidad de 700 kg/h [46]; un molino triturador M6FFC-800 con una capacidad entre 2000-8000 kg/h [47]; un tamizador industrial FTI-1500 con una capacidad de 2100 kg/h [48]; un destilador de aceites esenciales GLT-EO 3000 con una capacidad de 3000 L, cuya calefacción se logra mediante electricidad/gas o vapor [49]; un secador rotativo marca baichy de 15 ton, el cual cuenta con un flujo máximo de temperatura entre 700-750 °C [50]; un tanque de agitación PMC-5000L con capacidad de 5000 L, su método de calefacción puede ser eléctrica o de vapor [51]; un filtro de prensa Z1000/2000- 40U con capacidad 14 740 L y un destilador de disolventes HR 1200 con una capacidad de 1200 L [52].

En la tabla 5 se muestra el valor energético según la potencia de los equipos escogidos y el consumo energético durante un periodo de tiempo determinado para cada etapa del proceso.

Tabla 5.*Costos de producción.*

Costos de Producción				
Proceso	kW	Duración (h)	Consumo (KWh)	Valor total (COP)
Descascarillado	1,50	16,43	24,65	\$ 15 536
Molienda	55,00	1,44	79,20	\$ 49 928
Tamizado	0,53	5,50	2,89	\$ 1 820
Extracción de aceite	156,00	3,83	597,48	\$ 376 651
Recuperación hexano	66,00	5,40	356,40	\$ 224 675
Almacenamiento	-	-	-	-
Secado	11,00	1,00	11,00	\$ 6 934
Agitación	22,00	2,30	50,60	\$ 31 898
Extracción de agente activo	15,00	1,00	15,00	\$ 9 456
Total				\$ 716 899

Nota: Costos de producción correspondiente a cada proceso.

4.3. Cuantificación del valor comercial

Para la determinación del valor comercial del coagulante a base de semilla de moringa se deben tener en cuenta los costos de elaboración y determinar un porcentaje de rentabilidad. En la tabla 6 se muestra el resumen de costos asociados a la elaboración del coagulante para el tratamiento del 10% de las aguas residuales de la PTAR El Salitre.

Tabla 6.*Costos de elaboración.*

	Valor Total
Insumos	\$ 773 707 724
Producción	\$ 716 899
Total	\$ 774 424 623

Nota: Costos de elaboración del coagulante natural de moringa

El valor comercial del coagulante natural se va a calcular por medio de la ecuación 6. Se estableció un porcentaje de rentabilidad del 10%, teniendo en cuenta que se trata de un producto natural, amigable con el medio ambiente, novedoso y que además proporciona una solución para las

problemáticas ambientales, previamente nombradas, que genera la utilización de productos de origen químico.

Ecuación 6.

Valor comercial

$$P = C \times (100/(100 - R))$$

$$P = 774\,424\,623 \times (100/(100 - 10))$$

$$P = 860\,471\,803$$

P: Valor Comercial.

C: Costos de elaboración.

R: Rentabilidad

De esta manera se determinó un precio de venta para el coagulante natural de \$860 471 803 COP, lo cual equivale a \$24 897 COP/m³

4.4. Análisis de Costos

En el desarrollo del análisis de costos del proyecto se evaluará el valor aproximado de la utilización del coagulante químico para el tratamiento del 10% del caudal del agua diaria que maneja la planta. Para determinar la cantidad de cloruro férrico, necesario para el tratamiento del agua se va aplicar la ecuación 3, teniendo en cuenta una dosificación promedio de a 25 mg/L.

$$\text{Cantidad de Cloruro Férrico} = 0,025 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times 34\,560 \text{ (m}^3/\text{día)}$$

$$\text{Cantidad de Cloruro Férrico} = 864 \text{ (kg/día)}$$

El valor de la utilización del coagulante químico en el tratamiento se evaluó con un costo comercial de \$750 120 COP/kg, el cual fue cotizado por la empresa Blamis, como se muestra en el anexo 7.

A continuación, en la tabla 7 se muestra la cantidad de cloruro férrico necesario que fue calculada anteriormente, el valor comercial por kilogramo y el costo total de su implementación.

Tabla 7.
Costo de coagulante químico.

Coagulante Químico (Cloruro Ferrico)	
Cloruro Ferrico por dia (kg)	864,00
Precio del cloruro ferrico (COP/kg)	\$ 750 120
Precio total del cloruro ferrico (COP)	\$ 648 103 680

Nota: Costo de Cloruro Férrico para el tratamiento del agua residual de la PTAR

De esta manera se tiene un costo de cloruro férrico de \$648 103 680, lo cual corresponde a \$18 753 COP/m³. Con este valor se presenta un aumento en los costos de implementación de 32,77% con el costo del coagulante a base de semilla de moringa (\$860 471 803 COP).

Este aumento en los costos con el coagulante natural se debe al aumento en la cantidad de coagulante que se necesita para realizar el tratamiento de los 34 560 m³/día de agua residual en la PTAR.

Basado en estos resultados se concluye que la implementación del coagulante natural no presenta una alta viabilidad debido al aumento de los costos de implementación. Es por esto que para realizar una posible implementación es necesario evaluar una financiación con la ayuda de entidades bancarias y/o inversionistas. No obstante, teniendo en cuenta el desempeño presentado por el coagulante de moringa oleífera en las mediciones de las pruebas fisicoquímicas, este se contempla como una buena solución a los inconvenientes presentados con la utilización de coagulantes químicos para el tratamiento de aguas residuales.

5. CONCLUSIONES

Al desarrollar las mediciones del agua tratada se evidenció que, al aumentar la dosificación del coagulante, se aumentaba el porcentaje de remoción de Turbiedad llegando hasta un valor de 13 NTU. Sin embargo, al realizar la medición de la Demanda Biológica de Oxígeno, se evidencio que al aplicar una dosificación mayor a 7,5 mL/L se pueden obtener resultados mayores al agua sin tratamiento previo. Con esto se logra establecer un rango de dosificación entre 5 a 6,5 mL/L para el tratamiento del agua residual de la PTAR El Salitre, ya que bajo este rango de dosificación se evidencian los mejores resultados en los parámetros fisicoquímicos.

El agua tratada con el coagulante a base de semilla de moringa presentó mejores resultados en las pruebas de pH, Turbiedad, DBO, DQO y SST, siendo la última prueba la que presentó unos mejores resultados con un porcentaje de remoción promedio de 62,35%.

A pesar de que en la mayoría de los parámetros evaluados se vio un comportamiento óptimo, al momento de medir la Conductividad de las aguas tratadas, se evidenció que con el coagulante natural esta variable aumenta significativamente. Estos resultados se pueden deber a la utilización de NaCl en el proceso de extracción del componente activo, lo que podría aumentar la salinidad y a su vez la conductividad.

Basado en el análisis de costos, se encuentra que con la implementación del coagulante natural a base de semilla de moringa el costo para el tratamiento del agua residual que trata la planta en un día se aumenta en un 32,76% con respecto al coagulante químico utilizado por la planta.

Se puede concluir que la implementación del coagulante natural proporciona una solución a las afectaciones presentadas por los coagulantes de origen químico para el ser humano y el medio ambiente. Asimismo, se logran mejores resultados en la mayoría de las pruebas fisicoquímicas, pero se generan unos costos mayores para su implementación en la Planta de Tratamiento de Agua Residual - PTAR El Salitre.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Carrión, “¿Cuánta agua hay en el planeta?”, El Ágora diario del agua, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.elagoradiario.com/agorapedia/cuanta-agua-planeta/#:~:text=La%20Tierra%20tiene%20una%20disponibilidad,35%20millones%20de%20kil%C3%B3metros%20c%C3%ABicos>). [Acceso: noviembre 7, 2020].
- [2] M. Leones, K. Donado, I. Martínez, R. Verbel, M. Eraso, Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleífera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico, Revista UIS Ingenierías, 2018. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018009>. [Acceso: noviembre 7, 2020].
- [3] M. García, J. Pérez, Aguas Residuales Domésticas. [En línea]. Disponible: https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf [Acceso: enero 5, 2021]
- [4] Tratamiento de Aguas Residuales, “¿Qué es el tratamiento de aguas residuales?”, 2020. [En línea]. Disponible: <https://tratamientodeaguasresiduales.net/que-es-el-tratamiento-de-aguas-residuales/#more-4> [Acceso: enero 5, 2021]
- [5] J Edzwald. (2011), Calidad y tratamiento del agua: Manual sobre agua potable, (Sexta edición). [En línea]. Disponible en: <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.uamerica.edu.co/content/book/9780071630115>
- [6] Acoua Tecnología, Lima. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/QnC8Rya>
- [7] J. M. Cogollo Flórez, Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio», DYNA, vol. 78, n.º 165, pp. 18-27, ene. 2011.
- [8] Amoquimicos Colombia S.A.S, Cloruro férrico: características, usos y medidas de seguridad. [En línea]. Disponible: <https://www.amoquimicos.com/propiedades-del-cloruro-ferrico>

[Acceso: enero 12, 2021]

- [9] M. Bravo, *Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales*, Tesis Pre., Facultad de ciencias y educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11349/5609>
- [10] E. Arenas, Efecto de la remoción del aceite de las semillas de Moringa oleífera en el tratamiento de aguas por coagulación- floculación, Tesis pre., Facultad de ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2019. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3916>
- [11] A. Castro, El árbol moringa (Moringa oleífera Lam.): una alternativa renovable para el desarrollo de los sectores económicos y ambientales de Colombia, Tesis Post., Facultad de ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2013. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10654/10956>
- [12] M. Rodríguez, Plan Exportador De Moringa Como Suplemento Alimentario Para Bovinos, Hacia El Mercado Americano “TEXAS”, Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables, Universidad de Santander UDES, Bucaramanga, Santander, 2018. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/3770>
- [13] Barraza. F, “Germinación de semillas de moringa (Moringa oleífera Lam.) en diferentes tiempos de imbibición en agua”, Universidad de Córdoba, Facultad de ciencias agrícolas, Colombia, Montería, 2017.
- [14] D. Fúquene., A. Yate., Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales, Tesis Master, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/28619> [Acceso: enero 13, 2021]

- [15] Y. Cárdenas, Tratamiento de agua coagulación y floculación, Sedapal, Lima, 2000. [En línea]. Disponible: <http://www1.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf>
- [16] [En línea]. Disponible: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19121/Anexo.pdf>
- [17] Aguamarket, “Glosario”, Santiago de Chile, Chile. [En línea]. Disponible: <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=153%20&%20termino=Alcalinidad> [Acceso: enero 13, 2021]
- [18] M. Sánchez, Contribución al estudio de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), Tesis post, Facultad de Ingeniería, Tesis Post, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México D.F, 1994. [En línea]. Disponible: <http://eprints.uanl.mx/7204/1/1020091184.PDF>
- [19] G. Banach, S. Cerdón, A. Gimeno, Estudio de la calidad ambiental de la Bahía de Cárdenas para un futuro Manejo Integrado de Zonas Costeras, Gestverd Serveis Ambientals, Universitat de Girona, Cataluña, España, 2009. [En línea] Disponible: <http://hdl.handle.net/10256/1729>
- [20] Instituto de Hidrología, Metrología y Estudios Ambientales IDEAM, “Sólidos totales secados a 103 – 105 °C”, IDEAM, [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Totales+secados+a+103++105%C2%BAC.pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935>. [Acceso: mayo 14,2021]
- [21] ModBase: base de datos de modelos comparativos de estructura de proteínas, [En Línea]. Disponible: <https://cutt.ly/2nC4kAL> [Acceso: Abril, 29, 2020]
- [22] L. Luciana de Andrade, Caracterização estrutural e aplicações biológicas da lectina coagulante de sementes de Moringa oleífera (cMoL), Tesis Doctorado, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 2013. [En Línea]. Disponible:

<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/13409>

- [23] A. Ndabigengesere, K. Subanarasiah, B. Talbot, Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using moringa oleifera, Departamento de Ingeniería Civil y Departamento de Biología, Universidad de Sherbrooke, Quebec, Canadá, 2000. [En Línea]. Disponible: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y) [Acceso: febrero 2, 2021]
- [24] L. Castellanos, M. Marín, Desarrollo de un coagulante orgánico a partir de la semilla de Moringa para la empresa comercial DACETEX LTDA, Tesis pre, Facultad de ingeniería, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C, Colombia, 2020. [En línea]Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7789>
- [25] E. de J. Acevedo Picon, Uso de semillas de moringa (Moringa Oleífera) como floculante natural para la purificación de aguas crudas de Rio Negro, Rio de Oro y Quebrada Floridablanca, Santander, Tesis pre, Facultad de Ciencias Exactas Naturales y Agropecuarias, Universidad de Santander, Bucaramanga, Santander, 2019. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.udes.edu.co/handle/001/1050>
- [26] I. Mendoza, N. Fernández, and G. Ettiene, “Uso de la Moringa oleifera como coagulante en la potabilización de las aguas Use of Moringa oleifera as coagulant in the water treatment,” Cienc. 8, vol. 8, no. August, pp. 235–242, 2000.
- [27] La Universidad Pablo de Olavide, “Destilación,” Practica 8 Destilación, 2015, [En línea]. Disponible: <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/basesFQ/Pract/ochoyinueve.pdf>. [Acceso: febrero 2, 2021]
- [28] S. Arango, W. P. Ortega, A. Alvarez, and J. D. Medina, Evaluación del extracto de semillas de Moringa oleífera como agente coagulante en el tratamiento de aguas residuales de una industria textil, Tesis pre, Facultad de Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2019. [En línea]Disponible: <http://hdl.handle.net/10784/12230>.

- [29] U. Gassenschmidt, K. D. Jany, T. Bernhard, and H. Niebergall, "Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam," *Biochim. Biophys. Acta - Gen. Subj.*, vol. 1243, no. 3, pp. 477–481, Apr. 1995, doi: 10.1016/0304-4165(94)00176-X.
- [30] D. L. Villaseñor Basulto, P. D. Astudillo Sánchez, J. del Real Olvera, and E. R. Bandala, "Wastewater treatment using *Moringa oleifera* Lam seeds: A review," *J. Water Process Eng.*, vol. 23, no. March, pp. 151–164, 2018, doi: 10.1016/j.jwpe.2018.03.017.
- [31] R. Espinosa and S. Zuluaga, *Evaluación De La Capacidad De Dos Coagulantes Naturales Para La Remoción De Cargas Contaminantes En El Efluente Final De La Empresa Textil Inruuzz S.a.S Con Respecto Al Coagulante Comercial Sulfato De Aluminio*, Tesis pre, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bosque, Bogotá, Colombia, 2018. [En línea] Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.12495/3319>
- [32] I. Ceron, N. Garzón, *Evaluación de la semilla de Moringa Oleífera como coadyudante en el proceso de coagulación para el tratamiento de aguas naturales del río Bogotá en su paso por el municipio de Villapinzon, Cundinamarca*, Tesis pre., Facultad de ingeniería, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, 2015. [En línea] Disponible: <https://hdl.handle.net/10901/8109>
- [33] R. Sahara, R. Adán, S. Joaquín, *Análisis experimental de la floculación de sedimentos cohesivos; Aplicaciones en tratamiento de aguas y acuacultura*, Tesis Pre, Universidad Autónoma del Estado de México, 2015. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.11799/49527>
- [34] HACH, Medidor de pH/mV HQ411D para laboratorio, una entrada: pH y ORP, HACH. [En línea] Disponible: <https://co.hach.com/product.detail-print.version.jsa?id=53559494538> [Acceso: febrero 26, 2021]
- [35] HACH, Medidor de conductividad y TDS portátil HQ14D con célula de conductividad para aplicaciones de campo, cable de 5 m, HACH. [En línea] Disponible: <https://cutt.ly/vnC43Bm> [Acceso: febrero 26, 2021]

- [36] T. Chu, M al Matar, E. Makky, E. Ali, The use of Moringa Oleifera seed as a natural coagulant for wastewater treatment and heavy metals removal, 2016.
- [37] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, “Demanda química de oxígeno por reflujos cerrados y volumetría”, IDEAM. [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno...pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb> [Acceso: marzo 16, 2021]
- [38] M. N. González, C. Orozco, A. Pérez, J. M. Alfayate, and F. Rodríguez, Contaminación ambiental. Una visión desde la química, 1st ed. Parainfo, 2002.
- [39] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, “Demanda bioquímica de oxígeno 5 días, incubación y electrometría”. [En línea] Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno...pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa> [Acceso: marzo 16, 2021]
- [40] A. Rivera Ñacari, Uso de moringa oleífera y carbón activado para el mejoramiento de la calidad del agua residual de lavado vehicular en el distrito de San Martín de Porres – Lima 2017, Tesis pre, Facultad ingeniería, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2017. [En línea] Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/3595>
- [41] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, “Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103 – 105 °C”, IDEAM. [En línea] Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c> [Acceso: marzo 17, 2021]
- [42] N. Ueda Yamaguchi et al., “A review of Moringa oleifera seeds in water treatment: Trends and future challenges,” Process Safety and Environmental Protection, vol. 147. Institution of Chemical Engineers, pp. 405–420, Mar. 01, 2021, doi: 10.1016/j.psep.2020.09.044

- [43] Bioleafy, “Semilla de moringa (Granel)”. [En línea]. Disponible: <https://bioleafy.com/product/semilla-de-moringa-1kg/> [Acceso: mayo 1, 2021]
- [44] Acueducto Agua y alcantarillado de Bogotá, EAAB, “Tarifas acueducto año 2020”, Acueducto, 2020. [Acceso: junio 9, 2021]
- [45] Energía Enel- Codensa Enel- Codensa, Enel, “Tarifas de energía eléctrica (\$/kWh)”, Enel, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%3%B1ol/personas/1-17-1/2021/Tarifario-enero-2021.pdf> [Acceso: mayo 4, 2021]
- [46] Alibaba, “Pelador eléctrico automático de semillas de girasol, pelador de semillas de melón, máquina descascaradora de semillas de girasol”. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/Bm3w67k>
- [47] Alibaba, “Industrial mills para maíz molinos para moler maíz molinos industriales para moler maíz”. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/Cm3eieQ>
- [48] Filtra Vibración, “Tamizadora industrial circular”. [En línea]. Disponible: <http://filtra.com/wp-content/uploads/2016/07/ZEUS-tamizadora-circular-FTI-1500.pdf>
- [49] Alibaba, “Máquina de extracción de aceite esencial con aroma de limón y Romero”. [En línea]. Disponible: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/lemon-rosemary-essential-oil-extraction-machine-60755427746.html>
- [50] Alibaba, “Industrial lodo de lechada arena de sílice tambor de arcilla secadora precio de la máquina, ahorro de energía pequeño mini triple paso cemento secador rotativo”. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/Sm3rfd4>
- [51] Alibaba, “Máquina mezcladora homogeneizadora, agitador de agua, tanque”. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/Om3rWEW>

- [52] IST, “HR 600-1200”. [En línea]. Disponible: <https://www.ist.it/sites/default/files/prodotti/schede/Spa.pdf>
- [53] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, “Glosario”, IDEAM. [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario> [Acceso: marzo 3, 2021]
- [54] M. Castillo, Química Orgánica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2011. [En línea]. Disponible: https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Lectura/prepa4/Qui_NaCl.pdf [Acceso: marzo 3, 2021].
- [55] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, “Conductividad eléctrica del agua por el Método Electrométrico.” IDEAM [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+Eléctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>. [Acceso: marzo 24, 2021]
- [56] Secretaría de comercio y fomento industrial, “Análisis de agua- determinación de la conductividad electrolítica”, 2000. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166800/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf> [Acceso: marzo 24, 2021]
- [57] El Hexano: Conoce sus riesgos y cómo prevenirlos, Ana lucia. [En línea]. Disponible: <http://tusaludnoestaennomina.com/wp-content/uploads/2016/02/EL-HEXANO.-CONOCESUS-RIESGOS-Y-C%C3%93MO-PREVENIRLOS.pdf>
- [58] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, “pH en agua por electrometría”, IDEAM. [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/pH+en+agua+por+Electrometr%C3%ADa.pdf/ec53b64e-91eb-44c1-befe-41fcfccdff1> [Acceso: marzo 24, 2021]

- [59] C. González. “El pH”, Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico, (s.f), [Diapositivas de PowerPoint]. Disponible: <https://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-862/maguaph.pdf>, Acceso: marzo 02, 2021.
- [60] Corporaciones Autónomas Regionales, C. A. R., “PTAR El Salitre.”. [En línea]Disponible: https://www.car.gov.co/rio_bogota/vercontenido/9#:~:text=Una Planta de Tratamiento de, por una comunidad o industrial [Acceso: abril 7, 2021]
- [61] M. Perez, D. Ruiz, M. Schneiderc, J. Autinod, G. Romanellie, La química verde como fuente de nuevos compuestos para el control de plagas agrícolas, Universidad Nacional de la Plata, 2012. [En línea]Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v4n2/v4n2a10.pdf> [Acceso: abril 5, 2021]
- [62] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, Turbiedad por nefelometría, IDEAM. [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/1nC7neH> [Acceso: abril 7, 2021]
- [63] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021. [PDF].

GLOSARIO

Aguas residuales: se conoce con este nombre a las aguas que contienen materia orgánica o residuos líquidos evacuados como un desecho. Las aguas residuales son todo tipo de agua con una calidad afectada negativamente por la influencia antropogénica. Dentro de estas se encuentran las aguas domésticas, industriales, urbanas, entre otros [53].

Cloruro de Sodio: el cloruro de sodio, o conocido comúnmente como sal, es uno de los minerales que se encuentran en mayor proporción en el planeta. Este compuesto puede conducir la electricidad en estado fundido y en solución acuosa, y posee un punto de ebullición alto (801° C). Este mineral es de gran utilidad para la gastronomía y para la producción de otros compuestos inorgánicos [54].

Conductividad: la conductividad o conductancia, se define como la capacidad que posee una solución para conducir la corriente eléctrica. Esta propiedad se presenta principalmente en compuestos inorgánicos y en metales. Corresponde a la inversa de la resistividad y su unidad de medida son los microsiemens (μS) [55]. Es una variable de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales, ya que con esta se puede llegar a una conclusión de la cantidad de minerales que están presentes en el agua [56].

Coagulante: corresponde a sustancias sintéticas o naturales que al adicionarse al agua son capaces de producir una reacción química, especialmente con la alcalinidad del agua, para formar un precipitado o una aglomeración de las partículas coloidales que se encuentran en suspensión [6].

Hexano: es una sustancia química extraída del petróleo crudo. El n- hexano puro es un líquido incoloro de olor levemente desagradable, sumamente inflamable, nocivo y peligroso para la salud de los trabajadores y medioambiente. En las plantas extractoras es usado en la obtención de aceite, que proviene de diferentes semillas [57].

pH: es una medida con la cual se denota la acidez o alcalinidad. Se define como la concentración de iones de hidrógeno presentes en la sustancia o compuesto y se mide por un método electrométrico usando un electrodo de vidrio y uno de referencia [58]. Esta prueba se evalúa mediante una escala logarítmica que puede estar con valores de 0 a 14, donde 0-6 es ácido, 7 neutro y 8-14 alcalino [59].

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR hace referencia a las instalaciones y procesos donde se realiza el tratamiento a las aguas residuales que contienen diferentes materiales en suspensión o disueltos, y que provienen del sector industrial o de actividades domésticas [60].

Química Verde: es la química aplicada en pro de la prevención de la contaminación. Implica la utilización de una serie de principios encaminados a reducir o eliminar el uso y generación de sustancias peligrosas en el diseño, manufactura y aplicación de los productos químicos, en lugar de recurrir a posteriori al tradicional tratamiento de efluentes; es por ello que la química verde aborda el concepto de prevención en lugar de la remediación [61].

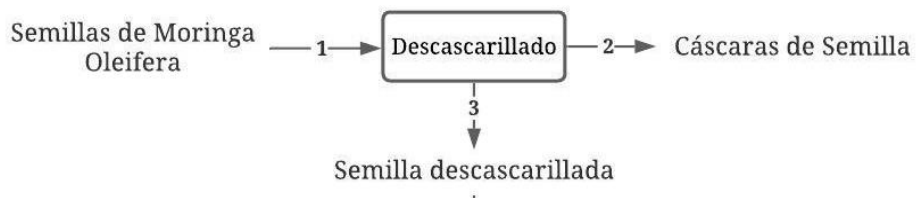
Turbiedad: es la cantidad de materia suspendida y coloidal que se puede encontrar en el agua. Es la medida por la cual se expresa la propiedad óptica que causa la luz al ser dispersada y absorbida, en lugar de ser transmitida sin cambios en la dirección del nivel del flujo a través de la muestra y esta se determina por medio de un método nefelométrico [62].

ANEXOS

ANEXO 1

BALANCE DE MATERIA

- Descascarillado



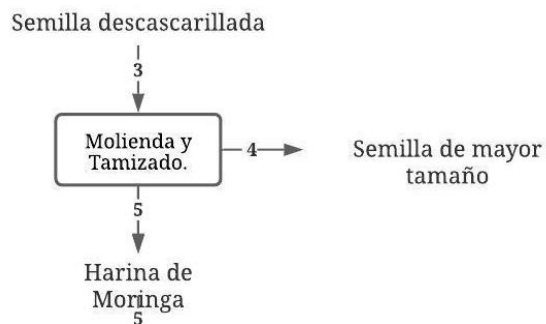
$$m_1 = m_2 + m_3 \quad 2\text{kg} = 1\text{kg} + 1\text{kg}$$

m_1 = Semilla normal

m_3 = Semilla sin cáscara

m_2 = Cáscara

- Molienda y Tamizado.



$$x_3 m_3 = x_4 m_4 + x_5 m_5 \quad 1\text{ kg} = 656,77\text{ g} + 343,23\text{ g}$$

m_5 = Harina

m_4 = Semilla de mayor tamaño

- Extracción del Coagulante.



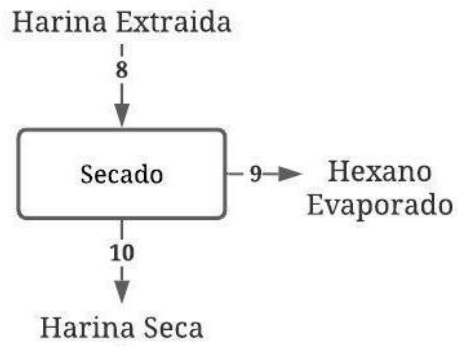
$$x_5m_5 + x_6m_6 = x_7m_7 + x_8m_8 \quad 343,23 \text{ g} + 2.161,5 \text{ g} = 2.048,18 \text{ g} + 456,55 \text{ g}$$

m_6 = Hexano

m_8 = Harina con hexano

m_7 = Hexano con aceite

- Secado de la Harina.



$$x_8m_8 = x_9m_9 + x_{10}m_{10} \quad 456,55\text{g} = 220,94\text{g} + 235,61\text{g}$$

m_{10} = Harina seca

m_9 = Hexano evaporado

- Extracción del Componente Activo.



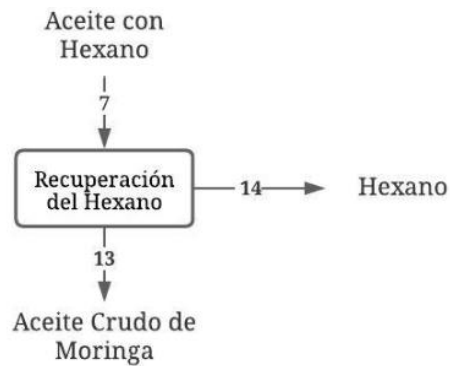
$$x_{10}m_{10} + x_{11}m_{11} = x_{12}m_{12} + x_{13}m_{13} \quad 235,61 \text{ g} + 3.061,35 \text{ g} = 774,16 \text{ g} + 2.522,8 \text{ g}$$

m_{11} = Solución de H₂O + NaCl

m_{13} = Coagulante

m_{12} = Torta extraída

- Recuperación de hexano



$$m_7 x_7 = m_{13} x_{13} + m_{14} x_{14} + m_{15} x_{15} \quad 2.048,18 \text{ g} = 181,6 \text{ g} + 1.434,84 \text{ g} + 431,74 \text{ g}$$

m_{13} = Aceite crudo

m_{14} = Hexano recuperado

m_{15} = Hexano perdido

ANEXO 2

RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA DETERMINACION DE LA DOSIFICACIÓN DEL COAGULANTE NATURAL

Dosis Coag. (mL/L)	Turbiedad (NTU)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Conductividad (μ S)	DBO (mg O ₂ /L)	DQO (mg O ₂ /L)	SST (mg/L)
0	103	7,25	253	921	233	431	108
3,5	74	7,3	274	1128	187	399	71
6,5	45	7,48	250	1182	188	325	34
8	32	7,34	495	1203	255	329	20
15	13	7,09	264	1519	269	467	14

ANEXO 3

DATOS CLIMATOLOGICOS DE LOS DIAS DE MUESTREO.

Fecha	Temperatura Max. (°C)	Temperatura Min. (°C)	Precipitaciones (mm)
9/12/2020	20,60	7,10	3,70
10/12/2020	21,60	4,00	9,10
26/01/2021	20,10	4,30	0,00
27/01/2021	21,50	4,60	0,00
23/02/2021	19,70	8,20	0,00
24/02/2021	19,80	11,20	0,20

ANEXO 4

RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS COAGULANTES ESTUDIADOS.

Fecha	Muestra	Concentración Coag.	Turbiedad (NTU)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Conductividad (µS)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	DQO (mg O ₂ /L)	SST (mg/L)
9/12/2020	Cruda		90,8	7,33	233	962	227	469	94
	Tratada Moringa	350	44	7,37	262	1194	180	360	38
	Cruda PTAR		173	7,45	255	902	272	574	208
	Tratada PTAR	20,62	89	7,27	233	909	202	407	98
10/12/2020	Cruda		103	7,25	253	921	233	431	108
	Tratada Moringa	455	45	7,48	250	1182	188	325	34
	Cruda PTAR		149	7,39	253	896	245	554	179
	Tratada PTAR	19,79	104	7,16	225	914	204	414	107
26/01/2021	Cruda		110	7,59		845	273	502	123
	Tratada Moringa	420	45	7,5	248	1096	228	339	33
	Cruda PTAR		154	7,66	277	884	265	549	211
	Tratada PTAR	18,03	124	7,44	256	896	231	472	120
27/01/2021	Cruda		122	7,54		887	252,5	502	128
	Tratada Moringa	455	43	7,44		1149	193,5	365	35
	Cruda PTAR		137	7,39	265	898	251	553	162
	Tratada PTAR	21,75	118	7,17	252	927	216	444	103
23/02/2021	Cruda		116	7,29		934	257	439	99
	Tratada Moringa	420	91,4	7,05		1246	225	345	57
	Cruda PTAR		150	7,34	272	864	252	462	179
	Tratada PTAR	20	124	7,25	275	907	243	438	145
24/02/2021	Cruda		125	7,32		926	252	406	97
	Tratada Moringa	420	71	7,15		1185	245	343	41
	Cruda PTAR		168	7,25	282	878	280	606	195
	Tratada PTAR	20	126	7,15	262	875	255	489	136

ANEXO 5

TABLA DE PORCENTAJE DE REMOCIÓN EN LAS PRUEBAS FISICOQUÍMICAS.

	Fecha	Concentración Coag.	Turbiedad (NTU)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Conductividad (μS)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	DQO (mg O ₂ /L)	SST (mg/L)
Cloruro Ferrico	9/12/2020	20,62	48,55	2,42	8,63	-0,78	25,74	29,09	52,88
Moringa Oleífera.		350	51,54	-0,55	-12,45	-24,12	20,70	23,24	59,57
Cloruro Ferrico	10/12/2020	19,79	30,20	3,11	11,07	-2,01	16,73	25,27	40,22
Moringa Oleífera.		455	56,31	-3,17	1,19	-28,34	19,31	24,59	68,52
Cloruro Ferrico	26/01/2021	18,03	19,48	2,87		-1,36	12,83	14,03	43,13
Moringa Oleífera.		420	59,09	1,19		-29,70	16,48	32,47	73,17
Cloruro Ferrico	27/01/2021	21,75	13,87	2,98		-3,23	13,94	19,71	36,42
Moringa Oleífera.		455	64,75	1,33		-29,54	23,37	27,29	72,66
Cloruro Ferrico	23/02/2021	20	17,33	1,23		-4,98	3,57	5,19	18,99
Moringa Oleífera.		420	21,21	3,29		-33,40	12,45	21,41	42,42
Cloruro Ferrico	24/02/2021	20	25,00	1,38		0,34	8,93	19,31	30,26
Moringa Oleífera.		420	43,20	2,32		-27,97	2,78	15,52	57,73

ANEXO 6

COTIZACIÓN MATERIA PRIMA (HEXANO Y NACL)



Oferta de Equipos y suministros para Laboratorio

NIT. 800.154.351-3 - RESPONSABLES DE I.V.A.
ACTIVIDAD ECONOMICA 4664/3313 - NO SOMOS GRANDES
CONTRIBUYENTES - AGENTE RETENEDOR DE I.V.A.

CONTRIBUYENTES DE INDUSTRIA Y COMERCIO EN LAS CIUDADES DE
BOGOTÁ TARIFA 11.04XMIL Y 9.66XMIL, CALI TARIFA 7.7XMIL Y 10XMIL Y
EN MEDELLIN TARIFA 8XMIL Y 10XMIL

Cotización
FV03-V6 No. 157877
Fecha: 09/06/2021
Atención:
Validez: 09/07/2021
Forma Pago: CONTADO CLIENTES
Asesor: Ingrith Mahecha

Señores: CLIENTES NO CREADOS	Fecha: 09/06/2021
Dirección: BOGOTÁ	Atención:
C.C o NIT: 000000	Validez: 09/07/2021
Telefono:	Forma Pago: CONTADO CLIENTES
E-Mail:	Asesor: Ingrith Mahecha

Item	Ref.	Producto	Marca	Presentación	Cant.	Entrega	Vr.Unitario	Vr.Total	IVA Vigente
1	1064041000	SODIO CLORURO P.A. EMSURE® ACS,ISO,REAG. PH EUR (1KG)	MERCK	1KG	1	09/06/2021	\$57.040	\$57.040	\$0.00
2	1043741000	*MDJ>5"N-HEXANO PARA ANALISIS EMSURE ACS,REAG. PH EUR 1 L (HEXANO)	MERCK	1L	1	18/06/2021	\$104.940	\$104.940	\$19.938,60

Observaciones:

* Fecha de entrega de productos sujeta a venta previa (ver fechas en cotización). Productos de importación no tienen cambio CRISTIAN

Blamis Dotaciones Laboratorio S.A.S
Nit. 800.154.351-3

SUBTOTAL \$161.980
IVA \$19.939
TOTAL \$181.919

En conformidad a la Ley 1819 de 2016 en su artículo 343. Territorialidad del ICA. Abstenerse de realizarnos retención en la fuente a título de ICA en cualquier Municipio o Ciudad diferente a BOGOTÁ, CALI o MEDELLIN.

OFICINAS Y ALMACEN AL PUBLICO:
BOGOTÁ: CARRERA 47 No. 94 A - 06 - LA CASTELLANA
PBX: 611 18 51 - TEL.: 636 05 93 - FAX: 636 05 94
MEDELLIN - PBX: 2307982 - 4485720
CALI - PBX: 3315328 - 3733314
Website: www.blamis.com.co
E-mail: blamis@blamis.com.co

NUESTRA EXPERIENCIA MARCA LA DIFERENCIA

ANEXO 7

COTIZACIÓN DE CLORURO DE FERRICO



Oferta de Equipos y suministros para Laboratorio

NIT. 800.154.351-3 - RESPONSABLES DE I.V.A.
ACTIVIDAD ECONOMICA 4664/3313 - NO SOMOS GRANDES
CONTRIBUYENTES - AGENTE RETENEDOR DE I.V.A.

CONTRIBUYENTES DE INDUSTRIA Y COMERCIO EN LAS CIUDADES DE
BOGOTÁ TARIFA 11,04XMIL Y 9,66XMIL, CALI TARIFA 7,7XMIL Y 10XMIL Y
EN MEDELLIN TARIFA 8XMIL Y 10XMIL

Cotización FV03-V6 No. 157878
Fecha: 09/06/2021
Atención:
Validez: 09/07/2021
Forma Pago: CONTADO CLIENTES
Asesor: Ingrith Mahecha

Señores: CLIENTES NO CREADOS	Fecha: 09/06/2021
Dirección: BOGOTA	Atención:
C.C o NIT: 000000	Validez: 09/07/2021
Telefono:	Forma Pago: CONTADO CLIENTES
E-Mail:	Asesor: Ingrith Mahecha

Item	Ref.	Producto	Marca	Presentación	Cant.	Entrega	Vr.Unitario	Vr.Total	IVA Vigente
1	8039451000	HIERRO(III) CLORURO ANHIDRO PARA SINTESIS (1KG)	MERCK	1KG	1	20/08/2021	\$750.120	\$750.120	\$142.522,80

Observaciones:

* Fecha de entrega de productos sujeta a venta previa (ver fechas en cotización). Productos de importación no tienen cambio CRISTIAN

Blamis Dotaciones Laboratorio S.A.S	SUBTOTAL	\$750.120
Nit. 800.154.351-3	IVA	\$142.523
	TOTAL	\$892.643

En conformidad a la Ley 1819 de 2016 en su artículo 343. Territorialidad del ICA. Abstenerse de realizarnos retención en la fuente a título de ICA en cualquier Municipio o Ciudad diferente a BOGOTÁ, CALI o MEDELLIN.

OFICINAS Y ALMACEN AL PUBLICO:
BOGOTÁ: CARRERA 47 No. 94 A - 06 - LA CASTELLANA
PBX: 611 18 51 - TEL.: 636 05 93 - FAX: 636 05 94
MEDELLIN - PBX: 2307982 - 4485720
CALI - PBX: 3315328 - 3733314
[Website: www.blamis.com.co](http://www.blamis.com.co)
E-mail: blamis@blamis.com.co

NUESTRA EXPERIENCIA MARCA LA DIFERENCIA

ANEXO 8

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una caracterización del coagulante para poder determinar la cantidad de sólidos que presenta.

En cuanto a la producción de sólidos, sería de gran utilidad evaluar la cantidad de lodos que genera la utilización del coagulante natural, con respecto a los coagulantes químicos utilizados usualmente.

Se recomienda realizar un estudio microbiológico para determinar el desempeño del coagulante a base de semilla de moringa, respecto a los coliformes totales y los huevos de helminto.

Se recomienda a largo plazo evaluar una posible implementación financiera a través de entidades bancarias y/o inversionistas.

Se recomienda evaluar la utilidad que puede presentar la torta residual del proceso de extracción del componente activo por ejemplo en la producción de fertilizantes para los suelos por su contenido de nitrógeno, o para alimento de animales por su alto contenido proteico.