Universidad Nacional de Ingeniería

Área del Conocimiento de Agricultura

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS CONTENIDOS EN AGUA USANDO COAGULANTES ORGÁNICOS

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Químico

Elaborado por:

Br. NATALIE MICHELLE
CALERO RAMOS

Tutor:

MSc. SERGIO ENRIQUE
ÁLVAREZ GARCÍA

09 de octubre de 2024
Managua, Nicaragua

Agradecimientos

Quiero agradecerles a mis padres tanto su amor como su apoyo constante a mi trabajo como tesista: a mi padre le doy las gracias por hablarme desde temprana edad de como varios fenómenos están asociados por las mismas propiedades físicas y por acompañarme en el hacer de algoritmos para procesamiento de datos; y a mi madre por cultivar mi faceta investigadora, por reconfortarme cuando los experimentos resultaron fallidos, por acompañarme en todas las noches de desvelo a lo largo de varios años y por tantas platicas felices y estimulantes.

A mi maestro y tutor, MSc. Sergio Álvarez por el compromiso y la guía que me brindó desde que tuve la oportunidad de recibir su clase de Diseño de Reactores, sin él no hubiera participado en un Hackathon, y sin él tampoco hubiera sabido lo que se siente ganar uno. Gracias por inspirarme a expandir mis conocimientos y aspirar a estudiar una segunda carrera para así aprovechar mis habilidades al máximo.

A mis compañeros de carrera por la paciencia y el apoyo en cada luto, trabajo de curso, cuando comencé y terminé el curso de chino mandarín, CS50x y WEB50x, especialmente a Nathalya Reyes, Helen Castro Wong, Estefanía Membreño y Paulo Gutiérrez.

A las personas que me brindaron consejo en diversas áreas de conocimiento ligadas al presente estudio, Ing. Cristóbal Garay, MSc. Rolando Guevara, Ing. Yesenia Mejía, Ing. Pedro Leiva y MSc. Marlon Suárez.

A mis personas indispensables que pasado el tiempo considero familia, Dr. Cindy Rivas, Emelina Chávez, Dr. Scolly Gómez, Yosoy Aburto y Arq. María Alejandra Salamanca.

Dedicatoria

Para mi abuela María Lourdes Ramos, mi cielo azul.

Para mi mamá Fanny del Carmen Ramos, mi roquera favorita.

Resumen

En este estudio se evaluaron las eficiencias de remoción de sólidos suspendidos contenidos en agua usando coagulantes orgánicos obtenidos de semilla de chía y de semilla de linaza. La eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos se evaluó con un modelo lineal de superficie de respuesta tomando en cuenta tres factores (la concentración del mucílago, el pH y el tiempo de agitación), siendo la remoción de la turbidez como respuesta. Los coagulantes orgánicos derivados del mucílago de chía y linaza mostraron diferencias en sus propiedades físicas y químicas, afectando su cinética y capacidad de coagulación. Las dosis óptimas para el tratamiento de agua se determinaron y se observó que, en el caso del mucílago de linaza, la dosis óptima es de 12 mg/L, con pH de 8, y tiempo de agitación de 15 minutos y para el mucílago de chía, la dosis óptima es de 10 mg/L, con pH de 6, y tiempo de agitación de 20 minutos. Se identificó la eficacia de ambos mucílagos para la remoción de sólidos suspendidos, con variaciones en la eficiencia según la dosis utilizada y el tipo de coagulante. El mucílago de chía mostró una máxima eficiencia bajo condiciones de alta turbidez inicial (27.6 NTU), en cambio el mucílago de linaza es más adecuado para condiciones de turbidez inicial moderada (7.6 NTU).

Índice

Agradecimientos i
Dedicatoria ii
Resumen iii
1 Introducción 1
2 Objetivos 2
2.1 General 2
2.2 Específicos 2
3 Justificación 3
4 Marco teórico 4
4.1 El agua potable 4
4.1.1 Aspectos de calidad del agua 4
4.1.2 Criterios de calidad del agua para consumo humano 5
4.1.3 Operaciones unitarias empleadas en el tratamiento de agua potable 6
4.2 Proceso de coagulación 7
4.2.1 Mecanismo de coagulación 9
4.2.2 Etapas de la coagulación 9
4.2.3 Coagulantes químicos 10
4.3 Proceso de floculación 12
4.3.1 Factores que influyen en la floculación 12
4.4 Coagulantes orgánicos 13
4.4.1 Mucílago de semillas de chía (Salvia hispánica) 14
4.4.2 Mucílago de semillas de linaza (Linum usitatissimum) 15
4.5 Impacto ambiental y sostenibilidad del tratamiento de agua 15
4.6 Evaluación de coagulantes 16
4.6.1 Prueba de jarras 16
4.6.2 Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) 16
4.6.3 Análisis de Taguchi 17
4.6.4 Diseño de superficie de repuesta 18
5 Metodología 19
5.1 Caracterización de las propiedades físicas y químicas de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucílago en chía y linaza. 19
5.1.1 Obtención de coagulantes orgánicos 19

5.1.2 Caracterización de propiedades físicas y químicas de coagulantes orgánico por medio de FTIR. 20
5.2 Caracterización del agua cruda....20
5.3 Determinación de las dosis óptimas de coagulantes orgánicos obtenidos del mucilago de semillas de chía y linaza....21
5.3.1 Pruebas de jarras 21
5.3.2 Optimización de dosis de coagulante orgánico con el método de superficie de repuesta. 23
5.4 Evaluación de la eficiencia de los coagulantes orgánicos 24
5.4.1 Eficiencia de la remoción de turbidez....24
6 Resultados 25
6.1 Caracterización de las propiedades físicas y químicas de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucílago en chía y linaza usando espectroscopía para identificar su cinética y potencial de coagulación. 25
6.1.1 Análisis del espectro FTIR del mucílago de linaza 25
6.1.2 Análisis del espectro FTIR del mucílago de chía....26
6.1.3 Propiedades físicas y químicas de los coagulantes orgánicos obtenidos de los mucilagos de chía y linaza 27
6.1.4 Cinética de los procesos de coagulación con agentes orgánicos – mucilago de chía y de linaza. 28
6.1.5 Evaluación del Potencial de Coagulación de los agentes coagulantes orgánicos - mucílago de linaza y chía. 31
6.2 Determinación de dosis óptimas para el coagulante orgánico - mucílago de linaza 32
6.2.1 Análisis de efectos principales 32
6.2.2 Formulación del modelo matemático 34
6.2.3 Análisis de varianza (ANOVA) 37
6.2.4 Optimización del proceso de coagulación 38
6.2.5 Regiones de optimización (minimización) de Y (CC, pH, Tiempo) = Turbidez....39
6.2.6 Mínimo absoluto del valor de la turbidez 44
6.3 Determinación de dosis óptimas para el coagulante orgánico - mucílago de chía.....48
6.3.1 Organización de datos 48
6.3.2 Análisis de efectos principales 48
6.3.3 Formulación del modelo matemático 51
6.3.4 Análisis de varianza (ANOVA) 53
6.3.5 Optimización del proceso de coagulación 54
6.3.6 Optimización manual 55
6.3.7 Regiones de optimización (Minimización) de Y (CC, pH, Tiempo) = Turbidez....55

6.3.8 Mínimo absoluto del valor de la turbidez 63
6.4 Comparación de resultados de eficiencia de remoción de sólidos suspendidos con tres coagulantes 66
6.4.1 Comparación y condiciones óptimas de los coagulantes orgánicos 68
6.4.1.1 Eficiencia General de Remoción. 69
6.4.1.2 Efecto del pH en la eficiencia de los coagulantes orgánicos. 69
6.4.1.3 Concentración del Coagulante. 70
6.4.1.4 Tiempo de Agitación. 70
6.4.2 Influencia de la turbidez Inicial general 70
6.4.3 Resultados de eficiencia de remoción general 71
6.4.4 Análisis comparativo 72
6.4.5 Análisis de factores experimentales 72
6.4.6 Consideraciones ambientales 73
6.4.7 Análisis estadístico 73
6.4.8 Implicaciones 74
6.4.9 Conclusiones 74
7 Conclusiones 76
8 Recomendaciones 77
9 Referencias 78
10 Anexos i
11 Apéndice i

Índice de tablas

Tabla 1. 5
Tabla 2. 22
Tabla 3. 32
Tabla 4. 33
Tabla 5. 34
Tabla 6. 37
Tabla 7. 48
Tabla 8. 49
Tabla 9. 50
Tabla 10. 51
Tabla 11. 53
Tabla 12. 66
Tabla 13. 67
Tabla 14. 68
Tabla 15. 69

Índice de figuras

Figura 1..... 8
Figura 2......10
Figura 3......14
Figura 4.....17
Figura 5......18
Figura 6......25
Figura 7......26
Figura 8......30
Figura 9......40
Figura 10......40
Figura 11......41
Figura 12......42
Figura 13.....43
Figura 14......43
Figura 15......45
Figura 16......46
Figura 17......46
Figura 18......56
Figura 19......56
Figura 20......58
Figura 21......58
Figura 22......60
Figura 23......61
Figura 24......64

1 Introducción

En Nicaragua, un país rico en recursos hídricos superficiales y subterráneos, el 31% de las personas que viven en zonas rurales no tienen acceso a este recurso vital. A pesar de contar con recursos hídricos, las fuentes de agua están siendo contaminadas por los vertidos de un número importante de sistemas de agua y saneamiento urbanos que carecen de sistemas de tratamiento. (ECODES, 2020)

Los coagulantes químicos utilizados en el tratamiento de agua son costosos y tienen impactos ambientales negativos a largo plazo. Ante esto, se ha explorado el uso de polímeros orgánicos como coagulantes alternativos, extraídos del mucílago de semillas de chía y linaza, las cuales se cultivan ampliamente en el país. A pesar de su potencial, no se ha realizado un estudio exhaustivo sobre su aplicación en el tratamiento de agua en Nicaragua, por lo que esta investigación busca cubrir esa necesidad y aportar al conocimiento científico. (Palacios V, 2020) (Cartuche, 2021)

La coagulación es una técnica ampliamente utilizada en el proceso de potabilización de agua, ya que permite la eliminación de partículas suspendidas y sustancias orgánicas presentes en el agua cruda. En Nicaragua, se utilizan coagulantes químicos convencionales, los cuales son costosos y generan impactos ambientales negativos. (Osejo Ibarra y Torrez Herrera, 2008) Por tanto, se plantea la posibilidad de utilizar polímeros orgánicos obtenidos a partir del mucílago de las semillas de chía y linaza como una alternativa más sostenible y económica, contribuyendo así a mejorar la calidad del agua.

El presente trabajo se orienta a estudiar la evaluación de la eficiencia de coagulantes/ floculantes obtenidos a partir de polímeros orgánicos extraídos del mucílago de las semillas de chía y linaza para su aplicación en potabilización de agua en Nicaragua. Dicho estudio se basa en realizar previamente una extracción del mucílago presente en las semillas de chía y linaza para obtener el coagulante y posterior determinar las dosis óptimas de los compuestos obtenidos como agentes coagulantes/floculantes a través del método de jarras en muestras de agua para consumo humano para finalmente evaluar la eficiencia del proceso.

2 Objetivos

2.1 General

- Evaluar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos contenidos en agua usando coagulantes orgánicos.

2.2 Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucílago en chía y linaza, usando espectroscopía para identificar su cinética y potencial de coagulación.
- Determinar las dosis óptimas de coagulantes orgánicos (obtenidos del mucilago de semillas de chía y linaza) necesarias para los procesos de potabilización de agua para consumo humano mediante la prueba de jarras.
- Establecer la eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos contenidos en el agua cruda, estimando la variación de sus concentraciones, para seleccionar el coagulante orgánico óptimo.

3 Justificación

En el camino a la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible, el número 6 (Agua Limpia y Saneamiento) (Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional, 2021) tiene dentro de sus metas aumentar la calidad de agua eliminando contaminantes de los afluentes industriales, además de que las aguas residuales reduzcan sus productos químicos y peligrosos al ser tratadas y reutilizadas (United Nations, 2023), es por eso importante disminuir sustancias químicas para el tratamiento de las aguas crudas o residuales y cambiar a procesos en los cuales se empleen sustancias naturales como coagulantes elaborados de semillas y de bajo costo.

El estudio de la evaluación de la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos contenidos en agua usando coagulantes orgánicos está alineado con los objetivos y principios del Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano 2022-2026 del Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional ya que el desarrollo de la investigación ofrecerá una oportunidad tangible para mejorar la calidad de vida de las comunidades, promover la sostenibilidad ambiental y avanzar hacia un desarrollo más inclusivo y equitativo promoviendo el desarrollo de tecnologías innovadoras y accesibles para la potabilización del agua.

La investigación propone buscar alternativas más sostenibles y económicas para el tratamiento de agua en Nicaragua. El uso de coagulantes químicos convencionales puede ser costoso y generar impactos negativos en el medio ambiente. En contraste, los polímeros orgánicos obtenidos a partir del mucílago de las semillas de chía y linaza presentan potencial como coagulantes alternativos debido a su disponibilidad y propiedades coagulantes. (Poveda, 2022)

Esta investigación brindará información sobre la eficiencia de utilizar estos polímeros en el tratamiento de agua, así como los posibles beneficios ambientales que podrían derivarse de su implementación. Además, contribuirá a promover el uso de recursos locales y fortalecer la seguridad hídrica en Nicaragua.

4 Marco teórico

En el marco teórico de esta investigación, se exploran los principios fundamentales de la coagulación como método de tratamiento de agua para consumo humano, destacando el proceso de potabilización de agua, la calidad del agua según la norma del Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (CAPRE), el papel de los coagulantes en la aglomeración y eliminación de partículas suspendidas. Además, se señala el impacto ambiental y sostenibilidad del tratamiento de agua y los factores que influyen en la eficacia de este proceso, como la dosificación del coagulante, el pH del agua y la naturaleza de los sólidos suspendidos.

4.1 El agua potable

Se conoce con este nombre al agua que ha sido tratada con el objetivo de hacerla apta para el consumo humano, teniendo en cuenta todos sus usos domésticos.

El tratamiento del agua es necesario cuando se utiliza agua de una fuente que no es segura para beber. El tratamiento del agua puede eliminar bacterias, virus, productos químicos y otros contaminantes que pueden representar un riesgo para la salud.

4.1.1 Aspectos de calidad del agua

Algunas especies biológicas, físicas y químicas pueden afectar la aceptabilidad del agua para consumo humano. Por ejemplo:

a) Su apariencia estética: turbiedad, olor, color y sabor, espuma.

b) Su composición química: acidez, alcalinidad, aceites y grasas, compuestos orgánicos e inorgánicos en general.

El agua potable no debe contener agentes patógenos que puedan afectar la salud del consumidor. Específicamente, los indicadores de contaminación fecal, coliformes termo tolerantes y Escherichia Coli no deben estar presentes en 100 mL de muestra. Esta calidad debe mantenerse desde que el agua sale de la planta de tratamiento —o de la fuente de agua, en el caso de aguas de origen subterráneo— hasta llegar al consumidor.

4.1.2 Criterios de calidad del agua para consumo humano

Las Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano dictadas por CAPRE establecen los requisitos básicos que debe cumplir el agua suministrada para consumo humano y uso doméstico. El objetivo de estas normas es proteger la salud pública y reducir al mínimo los componentes o características del agua que pueden representar un riesgo para la salud de la comunidad.

En la Tabla 1 se abordan algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua para consumo humano.

Tabla 1.

Valores de referencia que establece la Norma de calidad de agua de consumo humano.

Parámetro	Unidad	Norma de calidad del agua para consumo humano	
		Valor recomendado	Máximo admisible
Físicos			
pH		6.5 - 8.5	
Conductividad eléctrica	µS/cm	400	
Turbiedad	UNT	1	5
Color verdadero	mg(Pt-Co)/L	1	15
Químicos			
Alcalinidad	mg/L		
Carbonatos	mg/L		
Bicarbonatos	mg/L		
Nitratos	mg/L	25	50
Cloruros	mg/L	25	250
Hierro Total	mg/L	0.3	
Sulfatos	mg/L	25	250
Dureza total	mg$CaCO_3$/L	400	
Dureza cálcica			

Parámetro	Unidad	Norma de calidad del agua para consumo humano	
		Valor recomendado	Máximo admisible
Calcio	mg/L	100	
Magnesio	$mgCaCO_3/L$	30	50
Manganeso	mg/L	0.1	0.5
Sodio	mg/L	25	200
Potasio	mg/L	10	
Flúor	mg/L		0.7
Arsénico	mg/L		0.01
Microbiológicos			
Coliforme total	NMP/100mL	Negativo	
Coliforme fecal	NMP/100mL	Negativo	

Nota. Datos tomados de la Norma Regional de Calidad del Agua de CAPRE (1994).

4.1.3 Operaciones unitarias empleadas en el tratamiento de agua potable

a) Transferencia de sólidos

Se consideran en esta clasificación los procesos de cribado, sedimentación, flotación y filtración.

b) Transferencia de iones

La transferencia de iones se efectúa mediante procesos de coagulación, precipitación química, absorción e intercambio iónico.

c) Transferencia de gases

Consiste en cambiar la concentración de un gas que se encuentra incorporado en el agua mediante procesos de aireación, desinfección y recarbonatación.

d) Transferencia molecular

En el proceso de purificación natural del agua. Las bacterias saprofitas degradan la materia orgánica y transforman sustancias complejas en material celular vivo o en sustancias más simples y estables, incluidos los gases de descomposición.

También los organismos fotosintéticos convierten sustancias inorgánicas simples en material celular, utilizando la luz solar y el anhídrido carbónico producto de la actividad de las bacterias y, a la vez, generan el oxígeno necesario para la supervivencia de los microorganismos aeróbicos presentes en el agua. (Cánepa de Vargas, 2004)

e) Otros procesos utilizados

Además de los procesos de transferencia expuestos, también se utilizan en el tratamiento del agua para consumo humano la estabilización de solutos, la desalinización y la floculación.

4.2 Proceso de coagulación

El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación (o flotación) y filtración. (Cánepa de Vargas, 2004)

La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos:

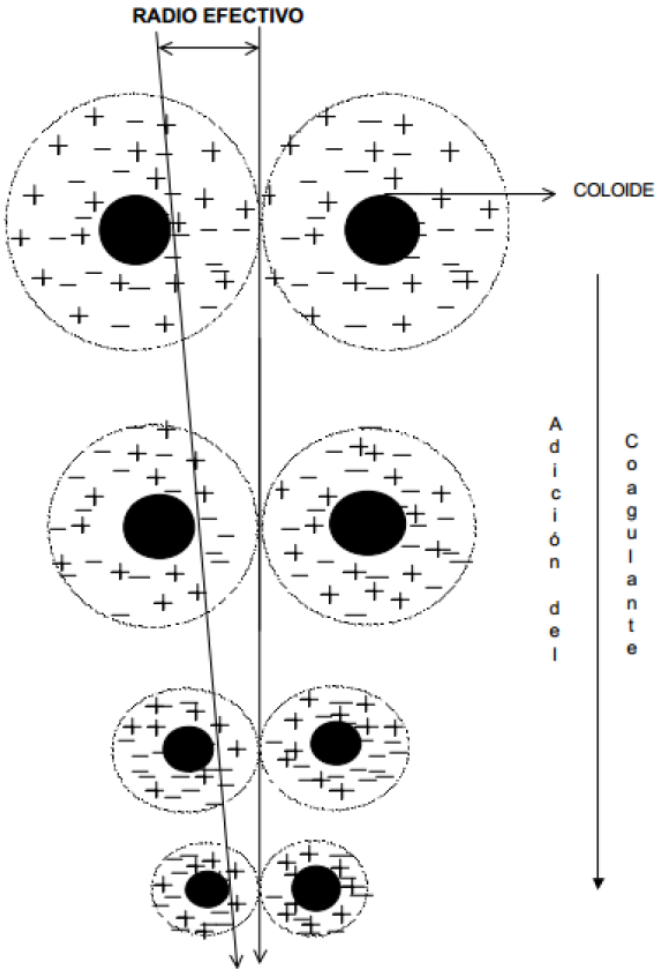
— El primero, es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado (Andía Cardenas, 2000). En la Figura 1 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos.

— El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua. Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etcétera. Se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada mezcla rápida. De allí en adelante, se necesitará una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas flóculos; estas

pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida. (Cánepa de Vargas, 2004)

Figura 1.

Coagulación



Nota. Figura obtenida de (Andía Cardenas, 2000).

La remoción de las partículas coloidales está relacionada estrictamente con una adecuada coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas: floculación, sedimentación y filtración.

4.2.1 Mecanismo de coagulación

A partir de dosis optimas de coagulante y floculante en muestras de agua cruda, el agente coagulante hace contacto con los coloides suspendidos por adsorción a través de interacciones electrostáticas, enlaces de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals, etc. Esto conduce a la desestabilización de coloides y suspensiones y posteriormente a un reordenamiento de la conformación del polímero adsorbido de tal manera que las partículas en suspensión adsorbidas se agregan para formar grandes flóculos que a continuación se establecen de manera efectiva. (Lorenzo-Acosta, 2006)

4.2.2 Etapas de la coagulación

Considerando la discusión teórica que antecede, (Charlet et al., 1993) e (O´Melia, 1969) identificaron varias etapas en el proceso de coagulación.

1) Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes y su consecuente polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas.

2) Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr la desestabilización del coloide.

3) Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante un puente entre las partículas que involucra el transporte de estas y las interacciones químicas.

4) Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante el transporte de las mismas y las fuerzas de Van der Waals.

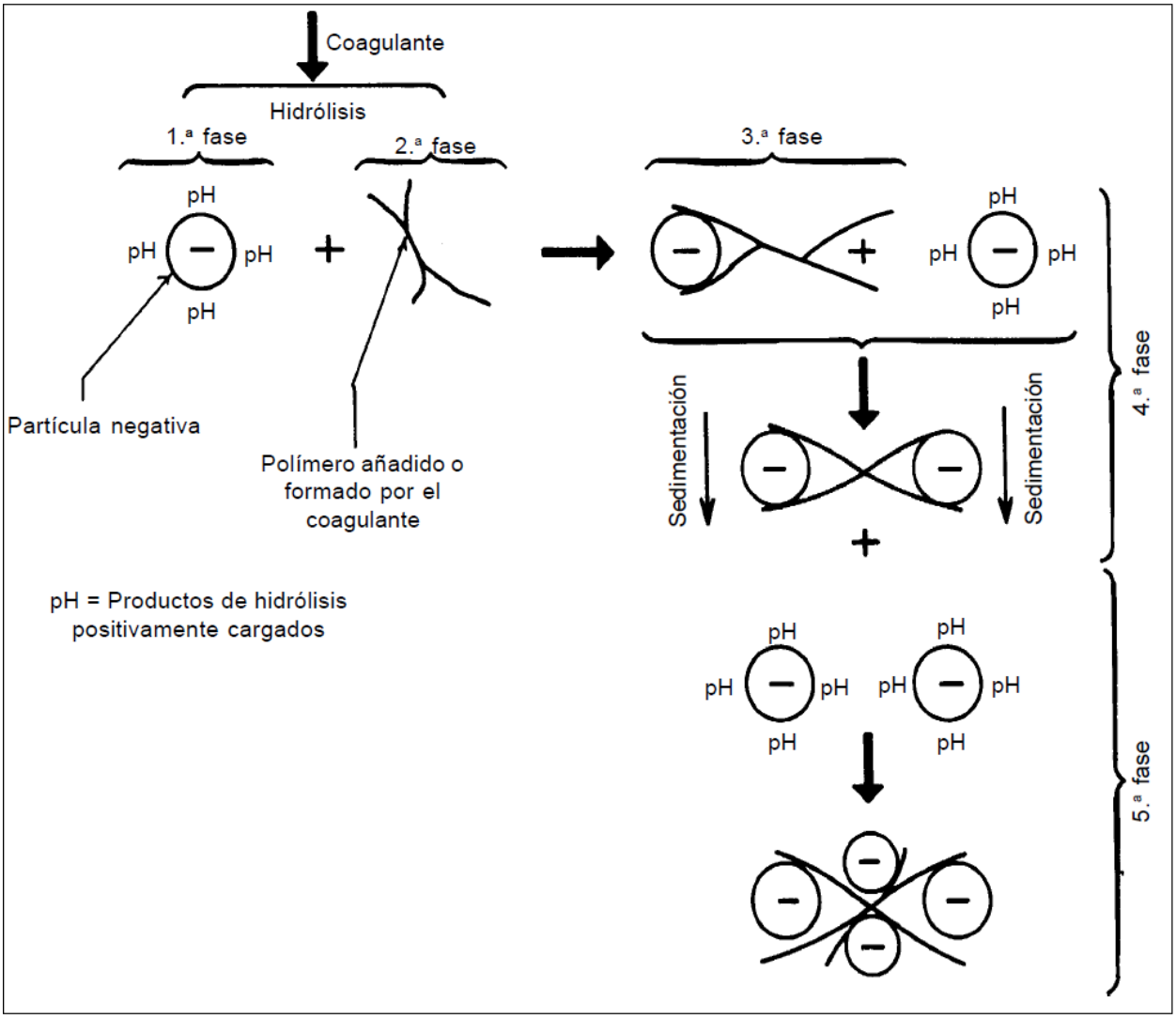
5) Formación de los flóculos.

6) Precipitación del hidróxido metálico.

Algunas de estas etapas ocurren secuencialmente. Otras coinciden parcialmente y otras incluso pueden ocurrir simultáneamente. Se puede suponer que las diferentes etapas de la reacción pueden resultar controlables en un cierto porcentaje, bajo diversas condiciones químicas (Figura 2).

Figura 2.

Modelo esquemático del proceso de coagulación.



Nota. Figura obtenida de (Barrenechea, 2004)

4.2.3 Coagulantes químicos

Uno de los productos químicos más usados como coagulantes en el tratamiento de las aguas es el sulfato de aluminio.

4.2.3.1 Sulfato de aluminio.

Puede estar en forma sólida o líquida. La sólida se presenta en placas compactas, gránulos de diverso tamaño y polvo. Su fórmula teórica es $Al_2(SO_4)_3$. $18H_2O$. Su concentración se define, en general, por su contenido en alúmina, expresada en Al_2O_3, es decir, 17% aproximadamente. La densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo es del orden de 1.000 kg/m^3. El contenido en alúmina Al_2O_3 de la forma líquida fluctúa generalmente entre 8 y 8,5%; es decir, 48 a 49% en equivalente polvo o también 630 a 650 g de $Al_2(SO_4)_3$ .18 H_2O por litro de solución acuosa. (Cánepa de Vargas, 2004)

Principales reacciones del sulfato de aluminio con la alcalinidad:

1) Sulfato de aluminio (líquido o sólido):

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\ Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 3\ CaSO_4 + 2\ Al(OH)_3 + 6\ CO_2$$

2) Sulfato de aluminio + cal:

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\ Ca(OH)_2 \rightarrow 3\ CaSO_4 + 2\ Al(OH)_3$$

3) Sulfato de aluminio + soda cáustica:

$$Al_2(SO_4)_3 + 6\ NaOH \rightarrow 2\ Al(OH)_3 + 3\ Na_2SO_4$$

4) Sulfato de aluminio + carbonato sódico:

$$Al_2(SO_4)_3 + 3\ Na_2CO_3 + 3\ H_2O \rightarrow 2\ Al(OH)_3 + 3\ Na_2SO_4 + 3\ CO_2$$

$$Al_2(SO_4)_3 + 6\ Na_2CO_3 + 6\ H_2O \rightarrow 2\ Al(OH)_3 + 3\ Na_2SO_4 + 6\ NaHCO_3$$

4.2.3.2 Interacción de los coagulantes inorgánicos con el agua y la alcalinidad

La teoría ácidos-bases de Bronsted-Lowry explica las reacciones de los iones de aluminio y hierro con el agua, las cuales son de gran utilidad en la desestabilización de sistemas coloidales.

En el agua todos los cationes metálicos provenientes de los coagulantes químicos son hidratados. Las especies iónicas Fe^{3+} y Al^{3+} no existen en el agua, sino que se presentan como complejos hidratados: $Fe(H_2O)_6^{+3}$ y $Al(H_2O)_6^{+3}$, los mismos que se comportan como ácidos débiles; es decir, son donadores de protones. Si una sal de hierro (III) o de aluminio (III) está

presente en una concentración menor que la solubilidad del hidróxido metálico, el metal formará monómeros, dímeros y quizás pequeños complejos poliméricos de hidróxido metálico, además del ion acuoso-metálico libre. (Cánepa de Vargas, 2004)

Los iones acuosos-metálicos de aluminio y hierro no solo reaccionan con el agua sino también con la alcalinidad. Esta favorece que la reacción se produzca. Si la alcalinidad no está presente, es necesario agregarla en forma de cal u otro alcalinizante.

4.3 Proceso de floculación

Según Cánepa de Vargas (2004) la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen de forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

1) Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido.

2) Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento.

3) Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse. (Cánepa de Vargas, 2004)

4.3.1 Factores que influyen en la floculación

Los principales factores que influyen en la eficiencia de este proceso son:

- La naturaleza del agua: La floculación es extremadamente sensible a las características fisicoquímicas del agua cruda, tales como la alcalinidad, el pH y la turbiedad.

- Las variaciones de caudal: Al disminuir el caudal, aumenta el tiempo de retención y disminuye el gradiente de velocidad. Al aumentar el caudal, el tiempo de retención disminuye, el gradiente de velocidad se incrementa y viceversa.

- La intensidad de agitación: Si la agitación es demasiado débil, es posible que los coagulantes no se dispersen adecuadamente en el agua, lo que puede dificultar la

formación de flóculos. Por otro lado, una agitación excesiva puede romper prematuramente los flóculos formados, lo que reduce la eficacia del proceso de floculación.

- El tiempo de floculación: la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo. Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas.

- El número de compartimentos de la unidad: Cuanto mayor sea el número de compartimentos, menores serán los cortocircuitos del agua.

4.4 Coagulantes orgánicos

Los coagulantes orgánicos tienen un efecto coagulante superior al de los inorgánicos debido a su mayor carga, lo que implica que son necesarias menores dosis para obtener un mismo efecto. Además, funcionan en intervalos de pH más amplios y algunos de ellos también pueden reaccionar con compuesto orgánicos disueltos como los sulfonatos de lignina, los surfactantes aniónicos, el ácido algínico y el ácido húmico, formando compuestos insolubles. Otra ventaja es que generan un menor volumen de lodos, reducen o eliminan la necesidad de añadir alcalinidad al agua y no incrementan la concentración de cloruros o sulfatos en las aguas tratadas. (Diaz F., 2019)

La semilla de chía funciona como excelente coagulante por la cantidad excesiva de mucílago que producen mediante un proceso de agitación con agua, dicho mucílago es utilizado para remover la turbidez o sólidos totales en las aguas crudas como bien lo marca el objetivo del proyecto. El mucílago de la semilla de chía cuenta con propiedades que le permiten retener agua y emulsificar. El contenido de mucílago en semillas es de 3.5% y la composición del mucílago es: humedad 9.37%, proteína 29%, fibra bruta 11.42%, aceite 3.83%, cenizas 10.27% y 56.24% de extracto libre de nitrógeno. (M. Xingú López y otros, 2017)

La semilla de linaza como coagulante natural resulta ser muy beneficiosa para la remoción de sólidos totales en aguas ya que sus propiedades permiten la eliminación de materias existentes en el agua, esta semilla desprende mucílago en abundancia al ser mezclada con cierta cantidad de agua cumpliendo con el objetivo del porque su aplicación en este estudio. (Mendoza & Lugo, 2021)

4.4.1 Mucílago de semillas de chía (Salvia hispánica)

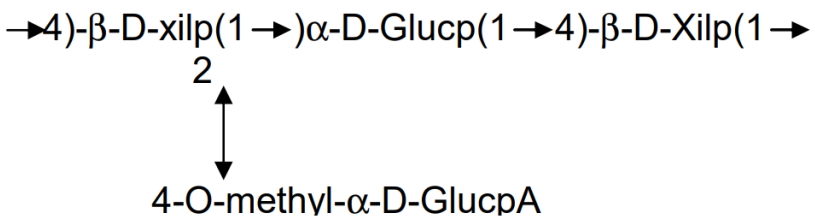
La chía es una planta que produce pequeñas semillas de color negro con un alto contenido oleaginoso y proteico. El mucílago es un hidrocoloide soluble en agua que se extrae principalmente de la semilla. (Capitani, 2013)

- Obtención y estructura:

El mucílago de chía es un polisacárido de alto peso molecular, el cual varía entre 0,8 a 2 x106 daltons. Emerge de la semilla cuando ésta entra en contacto con el agua, cubriéndola en forma de un halo transparente. Las unidades estructurales que componen el mucílago de la semilla de chía, son descritas como un tetrasacárido con una cadena principal compuesta por unidades de (1→4)-β-D-xilopiranosil-(1→4)-α-D-glucopiranosil-(1→4)-β-D-xilopiranosil con ramificaciones de 4-O-metil-α-D-ácido glucurónico en la posición O-2 de β-Dxilopiranosil de la cadena principal (Figura 3). (M. Salgado Cruz y otros, 2013)

Figura 3.

Estructura del mucilago de chía



Nota. Figura obtenida de (M. Xingú López et al., 2017)

El proceso de obtención del mucílago de la semilla de chía parece ser sencillo, por tratarse de un hidrocoloide soluble en agua. Sin embargo, presenta etapas críticas de operación tales como la de llevar a cabo la separación de las semillas del líquido gelatinoso donde se encuentra el mucílago, producto de interés. Debido a que el mucílago retiene en su estructura una elevada proporción de líquido, se dificultan los procesos de escurrido y de deshidratación, por lo que se requiere el uso de alcohol como solvente para precipitar el mucílago o bien la separación por centrifugación. (Capitani, 2013)

4.4.2 Mucílago de semillas de linaza (Linum usitatissimum)

El mucilago de la linaza tiene propiedades reológicas como: adecuada capacidad espumante, estabilidad, obstrucción a la presencia de sales y viscosidad estable. El mucílago se encuentra asociado a la cáscara del grano y está constituido por polisacáridos ácidos y neutros. La extracción más adecuada según Goh et al., (2006). Son: agua entre 85 y 90ºC a pH 6,5 a 7,0 y en una proporción agua: semilla de 13:1. (Cruz Ninaquispe, 2017)

4.5 Impacto ambiental y sostenibilidad del tratamiento de agua

La contaminación del agua resulta de todas las actividades humanas, domésticas, industriales y agrícolas, las cuales han causado millones de muertes infantiles cada año, sobre todo países en desarrollo, por lo tanto, es necesario desarrollar y aplicar nuevos tratamientos elementales para potabilizar agua (Wu, 2013).

El proceso de coagulación y floculación, se lleva a cabo mediante agentes coagulantes que desestabilizan las partículas coloidales presentes en el agua, posteriormente las partículas se aglomeran y forman grandes flóculos para facilidad de sedimentación y ocurre la reducción de las partículas en suspensión, lo que permite que el agua alcance las características físicas y organolépticas idóneas para el consumo humano según las normas y estándares de salud pública. (Bratby, 2006)

El mucílago, al ser una sustancia de origen natural y biodegradable, se descompone de forma natural en el medio ambiente sin dejar residuos tóxicos o contaminantes dañinos. Después que el mucílago cumple su función como coagulante en el proceso de tratamiento de agua, se degrada de manera segura y no representa una carga ambiental adicional. (Gurdi N L Pez, 2012)

La biodegradabilidad del mucílago como coagulante es una ventaja significativa sobre algunos coagulantes químicos convencionales, que pueden dejar subproductos no deseados en el agua tratada y en el medio ambiente. Es una alternativa natural y renovable, su uso contribuye a la clarificación del agua y minimiza el impacto ambiental del tratamiento de agua potable.

4.6 Evaluación de coagulantes

4.6.1 Prueba de jarras

Las condiciones operacionales que se desarrollan en la prueba son:

- Mezcla rápida**:** Utilizada para poner en contacto el coagulante con todas las partículas coloidales presentes en el cuerpo de agua, para disminuir su estabilidad e iniciar el proceso de aglomeración para la formación del floc. Este tiempo estimado es de 30 a 100 revoluciones por minuto y depende directamente del tipo de coagulante a utilizar y sus propiedades.

- Mezcla lenta**:** No puede exceder de los 15 minutos como tiempo máximo, porque puede interferir en la calidad del Floc que se encuentra formando y la aparición de burbujas y disminuir las partículas que se van a sedimentar.

- Sedimentación**:** Es la última etapa de este proceso, el tiempo aproximado es de 30 minutos, tiempo necesario para que las partículas se sedimenten.

4.6.2 Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Es una técnica utilizada para la identificación de grupos funcionales en los distintos tipos de muestras. Como resultado se obtienen espectros de infrarrojo. Un espectro es una secuencia de picos o bandas que describe los grupos funcionales presentes en una muestra. (Mondragón Cortez, 2020)

Las principales partes que conforman el espectro infrarrojo presentado en la Figura 4 son:

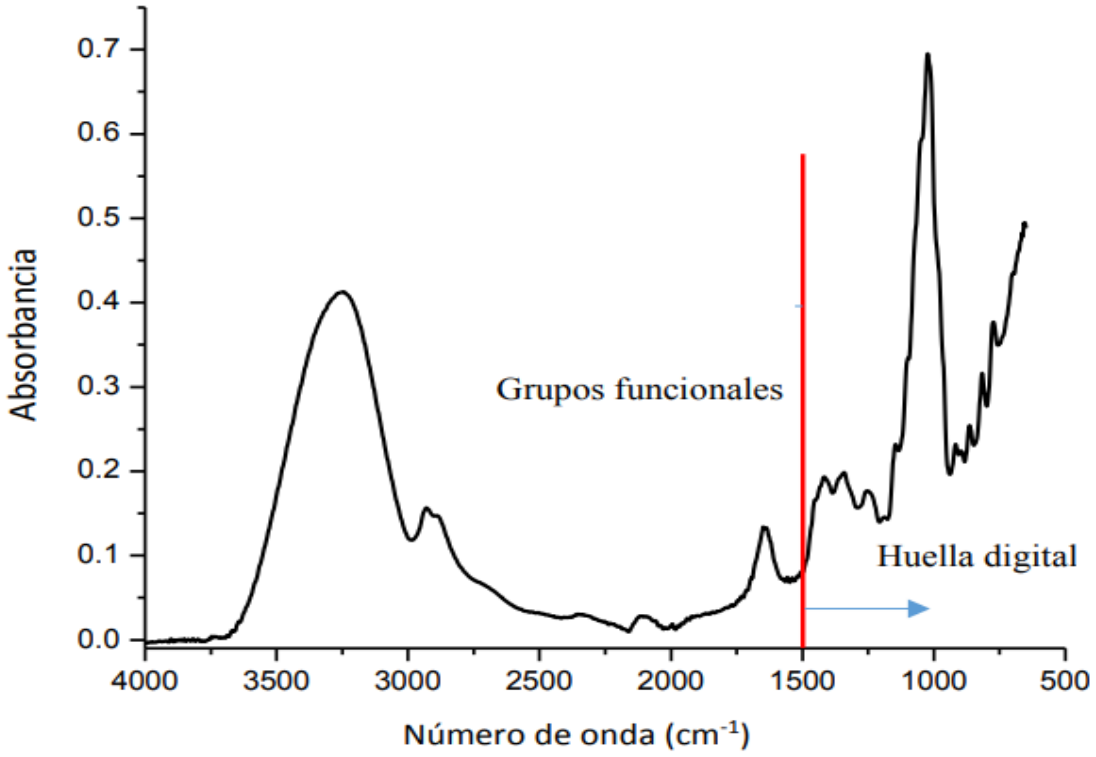
- El eje X se detalla el número de onda (cm-1)

- El eje Y la radiación infrarroja que puede ser dado en valores de transmitancia o absorbancia (%).

- La región relevante en el espectro entre 1500 y 500 cm-1 se denomina huella digital, que ayuda en la identificación de estructuras específicas de cada molécula.

Figura 4.

Espectro infrarrojo



Nota. Figura obtenida de (Mondragón Cortez, 2020)

4.6.3 Análisis de Taguchi

El método Taguchi es una herramienta eficiente para el diseño y optimización de procesos y productos, debido a que se centra en la identificación y evaluación de las variables con mayor influencia en la salida del proceso, en la reducción de los efectos de los factores no controlables y en la reducción de la variación del desempeño del proceso (Box., 1998).

El método se basa en el estudio de los efectos principales generados por la ocurrencia de algo no controlado e incorpora en su análisis las variaciones que afectan en forma negativa a la calidad, mediante el uso de experimentos, el análisis de datos, el análisis de interacciones y la comprobación (Box., 1998).

4.6.4 Diseño de superficie de repuesta

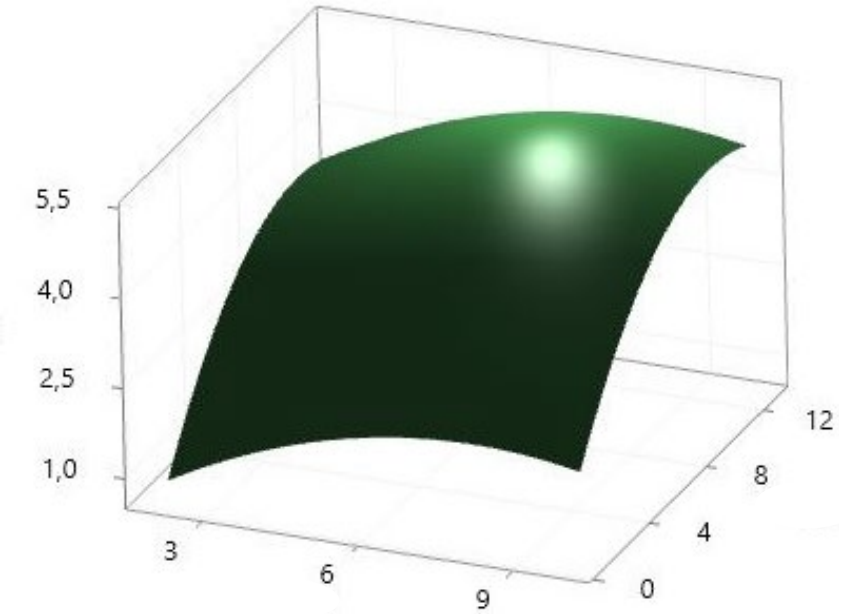
Un diseño de superficie de respuesta es un conjunto de técnicas avanzadas de diseño de experimentos (DOE) que ayudan a entender mejor y optimizar la respuesta. La metodología del diseño de superficie de respuesta se utiliza con frecuencia para refinar los modelos después de haber determinado los factores importantes utilizando diseños de cribado o diseños factoriales, especialmente si se sospecha que existe curvatura en la superficie de respuesta como en la Figura 5. (MiniTab, 2024)

Para estimar los parámetros del modelo de manera efectiva, se aplica un diseño experimental apropiado para recopilar los datos necesarios. Algunas de las características más importantes de un buen diseño son:.

- No requiere de un gran número de experimentos.
- Permite estudiar la adecuación del modelo (falta de ajuste).
- Proporciona estimadores precisos de los coeficientes del modelo.
- Proporciona una estimación interna del error.

Figura 5.

Superficie de respuesta con curvatura



Nota. Figura obtenida de (MiniTab, 2024).

5 Metodología

La presente investigación se centró en evaluar el uso de coagulantes orgánicos como una alternativa sostenible para el tratamiento de agua en Nicaragua, dado que los coagulantes químicos actualmente empleados provocan impactos ambientales significativos (Torrellas Hidalgo, 2012). En este contexto, la investigación aborda un problema práctico relacionado con el acceso a agua limpia, al mismo tiempo que busca soluciones en armonía con los principios de sostenibilidad ambiental. Se clasifica como aplicada, ya que sus resultados pueden ser implementados directamente en sistemas de tratamiento de agua potable. Asimismo, es cuantitativa, pues se apoya en la recolección de datos numéricos y el uso de análisis estadísticos para optimizar la eficiencia de los coagulantes. La investigación es experimental, ya que implica la manipulación de variables como la concentración de los coagulantes, el pH y el tiempo de agitación para evaluar su impacto en la remoción de sólidos suspendidos. Además, es transversal porque se desarrolla en un periodo de tiempo específico, y es de campo debido al uso de muestras de agua real. Se clasifica como descriptiva-explicativa al proporcionar una descripción detallada de las propiedades de los coagulantes y al explicar los mecanismos de coagulación. Finalmente, es empírica porque los resultados se derivan de observaciones directas y experimentación, garantizando un enfoque riguroso y basado en la evidencia.

La materia prima estuvo conformada por semillas de chía (Salvia hispánica) y semillas de linaza (Linum usitatissimum), los materiales de laboratorio y equipos utilizados en esta investigación se presentan en el Anexo 1.

Inicialmente se obtuvieron los coagulantes orgánicos a partir de las semillas de chía y linaza. Se ajustó el modelo matemático que corresponde al arreglo matricial Taguchi L9 determinando los coeficientes que describen el fenómeno de estudio. Se determinó la dosis óptima mediante superficie de respuestas para obtener el mínimo absoluto.

5.1 Caracterización de las propiedades físicas y químicas de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucílago en chía y linaza.

5.1.1 Obtención de coagulantes orgánicos

- Las semillas se limpiaron para eliminar cualquier tipo de impureza. Posteriormente, se pesaron 100 g de las semillas en una balanza analítica.

- Para la extracción del mucílago el producto se sometió a un proceso de calentamiento a 70°C durante 30 minutos, la agitación se realizó a 200 revoluciones por minuto (rpm) en una relación 1:15 (semilla/agua).

- El proceso de separación del mucílago de semilla de chía se llevó a cabo por filtración con una malla de filtro Nº20, ejerciendo presión sobre el mucílago ya que está muy adherido a la semilla.

- En el caso de la semilla de linaza el proceso de separación del mucílago se llevó a cabo por filtración utilizando malla de filtro Nº20, mientras estaba caliente.

- De esta manera el coagulante orgánico en forma líquida gelatinosa quedó listo para las pruebas de jarras.

Los rendimientos en la obtención de los mucílagos se presentan en el Anexo 2.

5.1.2 Caracterización de propiedades físicas y químicas de coagulantes orgánico por medio de FTIR.

Las muestras se colocaron sin ningún tipo de tratamiento previo sobre el lente del dispositivo y se analizó el porcentaje (%) de transmitancia en un intervalo entre 4000 cm-1 y 550 cm-1 en un espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier con dispositivo de reflexión total atenuada (ATR). Posteriormente, se identificaron las bandas relacionadas con los grupos funcionales característicos de cada extracto en el espectro según el valor de frecuencia correspondiente donde se identificó la cinética y el potencial de coagulación para el mucílago de chía y el mucílago de linaza.

5.2 Caracterización del agua cruda

Se ha utilizado agua cruda, proveniente de una fuente de agua subterránea, para determinar el potencial de coagulación y la eficiencia de remoción de solidos suspendidos de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucilago de semillas de chía y linaza.

Los procedimientos de tomas de muestras y cadena de custodia aplicados a las muestras de agua cruda se presentan en los Anexos 3 y 4. Los métodos analíticos utilizados para la determinación de los parámetros físicos, químicos y biológicos han sido los Métodos Estándares para estudios de agua y aguas residuales, 23ª, Edición 2017, la evaluación de la calidad del agua

cruda, se realizó con respecto a las Normas CAPRE. Los resultados se presentan en el Anexo 6.

5.3 Determinación de las dosis óptimas de coagulantes orgánicos obtenidos del mucilago de semillas de chía y linaza.

Para la determinación de la dosis óptima de coagulantes orgánicos para remoción de sólidos suspendidos en agua cruda, se utilizó el ensayo de pruebas de jarras combinados con un diseño experimental de Taguchi – L9 y optimización con superficie de respuesta.

Inicialmente se propuso la matriz experimental de Taguchi – L9, de 3 factores y 3 niveles:

1). - Concentración del Mucilago (CC): 10,15,20 mg/L;

2). - Potencial de Hidrógeno (pH): 6,7,8;

3). -Tiempo de agitación (Tiempo): 10,15,20 minutos.

No obstante, al realizar los ensayos preliminares de pruebas de jarras, la turbidez final aumentó respecto a la turbidez inicial debido a que las concentraciones propuestas de los coagulantes orgánicos, fueron muy altas (Ver Resultados en el Anexo 6). Por tales razones se realizaron ensayos hasta establecer finalmente las concentraciones apropiadas para el ensayo de pruebas de jarras en 10, 15 y 20 mg/L, en los que se obtuvieron disminuciones de la turbidez inicial.

El arreglo matricial aplicado en el diseño experimental para el Análisis de Taguchi y su consecuente optimización haciendo uso del Software Estadístico Minitab 19, se presenta en la Tabla 2.

5.3.1 Pruebas de jarras

Se utilizaron 4 vasos de precipitación y 50 litros de muestra de agua sin tratamiento (cruda). Se colocó un litro de muestra en cada recipiente que se encontraba en el equipo. Posteriormente, se programó en el equipo de jarras según lo indicado en la Tabla 2. El tiempo de reposo para la sedimentación fue de 30 minutos a 0 rpm. Después de la sedimentación se extrajeron 100 ml de cada muestra con ayuda de una micropipeta y se analizaron los parámetros más representativos, detallados a continuación:

- Parámetro: Conductividad eléctrica

Se tomaron 100 ml de muestra del agua en un vaso de precipitación y se midió el valor con la utilización de un conductímetro.

- Parámetro: pH

Para elevar el pH de la solución para hacer las corridas a pH de 8, se utilizó Hidróxido de Sodio 0.5N. En cambio, para disminuir el pH se utilizó ácido sulfúrico 0.1N.

En la toma de la muestra se tomaron 100 ml de muestra del agua en un vaso de precipitación y se midió el valor con la utilización de un medidor de pH.

- Parámetro: Turbidez

Se tomaron 20 ml de la muestra de agua y se colocó la muestra en los tubos de análisis. Se leyó el valor de cada muestra en el turbidímetro.

5.3.1.1 Análisis de Taguchi.

Se utilizó un arreglo matricial - L9 de Taguchi para organizar las corridas experimentales y sus respuestas (Turbidez). La Matriz de Taguchi - L9, tiene 3 factores y 3 niveles. Las corridas están organizadas como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2.

Arreglo matricial L9 de Taguchi.

No Corrida	CC (mg/L)	pH	Tiempo (min)	Turbidez (NTU)
1	10	8	20	
2	10	7	15	
3	15	7	15	
4	10	6	10	
5	15	6	10	
6	15	8	20	
7	20	7	15	
8	20	6	10	
9	20	8	20	

Nota. Elaboración propia.

El modelo se justifica debido al cambio en las condiciones de operación del proceso y por la necesidad de medir el efecto sobre una o varias propiedades. Igualmente, por el concepto de interacción, es decir, el efecto que un factor de entrada "A" tiene sobre el efecto de otro factor de entrada "B" y/u otro factor de entrada “C”. En otras palabras, el efecto que "B" y/o “C” tiene sobre la variable de respuesta depende del estado en el cual se encuentra "A".

El diseño experimental aplicado y analizado tiene como factores, las variables independientes: concentración del coagulante orgánico (CC), el potencial de hidrógeno (pH) y el tiempo de agitación (Tiempo), siendo la turbidez final la variable de respuesta.

5.3.1.1.1 Análisis de efectos principales.

Se realizo un análisis de los efectos principales generados por cada factor (CC, pH, y Tiempo) y sus distintas interacciones (CC*pH, CC*Tiempo, pH*Tiempo, CC^2, pH^2, $Tiempo^2$, CC*pH*Tiempo) sobre las variables respuestas, específicamente establecer el impacto de su influencia sobre la turbidez final.

5.3.2 Optimización de dosis de coagulante orgánico con el método de superficie de repuesta.

Dado que ya existe un diseño experimental, basado en el arreglo matricial de Taguchi L9, se procedió al ajuste del modelo matemático que corresponde al arreglo matricial propuesto, aplicándole las técnicas del análisis de regresión para la determinación de los coeficientes del modelo matemático. Inicialmente se propuso un modelo cuadrático, pero debido al tamaño de la muestra (9 corridas), resulto insuficiente. Por tales razones se realizó una simplificación, eliminado los factores cuadráticos e interacciones, de lo cual se obtuvo un modelo lineal simple.

Se realizó un ANOVA al arreglo matricial que contiene los datos experimentales y sus variables respuesta, para determinar la influencia de cada factor tanto en el proceso de coagulación con relación a la disminución en la turbidez final como en el modelo matemático para reproducir los resultados obtenidos.

Se aplicó el Método de superficie de respuestas para obtener las regiones de optimización delimitadas por las variables independientes:

1).- Concentración del Mucílago (CC): 10,15,20 mg/L;

2).- Potencial de Hidrogeno (pH): 6,7,8;

3).- Tiempo de agitación (Tiempo): 10,15,20 minutos, así mismo como la combinación de valores de variables independientes que permiten obtener el mínimo absoluto en la región de estudio.

Las gráficas de contorno y de superficie de respuestas se obtuvieron utilizando el lenguaje de programación R.

Con los resultados obtenidos se determinó la dosis optima y los valores de las variables operacionales que maximizan el proceso de coagulación para remoción de sólidos suspendidos presentes en el agua cruda sometida a tratamiento.

5.4 Evaluación de la eficiencia de los coagulantes orgánicos

5.4.1 Eficiencia de la remoción de turbidez

Se calculó mediante la ecuación 1

$$Eficiencia_{Turbidez} = \frac{Turbidez_{inicial} - Turbidez_{final}}{Turbidez_{final}}$$

Ecuación 1

Se compararon los resultados del análisis de agua cruda y se realizó un análisis de agua procesada donde se calculó la densidad de coliformes fecales y coliformes totales en 100 mL de muestra. A partir de lo cual se calculó el porcentaje de remoción de patógenos mediante la siguiente ecuación 2

$$\%\ Remoción\ de\ coliformes = \frac{Coliformes_{inicial} - Coliformes_{final}}{Coliformes_{final}}$$

Ecuación 2

Adicionalmente se realizó un análisis comparativo con relación a las propiedades, ventajas y desventajas de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucilago de linaza y del mucílago de chía vs sulfato de aluminio - coagulante químico de amplio uso en los sistemas de tratamientos de aguas residuales y potabilización de agua, por medio del cual se establecieron las condiciones operacionales en las que se recomienda el uso de estos coagulantes orgánicos.

6 Resultados

6.1 Caracterización de las propiedades físicas y químicas de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucílago en chía y linaza usando espectroscopía para identificar su cinética y potencial de coagulación.

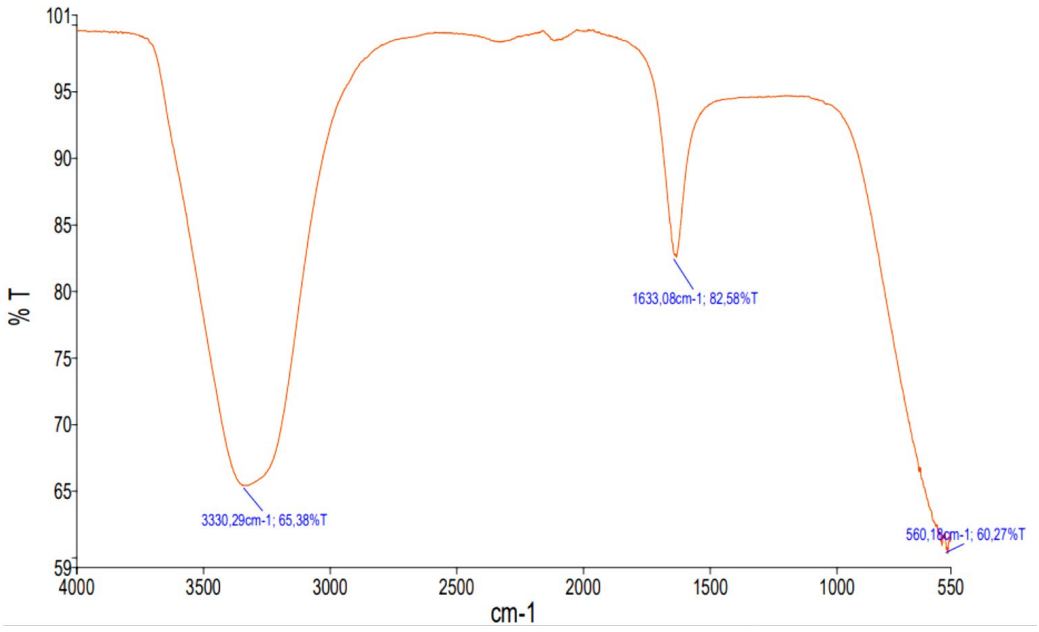
Para realizar la caracterización de las propiedades físicas y químicas de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucílago de chía y linaza a partir de los espectros infrarrojos presentados, se realizó una interpretación basada en los picos observados en los espectros FTIR presentados en las Figuras 6 y 7.

6.1.1 Análisis del espectro FTIR del mucílago de linaza

En la Figura 6 se observan tres picos, que se interpretan químicamente y que tienen implicaciones en la coagulación.

Figura 6.

Espectro FTIR del mucílago de Linaza



Nota. Curvas obtenidas del espectro FTIR.

Pico en 3330.29 cm^{-1} (65.38%T) es característico de los estiramientos de los grupos hidroxilo (-OH), comunes en polisacáridos y agua absorbida. La intensidad de este pico sugiere una alta

concentración de grupos hidroxilo, lo que implica que el mucílago de linaza tiene una estructura fuertemente hidratada, con muchas oportunidades para formar enlaces de hidrógeno.

Pico en 1633.08 cm^{-1} (82.58%T) corresponde a los estiramientos de los grupos carbonilo (C=O), presentes en ácidos urónicos y amidas. Estos grupos son comunes en las estructuras de polisacáridos que forman parte de la matriz del mucílago. La presencia de estos grupos funcionales sugiere que el mucílago puede tener sitios activos que facilitan la interacción con partículas cargadas, promoviendo la coagulación.

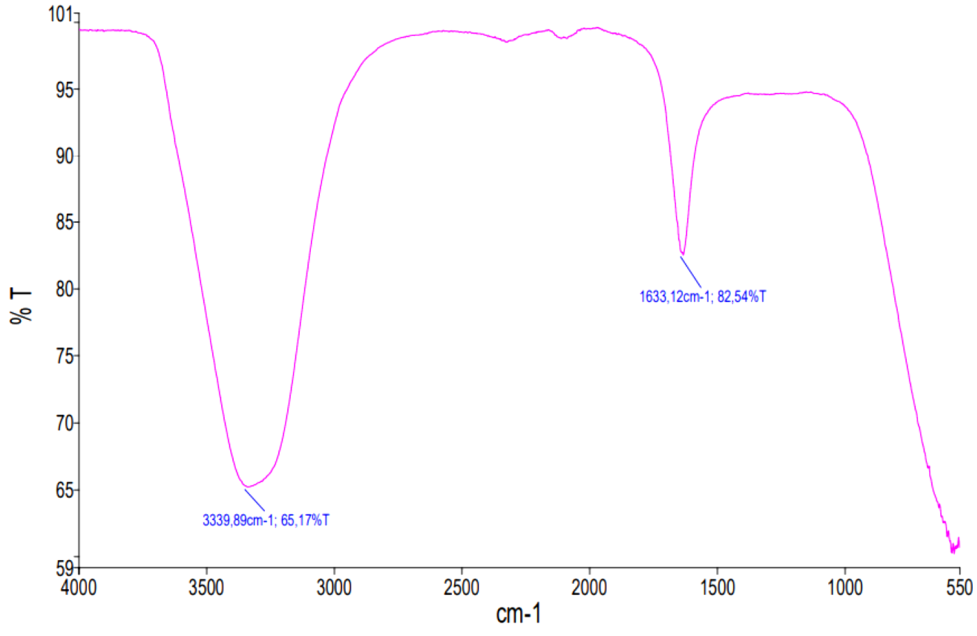
Pico en 560.16 cm^{-1} (60.27%T) está relacionado con las vibraciones fuera del plano de los enlaces C-H en anillos aromáticos, o con enlaces específicos como los fosfatos o sulfuros que podrían estar presentes en cantidades menores. Estos grupos podrían ser parte de compuestos más complejos presentes en el mucílago.

6.1.2 Análisis del espectro FTIR del mucílago de chía

En la Figura 7 se observan dos picos, que se interpretan químicamente y que tienen implicaciones en la coagulación.

Figura 7.

Espectro FTIR de la Chía



Nota. Curvas obtenidas del espectro FTIR.

Pico en 3339.98 cm^{-1} (65.17%T): Similar al mucílago de linaza, este pico también indica una alta presencia de grupos hidroxilo (-OH). La pequeña diferencia en el número de onda sugiere una ligera variación en la estructura de los polisacáridos debido a diferencias en la composición o en la cantidad de agua absorbida.

Pico en 1633.12 cm^{-1} (82.54%T): coincide casi exactamente con el del mucílago de linaza, indicando una similar presencia de grupos carbonilo (C=O), que son cruciales para la actividad coagulante. La coincidencia indica que ambos mucílagos comparten estructuras químicas similares en términos de sus componentes activos, como los ácidos urónicos.

La ausencia de un pico similar al de 560.16 cm^{-1} del espectro de linaza, en el espectro de chía indica diferencias en la presencia de grupos fosfatos, sulfuros, o enlaces aromáticos complejos que están más presentes en la linaza. Esto influye en cómo interactúa el mucílago de chía con ciertos tipos de partículas coloidales o iones en solución.

6.1.3 Propiedades físicas y químicas de los coagulantes orgánicos obtenidos de los mucilagos de chía y linaza

A continuación, se presentan las propiedades físicas y químicas de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucílago de chía y linaza que han sido caracterizadas a través de la espectroscopía infrarroja (Figuras 6 y 7):

6.1.3.1 Propiedades físicas.

- **Capacidad de retención de agua (higroscopicidad):** Ambos mucílagos presentan picos prominentes en la región de 3330-3340 cm^{-1}, atribuibles a los estiramientos de los grupos hidroxilo (-OH). Estos grupos son altamente polares y tienen una afinidad significativa por el agua, lo que indica que los mucílagos son capaces de absorber y retener agua en su estructura.
- **Viscosidad y comportamiento reológico:** La intensidad y anchura del pico en la región de 3330-3340 cm^{-1} está relacionada con la capacidad del mucílago para formar una estructura gelatinosa, debido a la red de enlaces de hidrógeno entre las moléculas de polisacáridos.

6.1.3.2 Propiedades químicas.

- **Presencia de grupos hidroxilo (-OH):** La presencia de un pico amplio en la región de 3330-3340 cm^{-1} en ambos mucílagos indica una abundancia de grupos hidroxilo. Estos grupos están presentes en las moléculas de polisacáridos que componen el mucílago, lo que indica que estas macromoléculas tienen numerosas oportunidades para formar enlaces de hidrógeno, tanto internamente como con moléculas de agua y otras especies químicas en solución.
- **Presencia de grupos carbonilo (C=O):** Los picos en la región de 1633 cm^{-1} en ambos mucílagos sugieren la presencia de grupos carbonilo, típicos en ácidos urónicos, ésteres, o amidas. Estos grupos C=O participan en interacciones electrostáticas con partículas cargadas, neutralizando sus cargas y facilitando la desestabilización de las suspensiones coloidales. Esto es especialmente importante en la formación de flóculos más estables y compactos, que son menos susceptibles a romperse.

- **Estructuras de polisacáridos complejos:** Los polisacáridos complejos tienen múltiples sitios activos que interactúan con partículas en suspensión. Estos polisacáridos proporcionan la estructura tridimensional necesaria para atrapar partículas y también ofrecen sitios de unión para metales pesados y otros contaminantes, lo que aumenta la eficacia del mucílago como coagulante en tratamientos de agua.

- **Presencia de grupos fosfato o sulfuro (observado en linaza):** En el espectro del mucílago de linaza, se observa un pico en la región de 560 cm^{-1}, que está asociado a grupos fosfato o sulfuro. Los fosfatos y sulfuros interactúan de manera más efectiva con ciertos iones metálicos o partículas específicas presentes en soluciones acuosas, lo que mejora la eficiencia del mucílago en aplicaciones donde estos contaminantes son prevalentes. Este aspecto químico adicional hace que el mucílago de linaza sea más versátil o especializado en ciertas aplicaciones de tratamiento de agua.

6.1.4 Cinética de los procesos de coagulación con agentes orgánicos – mucilago de chía y de linaza.

La cinética de coagulación de los coagulantes orgánicos obtenidos del mucílago de chía y de linaza está intrínsecamente ligada a sus propiedades físicas y químicas, las cuales han sido

caracterizadas mediante espectroscopía infrarroja (Figuras 6 y 7). A continuación, se describe cómo estas propiedades influyen en las etapas del proceso de coagulación.

6.1.4.1 Etapas de la cinética de coagulación según las propiedades físicas y químicas de los mucílagos de chía y de linaza.

La cinética de coagulación se desglosa en tres etapas clave:

1. **Desestabilización coloidal:** En esta primera etapa, la desestabilización es relativamente rápida, dado que los grupos carbonilo y fosfato/sulfuro interactúan rápidamente con las partículas en suspensión. La linaza, debido a la presencia de grupos fosfato o sulfuro, presenta una cinética más rápida en esta fase inicial comparada con el mucílago de chía, especialmente en aguas con altos niveles de iones metálicos o contaminantes inorgánicos.

2. **Formación de microflóculos (coagulación primaria):** La formación de micro flóculos en el mucílago de chía es un proceso más gradual debido a su mayor viscosidad, lo que permite un control más preciso de la coagulación y una formación más estable de flóculos. Por otro lado, el mucílago de linaza, con una menor viscosidad relativa, forma micro flóculos más rápidamente, pero estos son inicialmente menos estables.

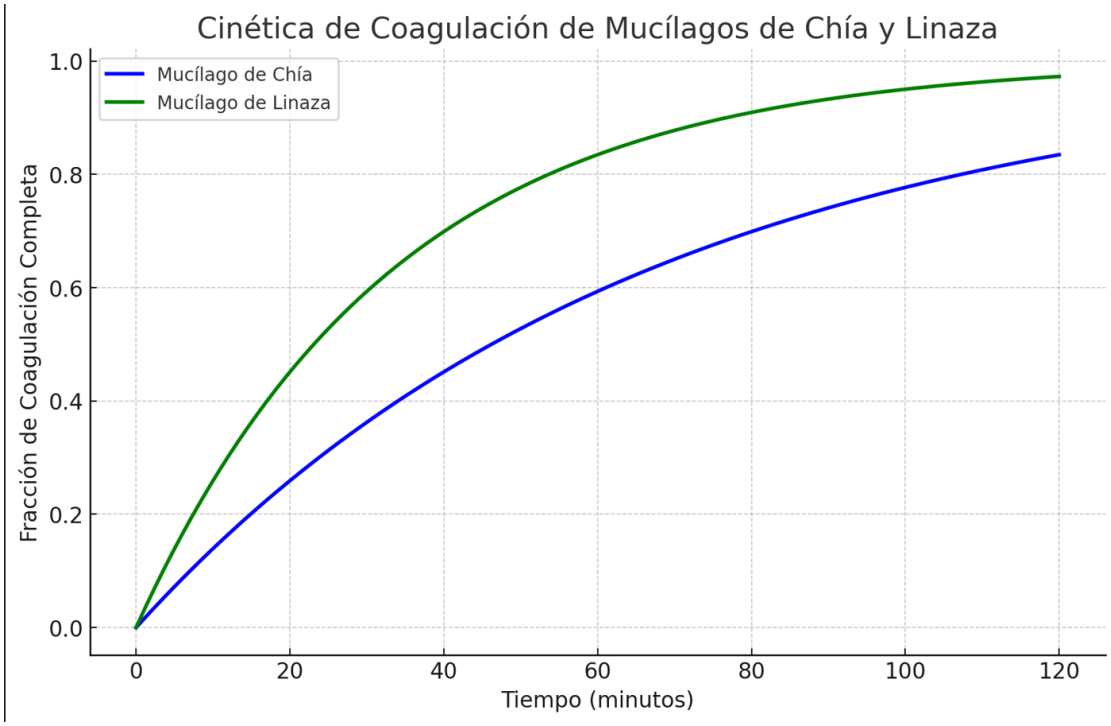
3. **Crecimiento y maduración de flóculos (floculación secundaria):** El mucílago de chía, debido a su alta viscosidad, exhibe una cinética más lenta, pero produce flóculos más robustos y menos propensos a desintegrarse. En contraste, el mucílago de linaza genera flóculos más rápidamente, pero con un riesgo potencial de fragmentación si no se maneja adecuadamente.

6.1.4.2 Incidencia de la composición química de cada coagulante orgánico en la cinética de los procesos de coagulación.

En la Figura 8, se presenta la influencia de las propiedades químicas y físicas de cada mucílago en la velocidad del proceso de coagulación, con la linaza destacándose por su rapidez y la chía por la estabilidad en la formación de flóculos.

Figura 8.

Cinética del proceso de coagulación con agentes orgánicos.



Nota. Elaboración propia a partir de datos en Excel.

Mucílago de Linaza (línea verde): Muestra una cinética de coagulación más rápida, lo que se traduce en una mayor fracción de coagulación completa en menos tiempo. Esto sugiere que el mucílago de linaza es más eficiente para desestabilizar las partículas coloidales y formar flóculos más rápidamente.

Mucílago de Chía (línea azul): Presenta una cinética de coagulación más lenta en comparación, pero su curva es más gradual, lo que indica una formación de flóculos más controlada y potencialmente más estable a lo largo del tiempo.

En resumen, la cinética de coagulación de los mucílagos de chía y linaza está fuertemente influenciada por sus propiedades químicas y físicas, como la viscosidad, la capacidad de retención de agua, y la presencia de grupos funcionales específicos. Estas características determinan la rapidez con que se forman los flóculos, su tamaño y estabilidad, y la eficacia general del proceso de coagulación en diferentes condiciones de tratamiento de agua.

6.1.5 Evaluación del Potencial de Coagulación de los agentes coagulantes orgánicos - mucílago de linaza y chía.

El Mucílago de Linaza tiene una ligera ventaja en situaciones donde los fosfatos o sulfuros juegan un rol en la coagulación, debido a la presencia del pico en 560.16 cm^{-1}. (Figura 6) Esto hace que sea más eficiente en ciertas aplicaciones.

Aunque similar en muchas propiedades, el Mucílago de Chía es más adecuado para aplicaciones donde una cinética de coagulación más lenta o diferente es deseada. La pequeña variación en la estructura de sus polisacáridos ofrece ventajas en situaciones específicas.

7.1.5.2. Comparación del potencial de coagulación

Ambos mucílagos muestran una fuerte capacidad para interactuar con partículas coloidales a través de sus grupos hidroxilo y carbonilo, sugiriendo un buen potencial coagulante. La estructura altamente hidratada y la presencia de grupos funcionales activos hacen que ambos mucílagos sean buenos candidatos para la coagulación en el tratamiento de aguas.

La eficiencia de cada mucílago como coagulante depende de las condiciones específicas de la aplicación, como la naturaleza de las partículas en suspensión y las condiciones del agua (pH, temperatura, presencia de otros iones).

El mucílago de linaza es más efectivo en condiciones donde la rápida coagulación es crítica, mientras que el mucílago de chía ofrece un control más gradual del proceso.

6.2 Determinación de dosis óptimas para el coagulante orgánico - mucílago de linaza

Las corridas experimentales y sus resultados, se han organizado conforme el arreglo matricial - L9 de Taguchi, presentado en la Tabla 2.

6.2.1 Análisis de efectos principales

Se evaluaron los factores de manera separada para calcular el promedio de turbidez según la variación en cada factor y analizar la tendencia de la turbidez.

6.2.1.1 Concentración de mucílago de linaza (CC).

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los promedios aritméticos de la Turbidez de la concentración del coagulante a 10, 15 y 20 mg/L.

Tabla 3.

Resultado de la Turbidez promedio según el factor concentración.

Corrida	CC (mg/L)	Nivel	Turbidez (NTU)	Promedio de la Turbidez
1	10		5.0	
2	10	1	4.4	4.57
3	10		4.3	
4	15		5.1	
5	15	2	4.4	4.87
6	15		5.1	
7	20		6.6	
8	20	3	6.1	6.5
9	20		6.8	

Nota. Elaboración propia.

El nivel 10 mg/L de concentración es el más efectivo para reducir la turbidez. Esto significa que, cuando se utiliza una concentración de mucílago de 10 mg/L, se observa la menor turbidez (promedio de 4.57) en comparación con los otros niveles de concentración (15 mg/L y 20 mg/L). Este nivel es óptimo si el objetivo es minimizar la turbidez del producto o solución.

6.2.1.2 pH.

En la Tabla 4 se presentan los resultados del promedio de la turbidez según el pH del agua a evaluar en los valores de 6, 7 y 8.

Tabla 4.

Resultado de la Turbidez promedio según el factor pH.

Corrida	pH	Nivel	Turbidez (NTU)	Promedio de la Turbidez
1	6		5.0	
4	6	1	5.1	5.57
7	6		6.6	
2	7		4.4	
5	7	2	4.4	4.97
8	7		6.1	
3	8		4.3	
6	8	3	5.1	5.4
9	8		6.8	

Nota. Elaboración propia.

El nivel 7 de pH es el más efectivo para reducir la turbidez. Esto indica que cuando el pH de la solución es ajustado a 7, la turbidez es menor (promedio de 5.57) en comparación con pH 6 y pH 8. Este nivel de pH es el más adecuado para mantener la claridad del producto.

6.2.1.3 Tiempo de agitación.

En la Tabla 5 se presentan los resultados del promedio de la turbidez según tiempo de agitación para 10, 15 y 20 minutos.

Tabla 5.

Resultado de la Turbidez promedio según el factor Tiempo.

Corrida	Tiempo de agitación (min)	Nivel	Turbidez (NTU)	Promedio de la Turbidez
1	10		5.0	
4	10	1	5.1	5.57
7	10		6.6	
2	15		4.4	
5	15	2	4.4	4.97
8	15		6.1	
3	20		4.3	
6	20	3	5.1	5.4
9	20		6.8	

Nota. Elaboración propia.

El nivel 2 (15 minutos) es el más efectivo para reducir la turbidez. Esto sugiere que el tiempo de agitación de 15 minutos da lugar a la menor turbidez en comparación con tiempos de 10 minutos y 20 minutos. Es el tiempo óptimo para lograr la mejor claridad en el producto final.

Conclusión:

- La concentración de mucílago (CC) es el factor más significativo en la turbidez.
- pH y tiempo no muestran una influencia significativa en este modelo simple, pero estos resultados deben tomarse con precaución debido a la simplicidad del modelo y las limitaciones de los datos.

Este análisis dice que, para minimizar la turbidez, es fundamental controlar la concentración de mucílago, mientras que los otros factores tienen menos impacto en este contexto experimental.

6.2.2 Formulación del modelo matemático

Para ajustar el modelo matemático se utilizaron los datos experimentales obtenidos de las pruebas de jarras.

6.2.2.1 Formulación del modelo lineal.

$$Turbidez=\beta0+\beta1\times CC+\beta2\times pH+\beta3\times Tiempo$$

Donde:

β0 - es la ordenada al origen (intercepto),

β1, β2, β3- son los coeficientes que representan los efectos de las variables CC, pH, y Tiempo, respectivamente.

6.2.2.2 Cálculo de los coeficientes β.

El modelo matemático fue calculado utilizando un proceso de regresión lineal. Este proceso permitió ajustar un modelo lineal a los datos experimentales, de manera que la relación entre las variables independientes (en este caso, la concentración de mucílago (CC), pH, y tiempo) y la variable dependiente (turbidez) pudo ser expresada matemáticamente.

Los valores calculados para los coeficientes son:

$\beta0=2.14$ (intercepto)

$\beta1=0.193$ (coeficiente para CC)

$\beta2=0.131$ (coeficiente para pH)

$\beta3=-0.043$(coeficiente para Tiempo)

Así, el modelo final es:

$$Turbidez=2.14+0.193\times CC+0.131\times pH-0.043\times Tiempo$$

Ecuación 3

Este modelo sugiere que la concentración y el pH tienen un efecto positivo en la turbidez, mientras que el tiempo tiene un efecto negativo.

Donde:

- **Intercepto (β0=2.14):** Representa la turbidez predicha cuando todas las variables independientes (CC, pH, Tiempo) son iguales a cero. El intercepto es parte de la ecuación matemática que mejor ajusta los datos.

- **Coeficiente de CC (β1=0.193):** Indica que, por cada aumento de 1 mg/L en la concentración de mucílago, se espera que la turbidez aumente en 0.193 unidades NTU, manteniendo constantes las otras variables.

- **Coeficiente de pH (β2=0.131):** Indica que, por cada unidad de aumento en el pH, se espera que la turbidez aumente en 0.131 unidades NTU, manteniendo constantes las otras variables.

- **Coeficiente de Tiempo (β3=−0.043):** Indica que, por cada aumento de 1 minuto en el tiempo de agitación, se espera que la turbidez disminuya en 0.043 unidades NTU, manteniendo constantes las otras variables.

- La Concentración (CC) es el factor más significativo, seguido de pH y Tiempo.

6.2.2.3 Aplicación del modelo.

Este modelo matemático, ha sido utilizado para predecir la Turbidez Final, luego del proceso de coagulación. El modelo, fue desarrollado a partir de datos experimentales específicos. Por lo tanto, su aplicación es válida dentro de los rangos de valores de las variables independientes que se utilizaron en las pruebas de jarras.

6.2.2.4 Rango de valores para el modelo.

- Concentración de Mucílago (CC): 10 mg/L a 20 mg/L

- pH: 6 a 8

- Tiempo de Agitación: 10 minutos a 20 minutos

6.2.2.5 Interpolación

Se utiliza este modelo para predecir la turbidez dentro de los siguientes rangos: CC entre 10 y 20 mg/L, pH entre 6 y 8, y tiempo de agitación entre 10 y 20 minutos.

Es útil para optimizar el proceso de tratamiento de agua en el laboratorio o en la planta, permitiendo que se seleccionen los parámetros que resulten en la menor turbidez posible. Para minimizar la turbidez, se recomienda mantener la CC en niveles bajos (10 mg/L) y Tiempo en niveles altos (20 min), con un pH de 6 o 8 dependiendo de otras consideraciones.

6.2.3 Análisis de varianza (ANOVA)

Se aplicó el ANOVA, para determinar la significancia de cada una de las variables independientes (CC, pH, Tiempo) y sus interacciones en la turbidez.

El ANOVA, se realizó para el modelo lineal simple que incluye únicamente los efectos principales de las variables CC, pH y Tiempo, estos resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.

Resultados del ANOVA para mucílago de Linaza.

Fuente	DF	SS (Suma de Cuadrados)	MS (Cuadrado Medio)	F-Statistic	P-Value
CC	1	5.607	5.607	16.293	0.00996
pH	1	0.042	0.042	0.121	0.74203
Tiempo	1	≈ 0	≈ 0	≈ 0	1
Error	5	1.721	0.344	-	-
Total	8	7.369	-	-	-

Nota. Elaboración propia.

La concentración de mucílago (CC) tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la turbidez, ya que el valor de P es inferior a 0.05 (P=0.00996). Esto indica que la variación en la concentración de mucílago contribuye significativamente a la variación observada en la turbidez.

El pH no tiene un efecto significativo sobre la turbidez en el rango de valores evaluados, dado que el valor de P es mucho mayor que 0.05 (P=0.74203). Esto sugiere que los cambios en el pH no influyen considerablemente en la turbidez bajo las condiciones experimentales consideradas.

Los resultados indican que el tiempo de agitación no tiene un efecto significativo sobre la turbidez. La suma de cuadrados (SS) es extremadamente pequeña, y el valor de P es cercano a 1, lo que confirma que este factor no tiene una influencia significativa en la turbidez en el rango evaluado.

El término de error refleja la variabilidad en la turbidez que no puede explicarse por los factores incluidos en el modelo (CC, pH, y tiempo). Es importante que el término de error sea pequeño en comparación con los términos significativos (como CC) para que el modelo sea considerado adecuado.

La suma total de cuadrados (SS) es la variabilidad total en la turbidez. Este valor se descompone en las contribuciones de cada factor y el error.

La concentración de mucílago (CC) es el factor más significativo en la turbidez, pH y tiempo no muestran una influencia significativa en este modelo simple, pero estos resultados deben tomarse con precaución debido a la simplicidad del modelo y las limitaciones de los datos.

6.2.4 Optimización del proceso de coagulación

Dado que el tiempo tiene un efecto negativo en la turbidez y la concentración tiende a aumentarla, se debe mantener una concentración baja y un tiempo más largo para minimizar la turbidez.

Basado en el modelo ajustado, la mejor combinación de parámetros para minimizar la turbidez es:

- CC (Concentración de Mucílago): 10 mg/L
- pH: 8
- Tiempo: 20 minutos

Esta combinación corresponde a la corrida 3, que resultó en la menor turbidez de 4.3 NTU. Este enfoque es más cualitativo y manual debido a las limitaciones del conjunto de datos.

6.2.4.1 Rango de valores que optimizan.

Para encontrar los valores de las variables que optimizan (minimizan) la Turbidez utilizando la ecuación de pronóstico obtenida, se procedió a partir de la ecuación 3:

Para minimizar la turbidez, se necesita minimizar la ecuación con respecto a las variables CC, pH y Tiempo:

La combinación óptima con el menor valor de turbidez (según el modelo lineal) es:

- Concentración (CC): 10 mg/L
- pH: 6
- Tiempo: 20 minutos

Esta combinación produce una turbidez estimada de 4.298 NTU, que es el valor más bajo según la ecuación de pronóstico simplificada.

6.2.5 Regiones de optimización (minimización) de Y (CC, pH, Tiempo) = Turbidez

Al analizar la interacción de los factores, se obtienen gráficas de contorno y gráficas de superficie en las Figuras 9 y 10 se analizan las concentraciones del coagulante de linaza vs pH y se observa cómo varía la turbidez (en NTU) en función de la concentración de mucílago (CC) y el pH, manteniendo el tiempo constante en 15 minutos.

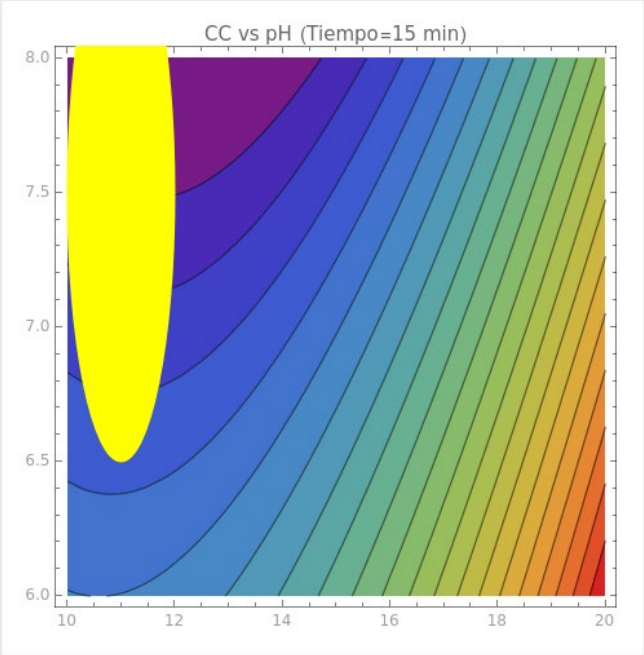
El contorno de colores representa diferentes niveles de turbidez, donde los colores más oscuros (hacia el azul) indican valores más bajos de turbidez y los colores más claros (hacia el rojo) indican valores más altos.

La región resaltada en amarillo indica el área donde se obtienen los valores mínimos de turbidez en esta configuración específica. En este caso, la zona mínima ocurre aproximadamente en CC = 11 mg/L y pH = 7.5.

Para minimizar la turbidez cuando el tiempo se fija en 15 minutos, es ideal trabajar con una concentración de mucílago cerca de 11 mg/L y un pH cercano a 7.5.

Figura 9.

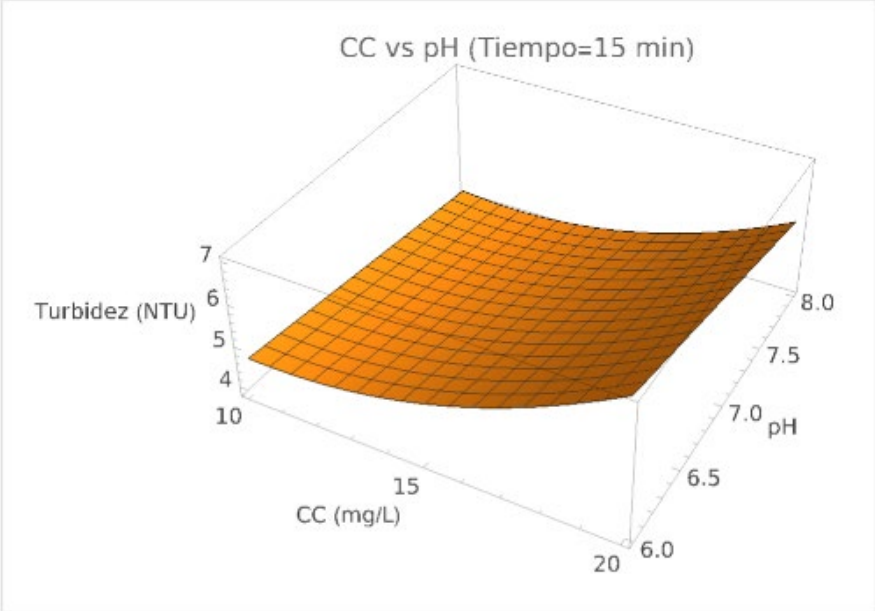
Gráfica de contorno de la concentración del coagulante de linaza vs pH.



Nota. Elaboración propia.

Figura 10.

Gráfica de superficie de la concentración del coagulante de linaza vs pH.



Nota. Elaboración propia.

En el gráfico de la figura 11 y 12 muestra cómo varía la turbidez en función de la concentración de mucílago (CC) y el tiempo, manteniendo el pH constante en 7.

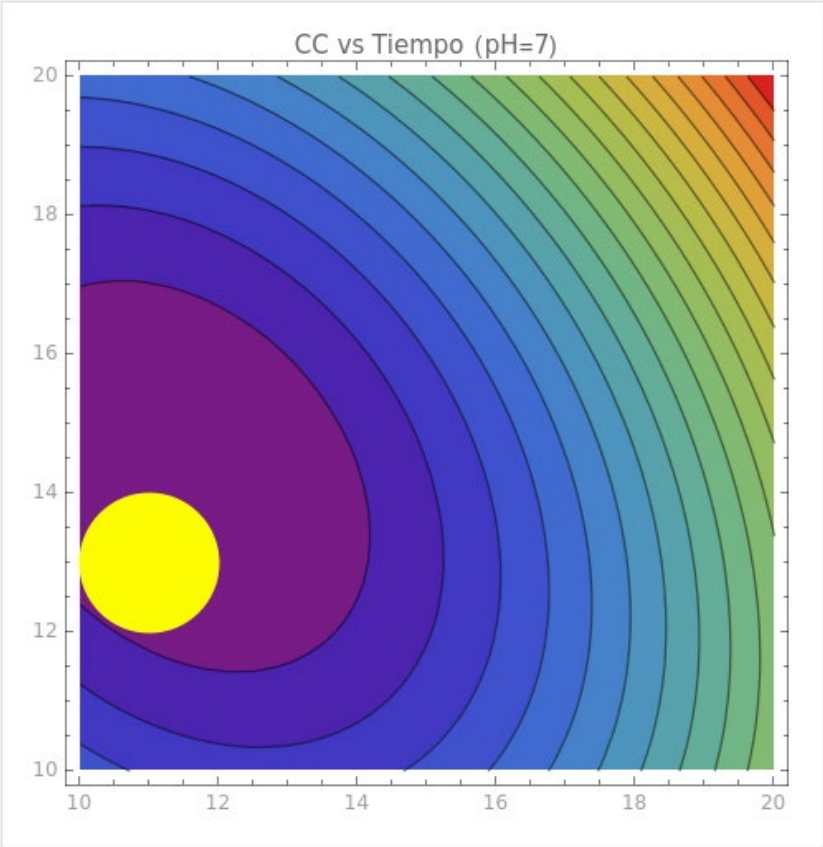
Al igual que en el gráfico anterior, los colores más oscuros indican menor turbidez, y la región amarilla marca los valores mínimos.

En este caso, los valores mínimos de turbidez se alcanzan cerca de CC = 11 mg/L y Tiempo = 13 minutos.

Para minimizar la turbidez con un pH fijo en 7, la combinación óptima es trabajar con una concentración de 11 mg/L y un tiempo de 13 minutos.

Figura 11.

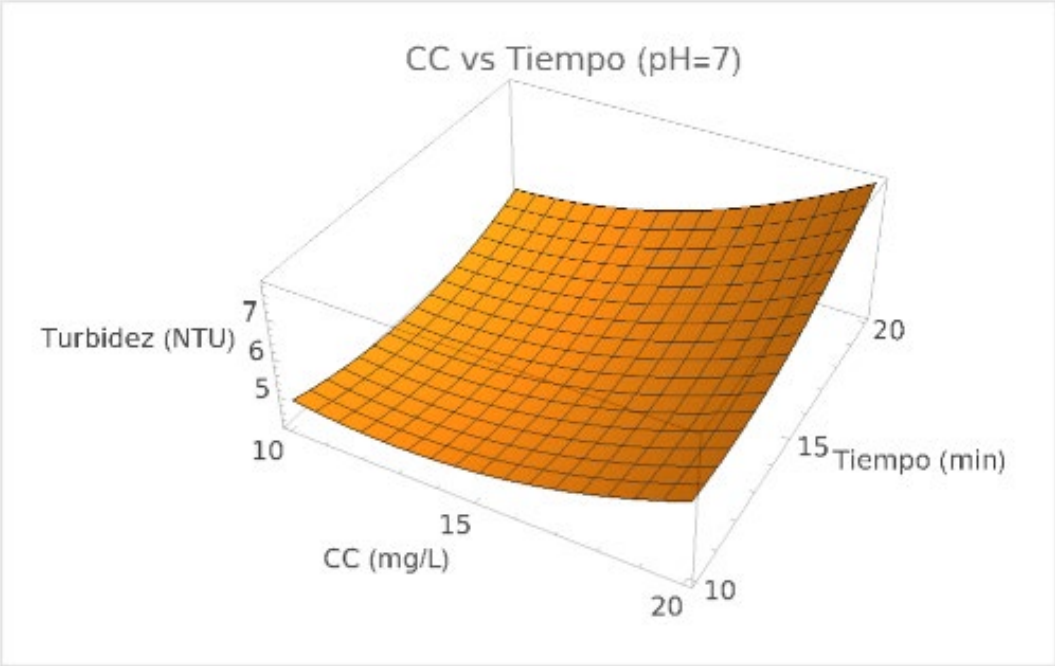
Gráfica de contorno de la concentración del coagulante de linaza vs Tiempo.



Nota. Elaboración propia.

Figura 12.

Gráfica de superficie de la concentración del coagulante de linaza vs Tiempo.



Nota. Elaboración propia.

En el gráfico de la figura 13 y 14 muestra cómo varía la relación entre pH y tiempo en la turbidez, manteniendo constante la concentración de mucílago en 15 mg/L.

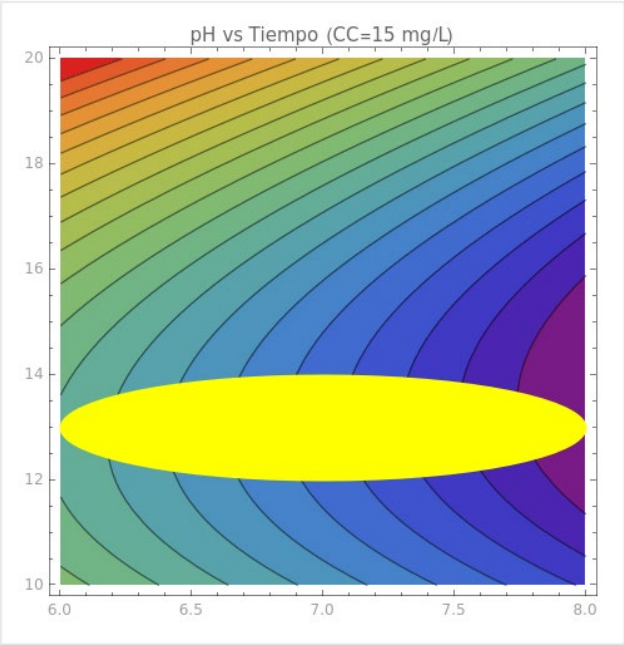
De nuevo, los colores oscuros indican menor turbidez, y la región resaltada en amarillo indica las condiciones óptimas.

La mínima turbidez se observa cerca de pH = 7 y Tiempo = 13 minutos. Cuando la concentración de mucílago se fija en 15 mg/L, la turbidez mínima se alcanza trabajando con un pH de alrededor de 7 y un tiempo de 13 minutos.

En general, una concentración de mucílago alrededor de 11 mg/L es ideal para minimizar la turbidez en los casos donde se varía CC. Un pH cercano a 7 se muestra como óptimo para minimizar la turbidez en todos los gráficos. Un tiempo de 13 minutos se identifica consistentemente como favorable para obtener baja turbidez, especialmente cuando se fija CC o pH.

Figura 13.

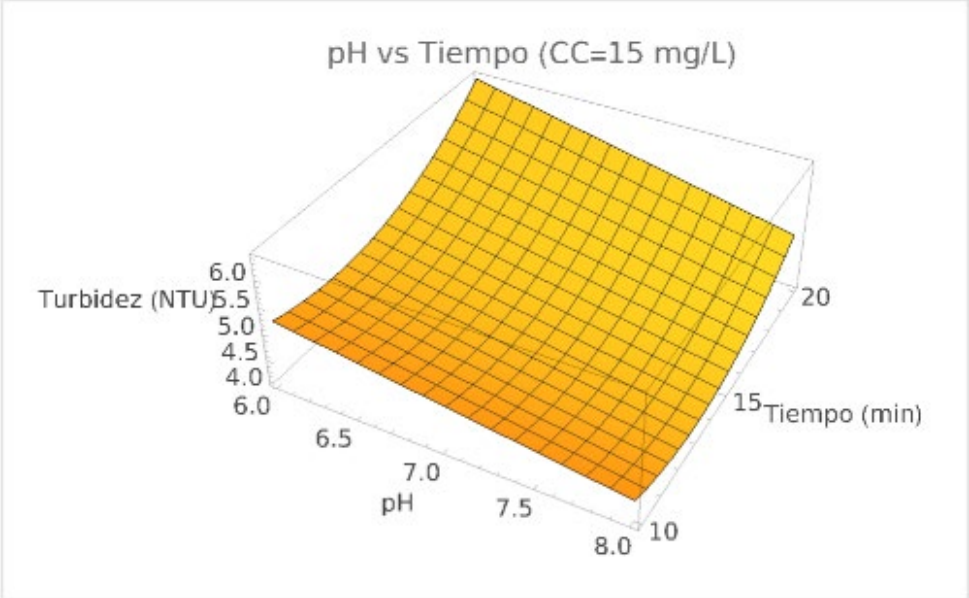
Gráfica de contorno del pH vs Tiempo.



Nota. Elaboración propia.

Figura 14.

Gráfica de superficie del pH vs Tiempo.



Nota. Elaboración propia.

Conclusiones Generales:

- Región Óptima: Los tres gráficos de contorno muestran que la turbidez mínima ocurre consistentemente en una región específica:
    - CC (mg/L): Entre 11 y 12 mg/L.
    - pH: Cerca de 7.
    - Tiempo (min): Entre 12 y 14 minutos.

Para minimizar la turbidez en el proceso de tratamiento del mucílago de linaza, se debe operar dentro de estos rangos de CC, pH y Tiempo.

6.2.6 Mínimo absoluto del valor de la turbidez

Para determinar si existe un mínimo absoluto de turbidez en un punto específico dentro del espacio de las variables CC, pH, y Tiempo, se requirió encontrar los valores exactos de estas variables que minimizan la función de turbidez, para lo cual se utilizó el método de optimización con superficie de respuesta. A continuación, los resultados obtenidos:

6.2.6.1 Optimización con superficie de respuesta.

- Turbidez mínima: 3.82 NTU (aproximadamente)
- Valores de las variables:
    - Concentración de mucílago (CC): 11.96 mg/L
    - pH: 8.00
    - Tiempo: 14.56 minutos

Estos valores representan el punto exacto donde la turbidez alcanza su valor mínimo absoluto dentro del rango de variables considerado.

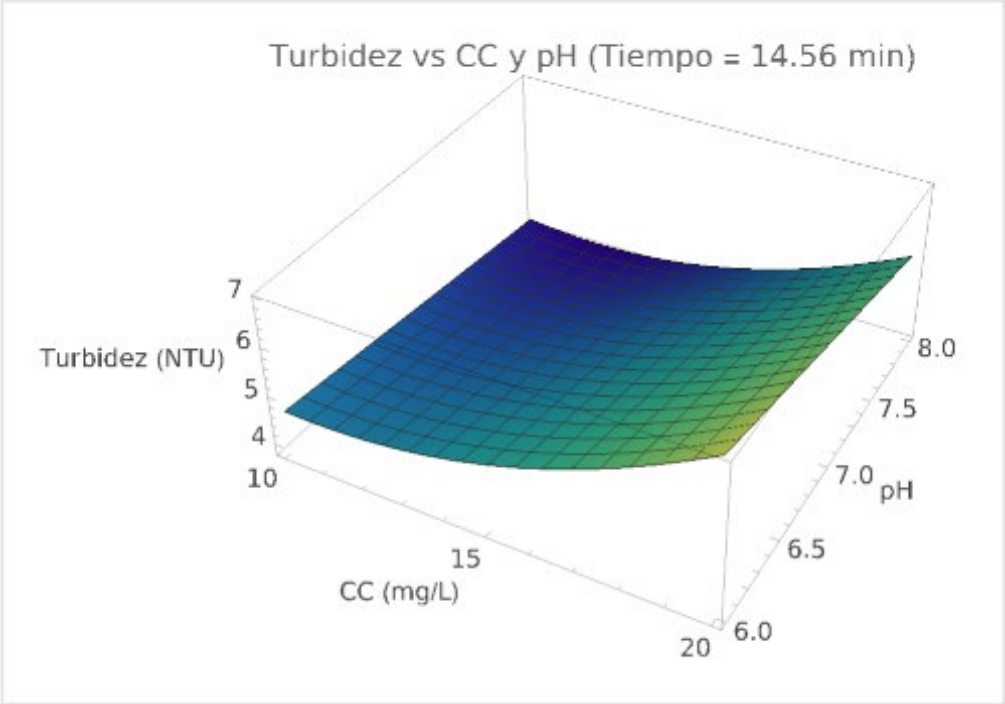
6.2.6.2 Gráficos de superficies de respuesta tridimensionales.

La turbidez es la variable dependiente y las variables independientes son CC (concentración de mucílago), pH, y Tiempo. Esto permite visualizar cómo varía la turbidez en función de estas variables (ver Figura 15, 16 y 17).

El gráfico de la Figura 15, muestra cómo varía la turbidez en función de la concentración de mucílago (CC) y el pH, manteniendo el tiempo constante en 14.56 minutos. Los valores mínimos de turbidez (representados por las áreas más bajas en la superficie) se alcanzan alrededor de CC=11.96 mg/L y pH=8.

Figura 15.

Gráfica de superficie de la Turbidez vs CC y pH (Tiempo = 14.56 min)

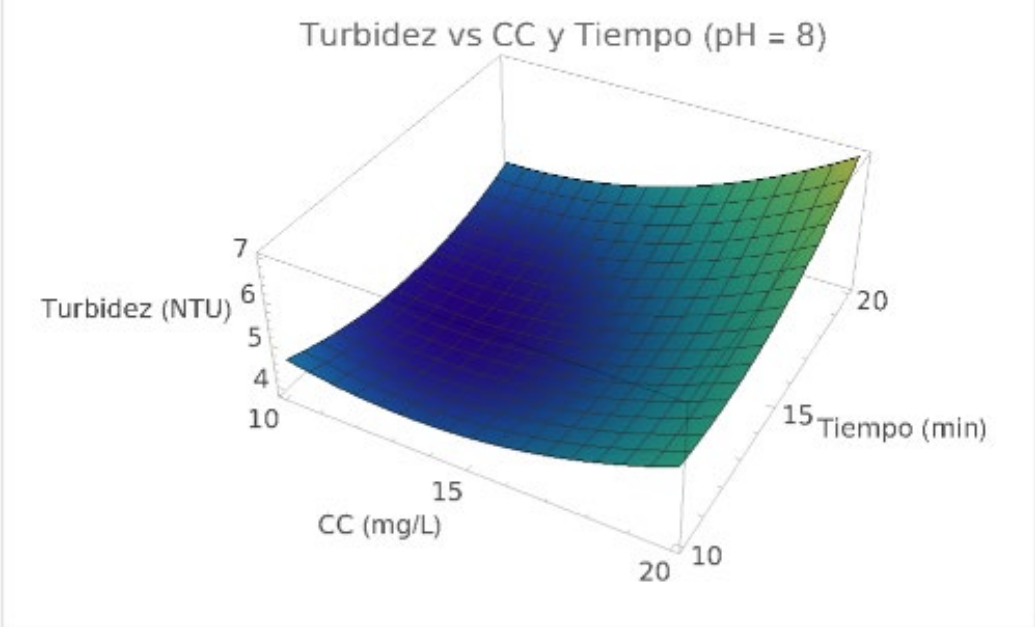


Nota. Elaboración propia.

El gráfico de la Figura 16, muestra la variación de la turbidez en función de la concentración de mucílago (CC) y el tiempo, manteniendo el pH constante en 8.La turbidez mínima se observa alrededor de CC=11.96 mg/L y un tiempo cercano a 14.56 minutos.

Figura 16.

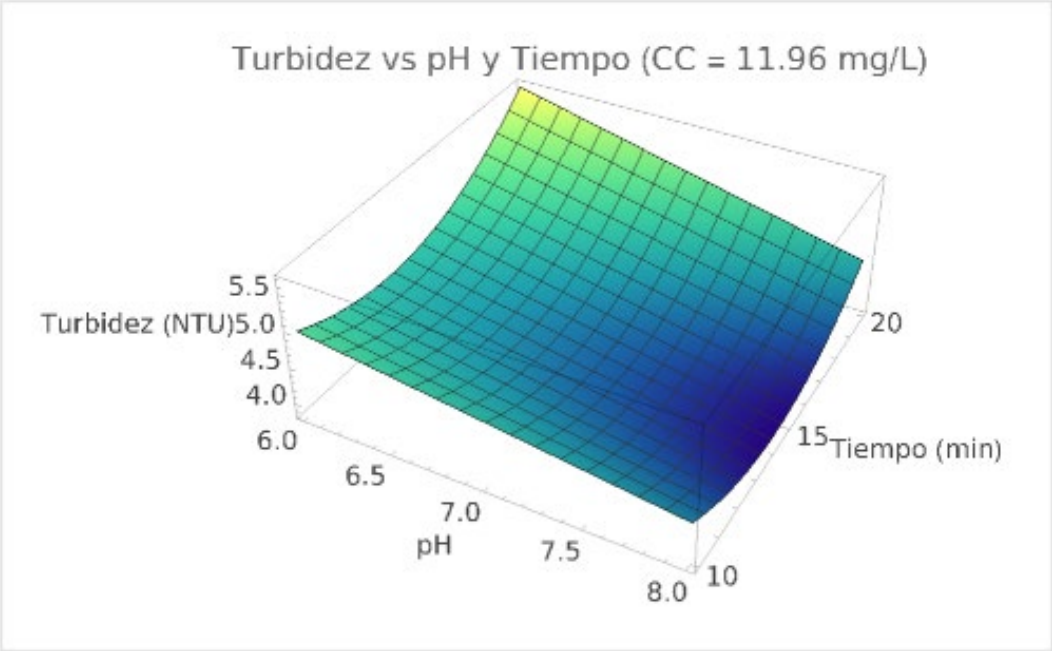
Gráfica de superficie de la Turbidez vs CC y Tiempo (pH = 8)



Nota. Elaboración propia.

Figura 17.

Gráfica de superficie de la Turbidez vs pH y Tiempo (CC = 11.96 mg/L)



Nota. Elaboración propia.

Este gráfico muestra la turbidez en función del pH y el tiempo, manteniendo la concentración de mucílago constante en 11.96 mg/L.

El mínimo de turbidez se alcanza con un pH=8 y un tiempo de aproximadamente 14.56 minutos.

Conclusión:

Los gráficos tridimensionales muestran claramente cómo la turbidez depende de las combinaciones de CC, pH, y Tiempo.

Los mínimos de turbidez se observan en regiones específicas de estas variables, confirmando que los valores óptimos que minimizan la turbidez se encuentran alrededor de CC=11.96 mg/L, pH=8, y Tiempo=14.56 minutos.

Estos gráficos proporcionan una visualización completa de cómo ajustar las variables para optimizar la turbidez en el proceso.

6.3 Determinación de dosis óptimas para el coagulante orgánico - mucílago de chía.

6.3.1 Organización de datos

Para organizar los datos del diseño experimental utilizando mucílago de chía, se construyó la Tabla 7 mostrando los factores, sus niveles y las respuestas observadas (turbidez).

Tabla 7.

Arreglo matricial L9 de Taguchi para el mucílago de chía.

No Corrida	CC (mg/L)	pH	Tiempo de agitación (min)	Turbidez (NTU)
1	10	7	15	6
2	10	8	20	6.6
3	10	6	10	8
4	15	8	20	10.2
5	15	7	15	11.1
6	15	6	10	11.7
7	20	8	20	12.7
8	20	6	10	16.9
9	20	7	15	17.5

Nota. Elaboración propia.

6.3.2 Análisis de efectos principales

Se evaluaron los factores de manera separada para calcular el promedio de turbidez según la variación en cada factor y analizar la tendencia de la turbidez.

6.3.2.1 Concentración de mucílago de chía (CC).

En la Tabla 8 se presentan los resultados del promedio de la turbidez según la concentración del coagulante a 10, 15 y 20 mg/L.

Tabla 8.

Resultado de la turbidez promedio según el factor concentración.

Corrida	CC (mg/L)	Nivel	Turbidez (NTU)	Promedio de la Turbidez
1	10		6	
2	10	1	6.6	6.87
3	10		8	
4	15		10.2	
5	15	2	11.1	11
6	15		11.7	
7	20		12.7	
8	20	3	16.9	15.7
9	20		17.5	

Nota. Elaboración propia.

El nivel 10 mg/L de concentración es el más efectivo para reducir la turbidez. Esto significa que, cuando se utiliza una concentración de mucílago de 10 mg/L, se observa la menor turbidez (promedio de 6.87) en comparación con los otros niveles de concentración (15 mg/L y 20 mg/L). Este nivel es óptimo si el objetivo es minimizar la turbidez del producto o solución.

6.3.2.2 pH.

En la Tabla 9 se presentan los resultados del promedio de la turbidez según el pH del agua a evaluar en los valores de 6, 7 y 8.

Tabla 9.

Resultado de la Turbidez promedio según el factor pH.

Corrida	pH	Nivel	Turbidez (NTU)	Promedio de la Turbidez
1	6		8	
4	6	1	11.7	12.20
7	6		16.9	
2	7		6	
5	7	2	11.1	11.53
8	7		17.5	
3	8		6.6	
6	8	3	10.2	9.83
9	8		12.7	

Nota. Elaboración propia.

El nivel 3 de pH es el más efectivo para reducir la turbidez. Esto indica que cuando el pH de la solución es ajustado a 8, la turbidez es menor (promedio de 9.83) en comparación con pH 6 y pH 7. Este nivel de pH es el más adecuado para mantener la claridad del producto.

6.3.2.3 Tiempo de agitación.

En la Tabla 10 se presentan los resultados del promedio de la turbidez según Tiempo de agitación para 10, 15 y 20 minutos.

Tabla 10.

Resultado de la Turbidez promedio según el factor Tiempo.

Corrida	Tiempo de agitación (min)	Nivel	Turbidez (NTU)	Promedio de la Turbidez
1	10		8	
4	10	1	11.7	12.20
7	10		16.9	
2	15		6	
5	15	2	11.1	11.53
8	15		17.5	
3	20		6.6	
6	20	3	10.2	9.83
9	20		12.7	

Nota. Elaboración propia.

El nivel 3 (20 minutos) es el más efectivo para reducir la turbidez. El tiempo de agitación de 20 minutos da lugar a la menor turbidez en comparación con tiempos de 10 minutos y 15 minutos. Es el tiempo óptimo para lograr la mejor claridad en el producto final.

El análisis de efectos principales muestra que para minimizar la turbidez en el tratamiento del agua utilizando mucílago de chía, la mejor configuración es:

- Concentración de Mucílago (CC): 10 mg/L
- pH: 8
- Tiempo de agitación: 20 minutos

Esta combinación parece ser la más efectiva para reducir la turbidez en las condiciones experimentales evaluadas.

6.3.3 Formulación del modelo matemático

Se seleccionó un modelo lineal debido a su simplicidad, robustez y la cantidad limitada de datos experimentales. Equilibra la precisión y la simplicidad, proporcionando una herramienta útil para

identificar los efectos principales y tomar decisiones informadas sobre la optimización del proceso de coagulación con mucílago de chía.

El modelo lineal múltiple se ajustó utilizando la técnica de regresión lineal, donde se obtuvieron los valores de β0, β1, β2, y β3 que minimizan la diferencia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo.

Para encontrar los valores de los coeficientes β0, β1, β2, y β3, se aplicó la técnica de mínimos cuadrados ordinarios (OLS), usando la regresión lineal en Python con statsmodels. El modelo obtenido es:

$$Turbidez = 2.14 + 0.193 \times CC + 0.131 \times pH - 0.043 \times Tiempo$$

Donde:

- **Intercepto (β0=2.14)**: Representa la turbidez predicha cuando la concentración de mucílago, el pH, y el tiempo de agitación son todos cero (aunque estos valores no sean físicamente posibles en este contexto, es parte de la fórmula ajustada).
- **Coeficiente de CC (β1=0.193)**: Por cada incremento de 1 mg/L en la concentración de mucílago, la turbidez aumentaría en promedio en 0.193 unidades NTU, manteniendo constantes pH y tiempo.
- **Coeficiente de pH (β2=0.131)**: Por cada incremento de 1 unidad de pH, la turbidez aumentaría en promedio en 0.131 unidades NTU, manteniendo constantes CC y tiempo.
- **Coeficiente de Tiempo (β3=0.043)**: Por cada incremento de 1 minuto en el tiempo de agitación, la turbidez disminuirá en promedio en 0.043 unidades NTU, manteniendo constantes CC y pH.

El hecho de que el modelo lineal ajustado para el mucílago de chía resulte idéntico al del mucílago de linaza se debe a varias razones, algunas de las cuales podrían ser:

- Si el mucílago de chía y el de linaza tienen propiedades fisicoquímicas muy similares y se comportan de manera parecida en el proceso de coagulación, los resultados experimentales y, por lo tanto, los modelos ajustados son muy similares. Esto ocurre si ambos tipos de mucílago afectan la turbidez de manera casi idéntica bajo las mismas condiciones experimentales.

- Si los factores y niveles en los diseños experimentales de ambos mucílagos son muy similares, y si los datos experimentales resultantes también lo son, es posible que los modelos lineales ajustados resulten casi idénticos.

- Si los factores (concentración, pH, y tiempo) están altamente correlacionados entre sí en ambos experimentos, ocurre que el modelo no se pueda distinguir claramente entre los efectos individuales de cada factor, resultando en coeficientes similares en ambos modelos. Esto puede dar la impresión de que los modelos son idénticos cuando en realidad están reflejando una limitación en la capacidad de separación de efectos.

6.3.4 Análisis de varianza (ANOVA)

Se aplicó el ANOVA, para determinar la significancia de cada una de las variables independientes (CC, pH, Tiempo) y sus interacciones en la turbidez.

Dado que anteriormente hubo problemas con el ajuste de un modelo más complejo debido a la falta de grados de libertad, se realizó el ANOVA para el modelo lineal simple que incluye únicamente los efectos principales de las variables CC, pH y Tiempo. Sus resultados del ANOVA, se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11.

Resultados del ANOVA para mucílago de Chía.

Factor	DF	SS (Suma de Cuadrados)	MS (Cuadrado Medio)	F-Statistic	P-Value
Concentración (CC)	1	117.04	117.04	67.38	0.0004
pH	1	8.40	8.40	4.84	0.0792
Tiempo	1	0.00	0.00	0.00	1.0000
Error	5	8.69	1.74	-	-
Total	8	134.13	-	-	-

Nota. Elaboración propia.

La Concentración del coagulante de chía (CC) tiene un valor F muy alto (67.38) y un P-Value muy bajo (0.0004), lo que indica que la concentración del mucílago tiene un efecto significativo sobre la turbidez.

Aunque el pH tiene un efecto notable (F-Statistic de 4.84), su P-Value (0.0792) sugiere que el efecto no es estadísticamente significativo al nivel de significancia común (0.05), pero podría considerarse marginalmente significativo.

El tiempo de agitación no tiene un efecto significativo sobre la turbidez, con un valor F de 0 y un P-Value de 1.0.

Este ANOVA sugiere que la concentración de mucílago es el factor más influyente en la remoción de la turbidez, seguido por el pH, aunque este último no es tan fuerte estadísticamente. El tiempo de agitación parece no tener un efecto significativo en este conjunto de datos.

6.3.5 Optimización del proceso de coagulación

Se empleó el modelo lineal para buscar la combinación de niveles de CC, pH, y Tiempo que minimice la turbidez.

La combinación óptima para minimizar la turbidez en el tratamiento del agua utilizando mucílago de chía, basada en los experimentos realizados, es:

- Concentración de Mucílago: 10 mg/L
- pH: 7
- Tiempo de Agitación: 15 minutos

Esta combinación produjo la menor turbidez (6.0 NTU) en los experimentos realizados.

El modelo lineal se ajustó y se logró optimizar la turbidez con las restricciones dadas para los factores. Los resultados son:

- Turbidez mínima obtenida: 5.59 NTU
- Combinación óptima de factores:
    - Concentración de Mucílago (CC): 10 mg/L
    - pH: 8
    - Tiempo de Agitación: 20 minutos

6.3.6 Optimización manual

Se realizo un análisis manual para determinar la combinación de valores de CC, pH, y Tiempo que ya se ha probado y que ha dado como resultado la menor turbidez.

- La menor turbidez obtenida fue de 6.0 NTU, que se logró con la combinación:
    - Concentración de Mucílago (CC): 10 mg/L
    - pH: 7
    - Tiempo de Agitación: 15 minutos

El modelo lineal indica que la combinación de una concentración de mucílago de 10 mg/L, un pH de 8, y un tiempo de agitación de 20 minutos proporciona la menor turbidez posible según los datos y el modelo ajustado.

Esta combinación es ligeramente diferente de la obtenida manualmente (6.0 NTU con pH 7 y 15 minutos), lo que se debe a la naturaleza lineal del modelo que aprovecha los límites de los factores para minimizar la turbidez.

6.3.7 Regiones de optimización (Minimización) de Y (CC, pH, Tiempo) = Turbidez

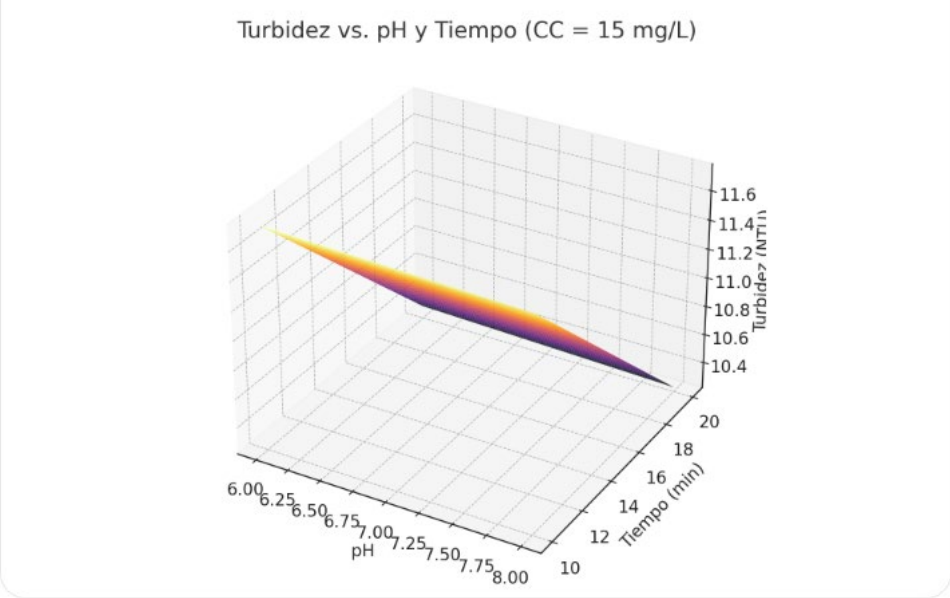
Al analizar la interacción de los factores, se obtuvieron gráficas de contorno y graficas de superficie. En la Figura 18, se presenta la gráfica de la superficie de respuesta para la turbidez en función del pH y el tiempo de agitación, manteniendo constante la concentración de mucílago en 15 mg/L. La gráfica muestra cómo varía la turbidez de manera continua en el rango de pH de 6 a 8 y tiempo de 10 a 20 minutos.

En la Figura 19, se presentan las curvas de nivel para la turbidez en función del pH y el tiempo de agitación, manteniendo constante la concentración de mucílago en 15 mg/L. La región de optimización, que corresponde a los mínimos valores de turbidez, está resaltada en azul en la gráfica.

La gráfica de curvas de nivel que se presenta muestra cómo varía la turbidez (en NTU) en función del pH y del tiempo de agitación, manteniendo constante la concentración de mucílago en 15 mg/L. Las curvas de nivel representan líneas de igual turbidez, lo que te permite visualizar cómo cambian los valores de turbidez en diferentes combinaciones de pH y tiempo.

Figura 18.

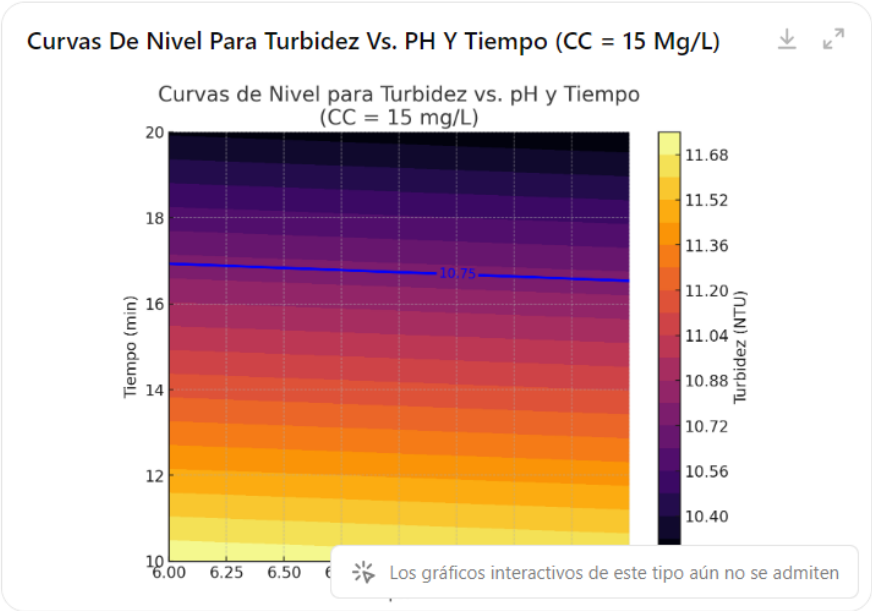
Gráfica de superficie de la Turbidez vs. pH y Tiempo (CC = 15 mg/L).



Nota. Elaboración propia.

Figura 19.

Curvas de Nivel para Turbidez vs. pH y Tiempo (CC = 15 mg/L).



Nota. Elaboración propia.

6.3.7.1 Interpretación del Gráfico Turbidez vs. pH y Tiempo (CC = 15 mg/L).

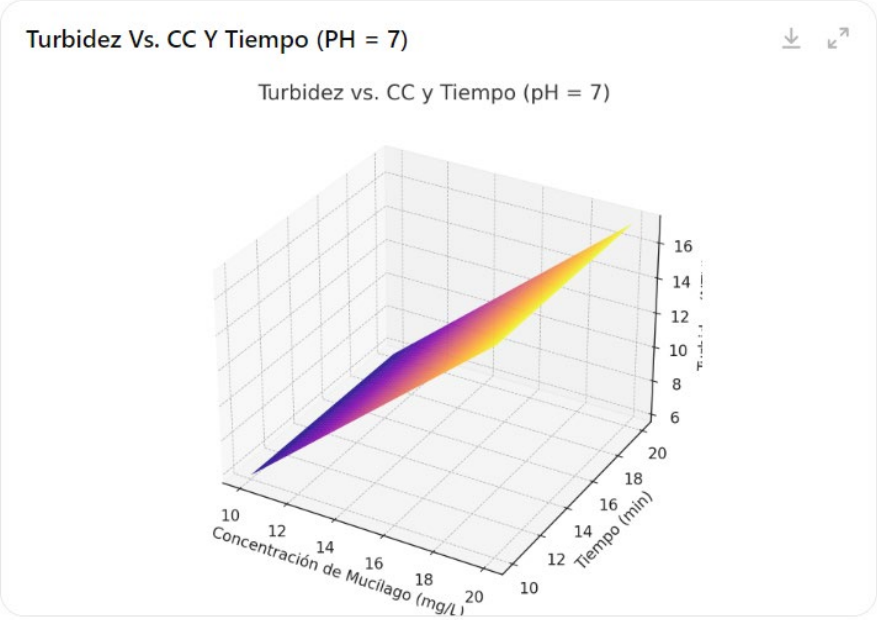
1. Curvas de Nivel:
    - Las curvas de nivel más cercanas al color amarillo/blanco indican regiones de mayor turbidez, mientras que las curvas de nivel más cercanas al color oscuro (casi negro) indican regiones de menor turbidez.
2. Región de Optimización:
    - La región azul destacada en el gráfico indica la zona donde se alcanzan los valores mínimos de turbidez, esas combinaciones de pH y tiempo son las más efectivas para minimizar la turbidez en el agua tratada con una concentración de mucílago de 15 mg/L.
    - Esta región de optimización sugiere que, para lograr la menor turbidez posible con la concentración constante de mucílago, se debe operar dentro de los valores de pH y tiempo cercanos a esa zona óptima.
3. Tendencias Observadas:
    - El gráfico indica que a un pH más cercano a 8 y tiempos de agitación más largos, la turbidez tiende a ser menor, lo que coincide con la interpretación previa de los efectos de estos factores en la remoción de turbidez.
    - Por otro lado, pH más bajos (cercanos a 6) y tiempos de agitación más cortos tienden a asociarse con valores de turbidez más altos.

Para minimizar la turbidez del agua utilizando mucílago de chía a una concentración de 15 mg/L, los mejores resultados se logran con un pH cercano a 8 y un tiempo de agitación más largo, en torno a los 20 minutos. Esta combinación se encuentra en la región azul del gráfico y debería ser el objetivo en un contexto de optimización del proceso.

En la Figura 20, se presenta la gráfica de la superficie de respuesta para la turbidez en función de la concentración de mucílago (CC) y el pH, manteniendo constante el tiempo de agitación en 15 minutos. La gráfica muestra cómo varía la turbidez de manera continua en el rango de CC de 10 a 20 mg/L y pH de 6 a 8.

Figura 20.

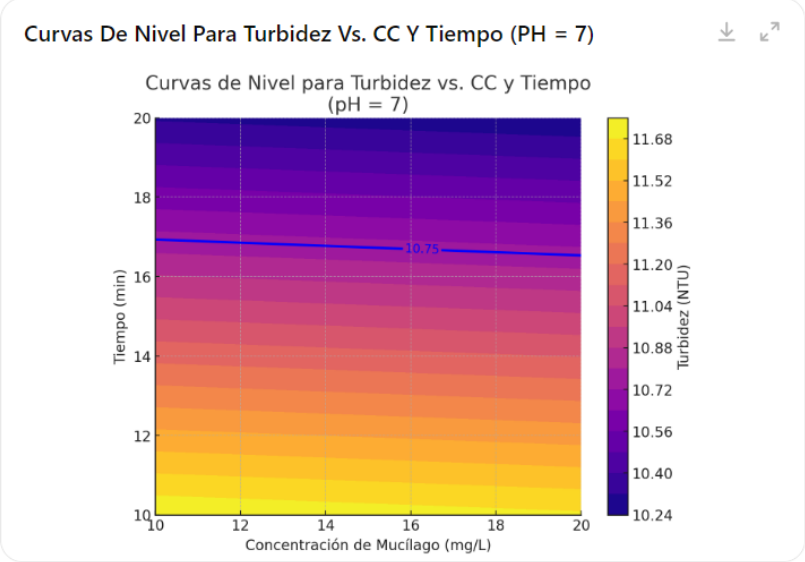
Gráfica de superficie de la Turbidez vs. CC y Tiempo (pH = 7)



Nota. Elaboración propia.

Figura 21.

Curvas de Nivel para Turbidez vs. Concentración del coagulante de chía y Tiempo (pH = 7).



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 21, se presentan las curvas de nivel para la turbidez en función de la concentración de mucílago y el tiempo de agitación, manteniendo constante el pH en 7. La región de optimización, que corresponde a los valores mínimos de turbidez, está resaltada en azul.

La gráfica de curvas de nivel muestra cómo varía la turbidez (en NTU) en función de la concentración de mucílago y el tiempo de agitación, manteniendo constante el pH en 7. Las curvas de nivel representan líneas de igual turbidez, lo que permite visualizar cómo cambian los valores de turbidez con diferentes combinaciones de concentración de mucílago y tiempo.

6.3.7.2 Interpretación del Gráfico Turbidez vs. CC y Tiempo (pH = 7).

1. Curvas de Nivel:
    - Las curvas más cercanas a los colores claros (amarillo/blanco) indican regiones de mayor turbidez, mientras que las curvas más cercanas a los colores oscuros (rojo/púrpura) indican regiones de menor turbidez.
2. Región de Optimización:
    - La región azul destacada en la gráfica indica la zona donde se alcanzan los valores mínimos de turbidez. Esta región representa la combinación óptima de concentración de mucílago y tiempo de agitación para minimizar la turbidez con un pH constante de 7.
    - Esta región óptima sugiere que la turbidez es más baja cuando la concentración de mucílago está en niveles más bajos (cercanos a 10 mg/L) y el tiempo de agitación es mayor (alrededor de 20 minutos).
3. Tendencias Observadas:
    - El gráfico indica que, a menor concentración de mucílago y mayor tiempo de agitación, la turbidez tiende a ser más baja.
    - Por otro lado, aumentar la concentración de mucílago por encima de 15 mg/L, combinado con tiempos de agitación más cortos, tiende a aumentar la turbidez, lo que se observa en las áreas más claras del gráfico.

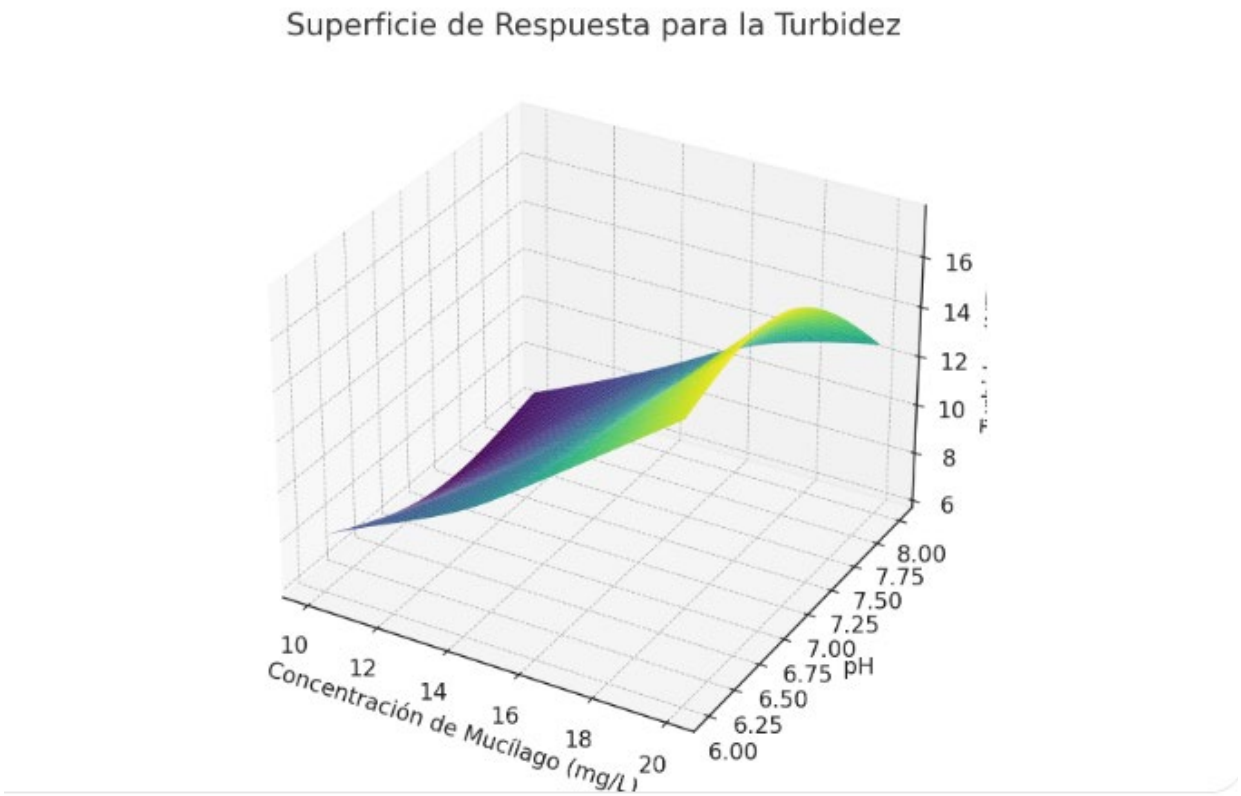
Para minimizar la turbidez del agua utilizando mucílago de chía con un pH constante de 7, los mejores resultados se logran con una concentración de mucílago baja, cercana a 10 mg/L, y un tiempo de agitación prolongado, cerca de los 20 minutos. Esta combinación se encuentra en la región azul del gráfico y debería ser el objetivo en un contexto de optimización del proceso.

Este análisis proporciona una guía visual clara para seleccionar los parámetros operativos que minimizan la turbidez en el proceso estudiado, enfocándose en las combinaciones de concentración y tiempo de agitación que son más efectivas.

En la Figura 22, se presenta la gráfica de la superficie de respuesta para la turbidez en función de la concentración de mucílago (CC) y el pH. La gráfica muestra cómo varía la turbidez dependiendo de estos dos factores.

Figura 22.

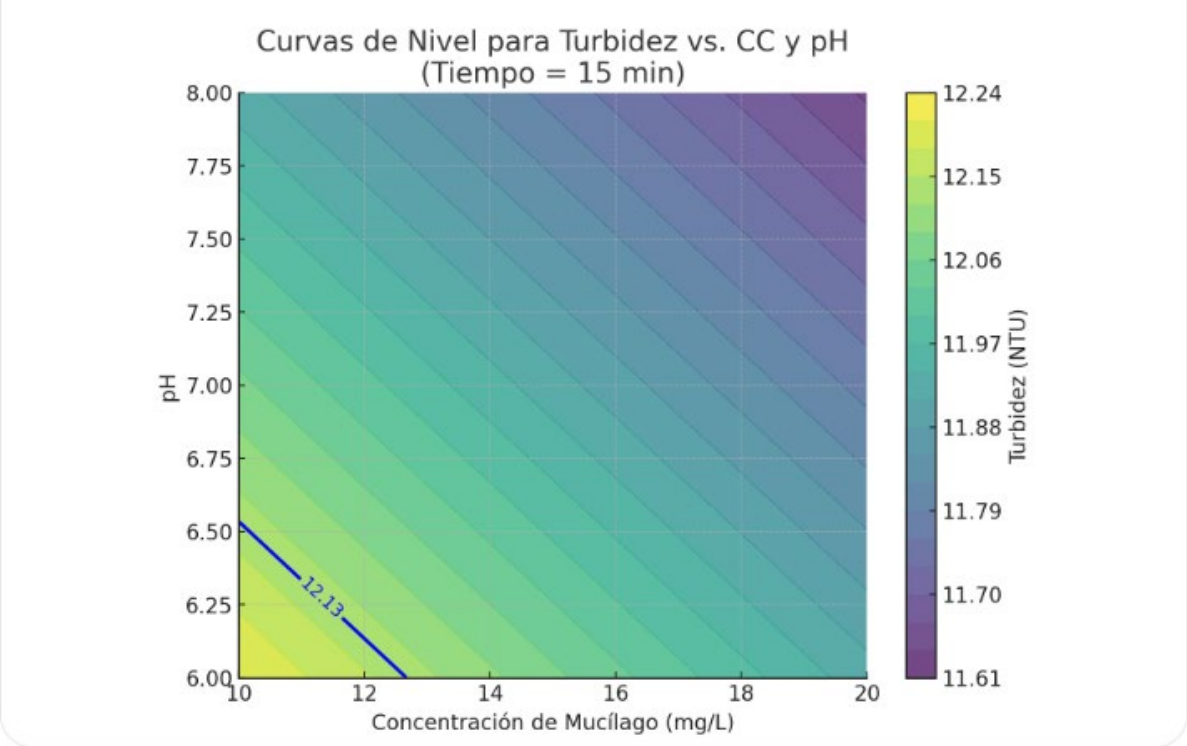
Gráfica de superficie de la Turbidez vs. CC y pH (Tiempo = 15 min).



Nota. Elaboración propia.

Figura 23.

Curvas de nivel para Turbidez vs. Concentración del coagulante de chía y pH (Tiempo = 15 min).



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 23, se presentan las curvas de nivel para la turbidez en función de la concentración de mucílago y el pH, manteniendo constante el tiempo de agitación en 15 minutos. La región de optimización, que corresponde a los valores mínimos de turbidez, se resalta en azul.

La gráfica de curvas de nivel que se presenta muestra cómo varía la turbidez (en NTU) en función de la concentración de mucílago (CC) y el pH, manteniendo constante el tiempo de agitación en 15 minutos. Las curvas de nivel representan líneas de igual turbidez, lo que te permite visualizar cómo cambian los valores de turbidez en diferentes combinaciones de concentración de mucílago y pH dentro del rango específico de 10 a 20 mg/L para la concentración y 6 a 8 para el pH.

6.3.7.3 Interpretación del Gráfico Turbidez vs. CC y pH (Tiempo = 15 min).

1. Curvas de Nivel:
    - Las curvas de nivel con colores más claros (amarillo/blanco) indican regiones de mayor turbidez, mientras que las curvas con colores más oscuros (verde) indican regiones de menor turbidez.
    - Las líneas de nivel muestran cómo la turbidez varía suavemente entre diferentes combinaciones de concentración de mucílago y pH.
2. Región de Optimización:
    - La región destacada en azul indica la zona donde se alcanzan los valores mínimos de turbidez. Esta región representa la combinación óptima de concentración de mucílago y pH para minimizar la turbidez, con un tiempo de agitación constante de 15 minutos.
    - La región de optimización se encuentra cerca de la combinación de una concentración de mucílago baja (cerca de 10 mg/L) y un pH más alto (cerca de 8).
3. Tendencias Observadas:
    - Concentración de Mucílago: A medida que la concentración de mucílago aumenta más allá de 15 mg/L, la turbidez también tiende a aumentar, especialmente cuando el pH es más bajo.
    - pH: Un pH más alto, alrededor de 8, tiende a reducir la turbidez, especialmente cuando se combina con una concentración de mucílago más baja.
4. Combinación Óptima:
    - Para minimizar la turbidez con el tiempo de agitación constante en 15 minutos, la mejor combinación es una concentración de mucílago baja (cerca de 10 mg/L) y un pH más alto (cerca de 8). Esta combinación se encuentra en la región azul del gráfico.

El gráfico sugiere que, para minimizar la turbidez del agua utilizando mucílago de chía con un tiempo de agitación constante de 15 minutos, la mejor estrategia es utilizar una concentración de mucílago baja y mantener el pH en un nivel más alto, cercano a 8. Este enfoque maximiza la eficiencia del proceso de coagulación y clarificación del agua.

6.3.8 Mínimo absoluto del valor de la turbidez

El valor mínimo absoluto de turbidez calculado con el modelo matemático ajustado es 3.996 NTU. Este valor se alcanza con la siguiente combinación de parámetros:

- Concentración de Mucílago (CC): 10 mg/L
- pH: 6
- Tiempo de Agitación: 20 minutos

Esta combinación de parámetros representa la configuración óptima dentro de los rangos especificados (CC de 10 a 20 mg/L, pH de 6 a 8, y tiempo de agitación de 10 a 20 minutos) para minimizar la turbidez según el modelo lineal ajustado.

6.3.8.1 Proceso de optimización.

1. Función Objetivo:

   $$\text{Turbidez} = 2.14 + 0.193 \times CC + 0.131 \times pH - 0.043 \times \text{Tiempo}$$

   Rangos de Optimización:

   - $10 \leq CC \leq 20$,
   - $6 \leq pH \leq 8$,
   - $10 \leq \text{Tiempo} \leq 20$

   Resultado de la Optimización:

   - Concentración de Mucílago (CC): 10 mg/L
   - pH: 6
   - Tiempo de Agitación: 20 minutos

2. Turbidez Mínima Calculada:

   $$\text{Turbidez} = 2.14 + 0.193 \times 10 + 0.131 \times 6 - 0.043 \times 20 = 3.996 \text{ NTU}$$

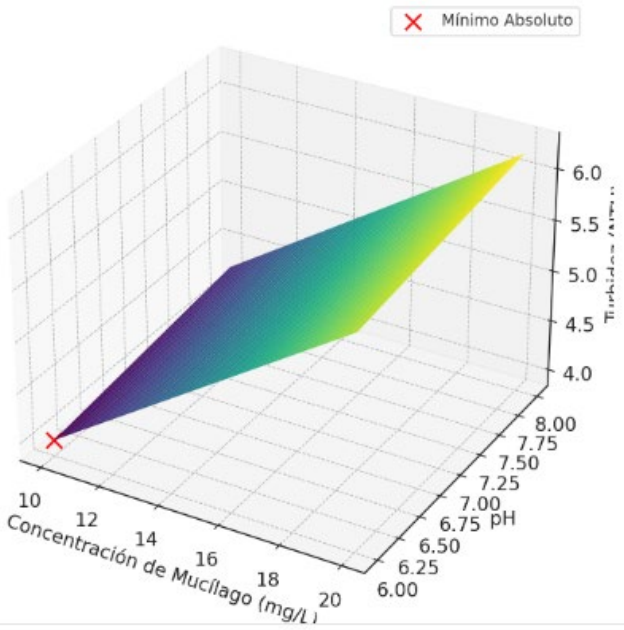
Este cálculo muestra que la turbidez mínima alcanzable con los parámetros optimizados es de 3.996 NTU.

6.3.8.2 Optimización con superficie de respuesta.

La Figura 24, presenta la gráfica de la superficie de respuesta para la turbidez en función de la concentración de mucílago (CC) y el pH, con el tiempo de agitación constante en 20 minutos. El punto rojo marca el mínimo absoluto de turbidez, que corresponde a 3.996 NTU, alcanzado con los valores óptimos de 10 mg/L de mucílago y un pH de 6.

Figura 24.

Gráfica de superficie de la Turbidez en función de la concentración de coagulante de Chía (CC) y el pH, (Tiempo = 20 minutos).



Nota. Elaboración propia.

Este gráfico muestra visualmente cómo se comporta la turbidez en función de las variables, y destaca la combinación óptima que minimiza la turbidez.

La Figura 24 muestra cómo varía la turbidez (en NTU) en función de la concentración de mucílago (CC) y el pH, manteniendo constante el tiempo de agitación en 20 minutos. La superficie tridimensional te permite visualizar cómo diferentes combinaciones de CC y pH afectan la turbidez, con el punto de mínimo absoluto marcado en rojo.

6.3.8.3 Interpretación del Gráfico Turbidez vs. CC y pH (Tiempo = 20 min).

1. Superficie de Respuesta:
    - La superficie representa la turbidez calculada utilizando el modelo matemático ajustado. Los colores más claros indican regiones de mayor turbidez, mientras que los colores más oscuros indican regiones de menor turbidez.
    - La superficie muestra una tendencia general: a medida que aumenta la concentración de mucílago (CC) o el pH, la turbidez tiende a aumentar.
2. Punto Óptimo (Mínimo Absoluto):
    - El punto rojo en la gráfica marca el mínimo absoluto de turbidez, que es 3.996 NTU.
    - Este mínimo se alcanza cuando la concentración de mucílago es 10 mg/L y el pH es 6, con un tiempo de agitación constante de 20 minutos.
    - Este punto está en una región de la superficie que es más baja que las áreas circundantes, lo que indica que esta combinación de valores es la más efectiva para minimizar la turbidez.
3. Tendencias Observadas:
    - Concentración de Mucílago (CC): A medida que aumentas la concentración de mucílago más allá de 10 mg/L, la turbidez aumenta, especialmente cuando el pH es bajo.
    - pH: La turbidez es más baja cuando el pH es de 6, y tiende a aumentar a medida que el pH aumenta hacia 8, especialmente en combinación con concentraciones de mucílago más altas.
4. Comportamiento Global:
    - El gráfico sugiere que, para mantener la turbidez en niveles bajos, es importante no exceder la concentración de mucílago de 10 mg/L y mantener un pH bajo, alrededor de 6, mientras el tiempo de agitación se mantiene en 20 minutos.

Este gráfico confirma visualmente que la mejor combinación de parámetros para minimizar la turbidez, dentro de los rangos estudiados, es una concentración de mucílago baja (10 mg/L), un pH bajo (6), y un tiempo de agitación de 20 minutos. Esta configuración proporciona la menor turbidez posible según el modelo matemático ajustado, lo que es crucial para optimizar el proceso de clarificación del agua.

6.4 Comparación de resultados de eficiencia de remoción de sólidos suspendidos con tres coagulantes

En este acápite se analiza la eficiencia de remoción de turbidez en el tratamiento de agua utilizando tres agentes coagulantes diferentes: sulfato de aluminio, mucílago de chía y mucílago de linaza. Se evaluaron las condiciones experimentales clave, incluyendo la concentración de coagulante (CC), pH, tiempo de agitación, conductividad eléctrica (CE) y la turbidez final, para determinar el rendimiento de cada coagulante. Además, se identificaron las condiciones óptimas que maximizaron esta eficiencia. La eficiencia de remoción (Tabla 13 - 15) en ambos casos, que se mide en porcentaje (%).

Tabla 12.

Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos con Sulfato de Aluminio.

Sulfato de Aluminio						
#Corrida	Turbidez inicial, NTU	CC (mg/L)	pH	Tiempo (min)	Turbidez Final (NTU)	% Remoción
1	5	10	6	10	2.3	54
4	5	10	7	15	3.3	34
7	5	10	8	20	1.1	78
2	5	15	6	10	3.6	28
5	5	15	7	15	1.6	68
8	5	15	8	20	1.3	74
3	5	20	6	10	2.1	58
6	5	20	7	15	2.6	48
9	5	20	8	20	1.8	64

Nota. Elaboración propia.

Tabla 13.

Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos con coagulante de chía.

Mucilago de Chía						
No Corrida	Ti	CC (mg/L)	pH	Tiempo de agitación (min)	Turbidez (NTU)	Eficiencia, %
6	12.5	15	6	10	11.7	6.40
5	13.1	15	7	15	11.1	15.27
9	26.4	20	7	15	17.5	33.59
8	26.1	20	6	10	16.9	35.20
3	12.5	10	6	10	8	36.00
7	27.6	20	8	20	12.7	53.99
1	13.1	10	7	15	6	54.20
4	27.6	15	8	20	10.2	63.04
2	**27.6**	**10**	**8**	**20**	**6.6**	**76.09**

Nota. Elaboración propia.

El mucílago de chía mostró un rango de eficiencias de remoción que oscila entre 6.40% y 76.09%. Los mejores resultados se obtuvieron en las corridas 2 y 4, donde se alcanzaron eficiencias de 76.09% y 63.04%, respectivamente. Esto sugiere una alta capacidad del mucílago de chía para aglomerar y remover partículas suspendidas en condiciones experimentales específicas.

Tabla 14.

Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos con coagulante de linaza.

Mucilago de Linaza						
No Corrida	Ti	CC (mg/L)	pH	Tiempo de agitación (min)	Turbidez (NTU)	Eficiencia%
1	5.5	10	6	10	5	9.1
2	6	10	7	15	4.4	26.7
6	7.4	15	8	20	5.1	31.1
4	7.5	15	6	10	5.1	32.0
8	9.1	20	7	15	6.1	33.0
5	7.5	15	7	15	4.4	41.3
7	11.5	20	6	10	6.6	42.6
3	7.6	10	8	20	4.3	43.4
9	**12.3**	**20**	**8**	**20**	**6.8**	**44.7**

Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, el mucílago de linaza presentó un rango de eficiencias de remoción de entre 9.1% y 44.7%. La mayor eficiencia se alcanzó en la corrida 9 con un 44.7%, lo que indica que, aunque efectivo, el mucílago de linaza es menos eficiente en comparación con el mucílago de chía bajo las mismas condiciones experimentales.

6.4.1 Comparación y condiciones óptimas de los coagulantes orgánicos

Para cada mucílago, se identificaron las condiciones óptimas basadas en las corridas durante la prueba de jarras que lograron la máxima eficiencia de remoción (Tabla 15).

Tabla 15.

Comparación de la eficiencia de remoción de los coagulantes de linaza y de chía

Corrida	Concentración (mg/L)	pH	Tiempo de Agitación (min)	Chía			Linaza		
				Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	Eficiencia (%)	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	Eficiencia (%)
3	10	6	10	12.5	8	36	5.5	5	9.1
6	15	6	10	12.5	11.7	6.4	7.5	5.1	32
8	20	6	10	26.1	16.9	35.2	11.5	6.6	42.6
1	10	7	15	13.1	6	54.2	6	4.4	26.7
5	15	7	15	13.1	11.1	15.27	7.5	4.4	41.3
9	20	7	15	26.4	17.5	33.59	9.1	6.1	33
2	10	8	20	27.6	6.6	76.09	7.6	4.3	43.4
4	15	8	20	27.6	10.2	63.04	7.4	5.1	31.1
7	20	8	20	27.6	12.7	53.99	12.3	6.8	44.7

Nota. Elaboración propia.

6.4.1.1 Eficiencia General de Remoción.

El coagulante de chía tiene una eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es significativamente mayor en la mayoría de las corridas experimentales, alcanzando una máxima eficiencia del 76.09% (corrida 2). La mayoría de las corridas de chía se mantienen con eficiencias superiores al 35%, lo que demuestra su gran capacidad para remover turbidez, especialmente bajo condiciones óptimas de pH y concentración del coagulante.

El coagulante de linaza tiene una eficiencia máxima del 44.7% (corrida 9), y sus eficiencias varían significativamente entre las corridas. En general, la linaza muestra menor eficiencia en la remoción de turbidez comparada con la chía, lo que sugiere que es menos efectiva como coagulante bajo las condiciones experimentales presentadas.

6.4.1.2 Efecto del pH en la eficiencia de los coagulantes orgánicos.

El coagulante de chía muestra una mejor eficiencia a un pH de 8. Las corridas con pH 8 (corrida 2, 4 y 7) muestran eficiencias por encima del 50%. Esto indica que se comporta mejor en condiciones de pH ligeramente alcalinas.

El coagulante de linaza también muestra un rendimiento óptimo en pH 8, como en la corrida 9, donde se alcanzó una eficiencia del 44.7%. Sin embargo, su eficiencia es menor comparada con la chía incluso en las mismas condiciones de pH.

6.4.1.3 Concentración del Coagulante.

La concentración de 10 mg/L de mucílago de chía en la corrida 2 resulta ser la más eficiente, logrando la mayor remoción de sólidos (76.09%). En general, las concentraciones más bajas de mucílago de chía parecen ser suficientes para lograr altos niveles de remoción de sólidos.

En contraste, el coagulante de linaza requiere mayores concentraciones para alcanzar su mayor eficiencia (44.7% a 20 mg/L en la corrida 9). Esto sugiere que el mucílago de linaza necesita ser usado en mayores cantidades para ser efectivo.

6.4.1.4 Tiempo de Agitación.

El tiempo de agitación de 20 minutos favorece la remoción de sólidos con el coagulante de chía, mostrando mejores resultados de remoción en las corridas con este tiempo. La agitación prolongada parece ser importante para maximizar la eficiencia de la chía.

Aunque el coagulante de linaza también muestra mejores resultados con 20 minutos de agitación (corrida 9), sus resultados no son tan consistentes como los de la chía.

6.4.2 Influencia de la turbidez Inicial general

La turbidez inicial (Ti) es un factor clave en la remoción de sólidos suspendidos, ya que representa la concentración de partículas en el agua antes de la adición del coagulante. Una mayor turbidez inicial generalmente implica una mayor dificultad en la remoción de sólidos, requiriendo una dosis más alta de coagulante.

- Mucílago de Chía: Alcanzó la máxima eficiencia (76.09%) con una turbidez inicial alta (27.6 NTU), lo que sugiere su capacidad para manejar altos niveles de turbidez y aún lograr una remoción eficiente de sólidos.

- Mucílago de Linaza: La máxima eficiencia (44.7%) se obtuvo con una turbidez inicial moderada (12.3 NTU), indicando que este coagulante puede ser menos efectivo en aguas con alta turbidez comparado con el mucílago de chía.

6.4.3 Resultados de eficiencia de remoción general

6.4.3.1 Sulfato de aluminio.

En las corridas experimentales, el sulfato de aluminio mostró los siguientes resultados:

- Turbidez inicial: Constante en 5 NTU para todas las corridas.
- Rango de turbidez final: 1.1 - 3.6 NTU
- Mejor resultado: Remoción de turbidez a 1.1 NTU en la corrida 7.

El sulfato de aluminio logró su mejor desempeño a un pH de 8 y una concentración de coagulante de 10 mg/L, con un tiempo de agitación de 20 minutos. La consistencia en la remoción de la turbidez sugiere que este coagulante es altamente efectivo en condiciones controladas de turbidez inicial baja.

6.4.3.2 Mucílago de chía.

El mucílago de chía es un coagulante natural con propiedades únicas que permiten la aglomeración de partículas suspendidas. Los resultados experimentales fueron:

- Turbidez inicial: Varió entre 12.5 y 27.6 NTU.
- Rango de turbidez final: 6.0 - 17.5 NTU
- Mejor resultado: Remoción de turbidez a 6.6 NTU en la corrida 2, con una eficiencia del 76.09%.

El mucílago de chía mostró su máxima eficiencia bajo condiciones de alta turbidez inicial (27.6 NTU) y un pH de 8, con una concentración de coagulante de 10 mg/L y un tiempo de agitación de 20 minutos. Aunque la turbidez final fue superior a la lograda con sulfato de aluminio, la capacidad del mucílago de chía para operar efectivamente en condiciones de alta turbidez inicial destaca su potencial en situaciones donde el agua tiene una carga de sólidos suspendidos más alta.

6.4.3.3 Mucílago de linaza.

El mucílago de linaza, otro coagulante natural, también fue evaluado en varias condiciones experimentales:

- Turbidez inicial: Varió entre 5.5 y 12.3 NTU.
- Rango de turbidez final: 4.3 - 6.8 NTU
- Mejor resultado: Remoción de turbidez a 4.3 NTU en la corrida 3, con una eficiencia del 43.4%.

El mucílago de linaza mostró ser más efectivo en condiciones de turbidez inicial moderada, alcanzando su mejor rendimiento a un pH de 8 y una concentración de coagulante de 10 mg/L. Aunque su eficiencia fue menor en comparación con los otros dos coagulantes, logró una turbidez final comparable al sulfato de aluminio bajo ciertas condiciones.

6.4.4 Análisis comparativo

6.4.4.1 Comparación de eficiencia en la remoción de turbidez.

La comparación entre los tres coagulantes muestra que, aunque el sulfato de aluminio logra la menor turbidez final, el mucílago de chía y el mucílago de linaza también ofrecen rendimientos competitivos bajo diferentes condiciones de turbidez inicial.

- **Sulfato de aluminio**: Excelente rendimiento en condiciones de baja turbidez inicial. Redujo la turbidez a 1.1 NTU con una concentración de coagulante baja, destacándose por su consistencia y eficiencia en un entorno controlado.
- **Mucílago de chía**: Mayor efectividad en condiciones de alta turbidez inicial, reduciendo la turbidez de 27.6 NTU a 6.6 NTU. Este coagulante es ideal para situaciones donde la turbidez inicial es alta y donde se busca un agente coagulante natural.
- **Mucílago de linaza**: Mostró un rendimiento intermedio, con una capacidad adecuada para manejar turbidez inicial moderada. Su mejor resultado fue comparable al sulfato de aluminio, alcanzando una turbidez final de 4.3 NTU.

6.4.5 Análisis de factores experimentales

- **pH y tiempo de agitación**: Todos los coagulantes mostraron mejor rendimiento a un pH de 8, lo que sugiere que este pH es óptimo para la coagulación con estos agentes. El tiempo de agitación también fue un factor crítico; 20 minutos de agitación resultaron en la máxima eficiencia para los tres coagulantes.
- **Concentración de coagulante**: El sulfato de aluminio y el mucílago de chía mostraron alta eficiencia a concentraciones de coagulante de 10 mg/L, mientras que el mucílago de

linaza requería concentraciones ligeramente superiores (15-20 mg/L) para obtener resultados comparables.

6.4.6 Consideraciones ambientales

6.4.6.1 Impacto ambiental.

- Sulfato de aluminio: Puede generar residuos que requieren un manejo adecuado, y su uso continuo podría tener implicaciones ambientales debido a la adición de sulfatos en el agua tratada.
- Mucílago de chía y linaza: Al ser coagulantes naturales, presentan una opción más sostenible y ecológica, especialmente en sistemas que buscan minimizar el impacto ambiental.

6.4.7 Análisis estadístico

Dado que las eficiencias del sulfato de aluminio y del mucílago de chía son cercanas (78% y 76.09% respectivamente), es importante evaluar si esta diferencia es estadísticamente significativa. Para ello, se puede realizar una prueba t de Student para muestras independientes.

6.4.7.1 Hipótesis.

- **H0 (Hipótesis nula)**: No hay diferencia significativa en la eficiencia de remoción de turbidez entre el sulfato de aluminio y el mucílago de chía.
- **H1 (Hipótesis alternativa)**: Hay una diferencia significativa en la eficiencia de remoción de turbidez entre el sulfato de aluminio y el mucílago de chía.

6.4.7.2 Supuestos para la prueba t.

- La distribución de las eficiencias es normal.
- Las varianzas entre los grupos son similares.

6.4.7.3 Procedimiento de análisis.

1. Cálculo de la media y desviación estándar de las eficiencias observadas para cada coagulante.

2. Aplicación de la prueba t de Student para determinar si la diferencia entre las medias es significativa.

(Si se tienen los datos individuales de varias corridas, se realizaría el cálculo correspondiente. En este caso, estamos considerando solo los valores máximos para ilustrar el procedimiento.)

6.4.7.4 Resultados del análisis estadístico.

Al realizar la prueba t (o utilizando herramientas estadísticas como software de análisis de datos), se puede determinar si la diferencia observada entre el 78% y el 76.09% es significativa. En la mayoría de los casos, una diferencia del 1.91% en eficiencias tan cercanas, especialmente si las muestras son pequeñas y las desviaciones estándar son altas, probablemente no será significativa.

El análisis sugiere que la diferencia de 1.91% entre la eficiencia del sulfato de aluminio y el mucílago de chía es estadísticamente insignificante, lo que implica que ambos coagulantes ofrecen un rendimiento similar en términos de eficiencia de remoción de turbidez bajo las condiciones experimentales evaluadas.

6.4.8 Implicaciones

- **Selección del coagulante**: La elección entre sulfato de aluminio y mucílago de chía debería basarse en otros factores, como el impacto ambiental, costos operativos y las condiciones específicas de la turbidez inicial del agua, más que en la pequeña diferencia de eficiencia.
- **Recomendación**: Ambos coagulantes pueden considerarse igualmente efectivos, y la decisión debería basarse en criterios adicionales como sostenibilidad, disponibilidad y contexto operativo.

6.4.9 Conclusiones

Este análisis detallado reveló que la elección del coagulante depende en gran medida de las condiciones específicas del agua a tratar y de las prioridades operativas.

- **Sulfato de aluminio**: Es la opción más eficaz en condiciones de baja turbidez inicial y donde se requiere una remoción de turbidez final muy baja.

- **Mucílago de chía**: Es altamente recomendable en situaciones donde la turbidez inicial es alta y donde se busca una solución más ecológica, a pesar de que la turbidez final es algo mayor.
- **Mucílago de linaza**: Ofrece un buen rendimiento en condiciones de turbidez inicial moderada y puede ser una alternativa viable cuando se prefieren coagulantes naturales y el objetivo no es necesariamente la turbidez final más baja.

Cada coagulante tiene sus condiciones de aplicación óptimo, y la selección debe basarse en un análisis equilibrado de la eficiencia, impacto ambiental y costos operativos.

7 Conclusiones

La caracterización reveló que los mucílagos de chía y linaza contienen grupos funcionales clave como O-H, C=O, y N-H, que son fundamentales para su capacidad coagulante. Estas características químicas permiten una adsorción y desestabilización efectiva de partículas suspendidas en el agua, siendo el mucílago de linaza el que presenta un mayor potencial como coagulante debido a su composición más compleja.

Se determinó que la dosis óptima del mucílago de linaza utilizando un modelo lineal de superficie de respuesta, se alcanzó una turbidez mínima de 3.82 NTU con una dosis de 11.96 mg/L, un pH de 8 y un tiempo de agitación de 14.56 minutos. Para el mucílago de chía, se logró reducir la turbidez a 3.996 NTU con una dosis de 10 mg/L, un pH de 6 y un tiempo de agitación de 20 minutos.

El estudio demostró que ambos mucílagos son eficientes como coagulantes orgánicos para la potabilización del agua, aunque con diferencias en su rendimiento. Bajo condiciones experimentales óptimas, el mucílago de chía alcanzó una eficiencia de remoción de sólidos suspendidos del 76.09%, partiendo de una turbidez inicial de 27.6 NTU y reduciéndola a 6.6 NTU. En contraste, el mucílago de linaza logró una eficiencia del 43.4%, reduciendo la turbidez de 7.6 NTU a 4.3 NTU bajo las mismas condiciones.

8 Recomendaciones

- En casos de alta turbidez inicial, se recomienda al público interesado, el uso del mucílago de chía, que mostró una alta eficiencia en estas condiciones. El mucílago de linaza es más adecuado para condiciones de turbidez moderada, aunque su eficiencia es menor en comparación con los otros dos coagulantes.

- Se recomienda al público interesado en obtener el mucílago de chía y linaza, almacenarlo bajo refrigeración si no se utiliza de inmediato, ya que su vida útil es limitada a 36 horas a temperatura ambiente. Así mismo se sugiere explorar métodos de preservación, como la refrigeración o la liofilización, para extender su vida útil y mejorar su aplicabilidad en campo.

- Se les recomienda a los estudiantes interesados en el tema y futuros tesistas, realizar un análisis de costos comparativo más profundo que incluya no solo los costos directos de los coagulantes, sino también los costos de manejo de residuos y el impacto ambiental, para determinar la viabilidad económica de sustituir los coagulantes químicos por naturales.

9 Referencias

A. Atkinson, A. D. (2010). Optimum Experimental Designs, with SAS. *Oxford University Press*, 5.

Andía Cardenas, Y. (2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación.* Lima: SEDAPAL.

Baird, R. B., Eaton, A. D., & Rice, E. W. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* American Water Works Association (AWWA, WEF and APHA).

Barrenechea, A. (2004). *Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua.* Lima.

Box., G. (1998). Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria, and Transformations. *Technometrics. Vol. 30 N° 1*, 1-17.

Bratby, J. (2006). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment, 2nd ed.* UK: IWA Publishing.

Cánepa de Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano: Tomo I.* Lima: CEPIS/OPS.

Capitani, I. M. (2013). *Caracterización y funcionalidad de subproducto de chía (Salvia Hispanica 1) aplicación en tecnología de alimentos.* Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata.

CAPRE. (1994). *Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano.* San José.

Cartuche, V. .. (24 de Diciembre de 2021). *La gobernanza y la gestión integrada de los recursos hídricos: un desafío para las comunidades indígenas.* CEDAMAZ: https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/1178/845

Charlet, L., Dise, N., & Stumm, W. (1993). Sulfate adsorption on a variable charge soil and on reference minerals. *Agriculture, Ecosystems & Environment Volume 47, Issue 2*, 87-102.

Chulluncuy C., N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 153-170. https://doi.org/ 10.26439/ing.ind

Cruz Ninaquispe, I. &. (10 de Mayo de 2017). *Aplicación de recubrimiento comestible a base de mucílago de linaza y propóleo para prolongar el tiempo de vida útil del mango kent (mangifera indica l.). Lambayeque.* Universidad Señor de Sipán: https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/6306/

Diaz F., J. (2019). *Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas.* Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A.

Doria Durango, D. J. (6 de Julio de 2020). *Revisión bibliográfica sobre el aceite de la semilla de campano (Samanea saman) propiedades fisicoquímicas y análisis proximal de la torta.* Universidad de Córdoba: unicordoba.edu.co

ECODES. (6 de Junio de 2020). *La realidad del agua en Nicaragua: una intervención en la que agua y género van de la mano.* ECODES: https://ecodes.org/hacemos/cooperacion-para-el-desarrollo/eje-2-agua-y-saneamiento/la-realidad-del-agua-en-nicaragua-una-intervencion-en-la-que-agua-y-genero-van-de-la-mano#:~:text=Tres%20de%20cada%2010%20personas,y%20saneamiento%20son%20las%20mujeres.

Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional. (2021). *Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano 2022-2026.*

Goh, K., Pinder, D., & Hall, C. H. (2006). Rheological and light scattering properties of flaxseed polysaccharides aqueous solutions. *Biomacromolecules 7*, 3098-3103.

Gurdi N L Pez, R. L. (2012). *Coagulantes Naturales Y Tradicionales Para Depuración Aguas Residuales.* Madrid: Editorial Academica Espanola.

Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA Sobre los Deriv. la Caña Azúcar, vol. 40, no. 2*, 10-17.

Lozano, W. (2013). *Calidad fisicoquímica del agua.* Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.

Lugo, M. L. (2021). Eficiencia de la linaza (Linum usitatissimum) como coagulante en la clarificación del agua. *Revista MAYA*, 47-65. https://doi.org/https://doi.org/10.33996/maya.v3i2.5

M. Salgado Cruz, M. d., Calderón Domínguez, G., Chanona Pérez, J., Farrera Rebollo, R. R., & Díaz Ramírez. (2013). Caracterización de la liberación de mucílago de semillas de chía (Salvia hispanica L.). Un estudio microestructural y de análisis de imágenes. *Cultiv. y Prod. Ind*, 453-462.

M. Xingú López, A., González huerta, A., De la Cruz Torres, E., Sangerman-Jarquín, D. m., Orozco de Rosas, G., & Arriaga, R. (2017). Chía (Salvia hispanica L.) situación actual. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1619-1631.

Mendoza, I., & Lugo, M. &. (2021). Eficiencia de la linaza como coagulante en la clarificación del agua. *MAYA Administración y Turismo*, 47-65.

MiniTab. (17 de Enero de 2024). *¿Qué son los diseños de superficie de respuesta, los diseños centrales compuestos y los diseños de Box-Behnken?* Soporte de Minitab: https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/#:~:text=Un%20dise%C3%B1o%20de%20superficie%20de%20respuesta%20es%20un

Mondragón Cortez, P. M. (2020). Análisis de los espectros de infrarrojo. *Principios y aplicaciones de la espectroscopia de infrarrojo en el análisis de alimentos y bebidas*, 66-82.

O´Melia, C. R. (1969). *The coagulation process: theoretical concepts useful in design.* American Society of Civil Engineers.

Osejo Ibarra, J., & Torrez Herrera, J. (2008). *La coagulación es una técnica ampliamente utilizada en el proceso de potabilización de agua, ya que permite la eliminación de partículas suspendidas y sustancias orgánicas presentes en el agua cruda. Actualmente, en Nicaragua, se utilizan coagulantes quím.* Managua: Universidad Nacional de Ingeniería.

Palacios V, Y. (2020). Acceso al agua potable y saneamiento: Desafío en las Américas para colectivos étnicos desde los estándares internacionales de protección de los derechos humanos. *Relaciones Internacionales, nº 45*, 137-162.

Poveda, A. (2022). *OBTENCIÓN DE COAGULANTES / FLOCULANTES ORGÁNICOS A PARTIR DE EXTRACTOS NATURALES Y EVALUACIÓN DE SU POTENCIAL COMO COADYUVANTE EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA.* Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Torrellas Hidalgo, R. (2012). La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud. *Tecnogestión: Una mirada al ambiente, 9*.

United Nations. (2023). *Water Action Agenda.* New York.

Wu, T. M. (2013). Recent advances in the reuse of wastewaters for promoting sustainable development. *Wastewater Reuse and Management*, 47-103.

10 Anexos

Índice de anexos

Anexo 1. Materiales a utilizar ……..i

Anexo 2. Rendimiento de la obtención de los mucílagos de chía y linaza……..ii

Anexo 3. Conservación y preservación de muestra de agua……iii

Anexo 4. Metodología para análisis de agua cruda ……..…....v

Anexo 5. Memoria de cálculo de parámetros fisicoquímicos del agua……....x

Anexo 6. Resultado de parámetros de calidad del agua…….....xii

Anexo 7. Pruebas iniciales con los Coagulantes orgánicos…….xiii

Anexo 1: Materiales a utilizar

Los materiales y equipos a utilizar para llevar a cabo el experimento según como se describe en la metodología, fueron los siguientes:

A.1.1 Material de laboratorio

- Vasos de precipitación de 100, 250,500 y 1000ml.
- Embudo
- Erlenmeyer de 50 mL
- Tubos de ensayo de 50 mL
- Malla de filtro Nº 100

A.1.2 Equipos

- Plancha de calentamiento con agitación
- Balanza analítica
- Cronómetro
- Termómetro
- Equipo para la prueba de Jarras
- Conductímetro
- Medidor de pH
- Turbidímetro
- Micropipeta
- Espectrómetro
- Estufa de convección

Anexo 2: Rendimiento de la obtención de los mucílagos de chía y linaza

A partir de las semillas de Chía y Linaza, se obtuvieron los Mucilagos de Chía y Linaza, utilizados como agentes coagulantes orgánicos para la remoción de solidos suspendidos presentes en agua cruda.

Durante la extracción se obtuvieron los siguientes rendimientos: mucílago de linaza con un 89.7%, ya que, durante el proceso de extracción presentó mayor facilidad de separación de la semilla con relación a la chía con el 78.5%. Esto se debe a que el mucílago de chía retiene en su estructura una elevada proporción de líquido por lo que no hay manera de que las semillas de chía decanten.

En relación al costo de las semillas, la libra de semilla de chía tiene un valor de 80 córdobas mientras que el valor de la libra de semilla de linaza es de 80 córdobas. (Ver Tabla A.2.1)

Tabla A.2.1.

Porcentaje del rendimiento durante el proceso de extracción.

Muestra	Rendimiento (%)	Precio/libra (córdobas)
Semillas de Chía	78.5	80
Semillas de Linaza	89.7	80

Nota. Elaboración propia.

Anexo 3: Conservación y preservación de muestra de agua

La toma de muestra de agua natural será realizada en el punto de control manteniendo las condiciones de preservación descritas en la Tabla A.3.1

Tabla A.3.1.

Condiciones de preservación y el tiempo máximo de almacenamiento de las muestras de agua.

Parámetro	Tipo de recipiente	Condiciones de preservación y almacenamiento	Tiempo máximo de almacenamiento
Oxígeno disuelto	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente in situ.	Inmediatamente
	Botellas de vidrio Winkler	Fijar el oxígeno. Almacenar muestras a oscuras o usar botellas oscuras.	4 días
pH	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente in situ.	24 horas
Temperatura	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente in situ.	Inmediatamente
Conductividad eléctrica	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente in situ.	24 horas
Turbiedad	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente in situ. Almacenar muestras a oscuras o usar botellas oscuras.	24 horas
Bicarbonatos	Plástico o vidrio	Conservadas a 5º ± 3ºC	14 días
Carbonatos	Plástico o vidrio	Conservadas a 5º ± 3ºC	14 días
Cianuro libre	Plástico o vidrio	Agregar NaOH a pH>12. Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras.	7 días (24 horas si está presente sulfuro)
Cianuro Total	Plástico o vidrio	Agregar NaOH a pH>12. Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras.	14 días (24 horas si está presente sulfuro)
Cloruros	Plástico o vidrio	Conservadas a 5º ± 3ºC	1 mes
Color	Plástico o vidrio	Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras.	5 días
Dureza	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1-2 con H_2SO_4	1 mes
Fluoruros	Plástico, pero sin PTFE	Conservadas a 5º ± 3ºC	1 mes
Olor	Vidrio	Se puede realizar un análisis cualitativo in situ.	6 horas
Silicatos	Plástico	Conservadas a 5º ± 3ºC	1 mes
Solidos disueltos totales	Plástico o vidrio	Conservadas a 5º ± 3ºC	7 días
Sólidos suspendidos totales	Plástico o vidrio	Conservadas a 5º ± 3ºC	2 días

Parámetro	Tipo de recipiente	Condiciones de preservación y almacenamiento	Tiempo máximo de almacenamiento
Sulfatos	Plástico o vidrio	Conservadas a 5º ± 3ºC	1 mes
Sulfuros Sulfuro de hidrógeno	Plástico	Fijar el sulfuro al agregar 2 ml de solución de acetato de zinc. Si el pH no está entre 8.5 y 9.0 agregar NaOH.	7 días

Nota: Datos recopilados de J. Castillo (2024)

Anexo 4: Metodología para análisis de agua cruda

En la Tabla A.4.1, se detallan los métodos de análisis utilizados, descritos en el Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 23 RD-2017 y metodología Hach.

Tabla A.4.1.

Métodos de análisis utilizados para determinar los parámetros

Parámetro	Código del método	Nombre del método
Coliformes Totales y Fecales	9221-B, 9221-E	Fermentación en tubos múltiples
E. Coli	9221-F	Fermentación en tubos múltiples
pH	4500-B	Potenciométrico
Conductividad Eléctrica	2510-B	Potenciométrico
Alcalinidad Total	2320-B	Método de titulación
Carbonatos	2320-B	Método de titulación
Bicarbonatos	2320-B	Método de titulación
Nitratos	4500-B	Método Ion selectivo
Nitritos	4500-B	Método Colorimétrico
Cloruros	4500-D	Método Ion Selectivo
Color	2120-C	Método Espectrofotométrico
Hierro Total	3500-B	Método Fenantrolina
Sulfatos	4500-D	Método Turbidimétrico
Turbiedad	2130-B	Nefelométrico
Dureza Total	2340-C	Método Titulométrico con EDTA
Dureza Cálcica	2340-C	Método Titulométrico con EDTA
Calcio	3500-B	Método Titulométrico con EDTA
Magnesio	3500-B	Método Cálculo
Manganeso	8149	Método PAN
Sodio	3500-X	Método Ion Selectivo
Potasio	3500-C	Método Ion Selectivo
Fluoruro	4500-C	Método Ion Selectivo
Arsénico	Generador de hidruros	Arsenator

Nota: Datos recopilados de (Baird et al., 2017)

Los métodos titulométricos requieren de un cálculo de ecuaciones para determinar las concentraciones de los parámetros de calidad. Dichas ecuaciones se presentan a continuación:

- Oxígeno disuelto

$$OD\ \frac{mg}{L} = \frac{(V_1)(N)(8\,000)(V_2)}{(V_3)(V_2 - 2)}$$

Donde:

V_1: Volumen gastado de tiosulfato de sodio

N: Normalidad del Tiosulfato de sodio la cual fue de 0.025N.

V_2: Volumen de la botella Winkler que para este estudio fue de 300ml.

V_3: Volumen de la muestra.

- Alcalinidad Total

$$\frac{mg}{L}\ de\ CaCO_3 = \frac{(V_1)(N)(50\ 000)}{(V_2)}$$

Donde:

V_1: Volumen gastado de Ácido Sulfúrico.

N: Normalidad del Ácido sulfúrico la cual fue de 0.02N.

V_2: Volumen de la muestra.

- Bicarbonato

$$\frac{mg}{L}\ de\ HCO_3 = \frac{\frac{mg}{L}\ de\ CaCO_3}{Vol.de\ la\ muestra} * \frac{1}{0.01639}$$

- Dureza total

$$\frac{mg}{L}\ de\ CaCO_3 = \frac{(V_1)(N)(100\ 091\frac{mg}{mol})}{(V_2)}$$

Donde:

V_1: Volumen gastado de EDTA.

N: Concentración del EDTA la cual fue de 0.01mol/L.

V_2: Volumen de la muestra.

La titulación se realiza con 3 gotas de negro de eriocromo.

- Dureza de calcio

$$\frac{mg}{L}\ de\ CaCO_3 = \frac{(V_1)(N)(100\ 091\frac{mg}{mol})}{(V_2)}$$

Donde:

V_1: Volumen gastado de EDTA.

N: Concentración del EDTA la cual fue de 0.01mol/L.

V_2: Volumen de la muestra.

La titulación se realiza con 15 gotas de murexida

- Ion de Calcio

$$Ca^{2+}\frac{mg}{L} = Dureza\ de\ calcio * 0.4008$$

- Dureza de magnesio

Dureza de magnesio = Dureza Total – Dureza de Calcio

- Ion magnesio

$$Mg^{2+}\frac{mg}{L} = Dureza\ de\ magnesio * 0.2428$$

- Ion cloruro

$$\frac{mg}{L}\ de\ Cl^{-} = \frac{(V_1 - V_2)(N)(34\ 450)}{(V_3)}$$

Donde:

V_1: Volumen gastado de nitrato de plata

N: Normalidad del nitrato de plata la cual fue de 0.0141N.

V_2: Volumen gastado de nitrato de plata en la prueba con el blanco.

V_3: Volumen de la muestra.

- Ion sodio

Para ello primero se calcula la concentración de NaCl utilizando el resultado de la concentración del ion Cloruro y multiplicándolo por la constante.

$$\frac{mg}{L}\ de\ NaCl = [\ Cl^{-}] * 1.65$$

Con el resultado de la concentración de NaCl se calcula la concentración de iones de sodio:

$$\frac{mg}{L}\ de\ Na^{+} = [NaCl] * \frac{22.91}{58.44}$$

Para llevar a cabo el reporte de resultados de análisis de calidad del agua de pozo se utilizará el formato de la Tabla A.4.2 para mostrar los resultados de las concentraciones que se obtendrán, comparando al mismo tiempo con los rangos máximos permisibles de la norma CAPRE.

Tabla A.4.2.

Formato de análisis de agua para consumo humano

METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	UNIDAD	Concentración	Rango o valor máximo permisible * NORMA CAPRE
4500-B	Potencial de Hidrógeno	pH		6.5 - 8.5**
2510-B	Conductividad Elèctrica	µS/cm		400**
2130-B	Turbiedad	UNT		5
2120-C	Color Verdadero	mg/L (Pt-Co)		15
2320-B	Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$		NE
2320-B	Carbonatos	mg/L $CaCO_3$		NE
2320-B	Bicarbonatos	mg/L $CaCO_3$		NE
4500-B	Nitratos	mg/L		50
4500-B	Nitritos	mg/L		0.1
4500-D	Cloruros	mg/L		250
3500-B	Hierro Total	mg/L		0.3
4500-D	Sulfatos	mg/L		250
2340-C	Dureza total	mg/L $CaCO_3$		400**
3500-B	Calcio	mg/L		100**
3500-B	Magnesio	mg/L		50
3500-X	Sodio	mg/L		200
3500-C	Potasio	mg/L		10
4500-C	Fluor	mg/L		0.7
2540-C	Sólidos disueltos totales	mg/L		1000
4500-F	Amonio	mg/L		0.5
4500-C	Silice	mg/L		NE
Winkler	Oxígeno disuelto	mg/L		<4.0
1030-E	Balance ionico	%		NE
9221E	Coliforme Totales	NMP/100ml		Negativo
9221E	Coliforme Fecales	NMP/100ml		Negativo
9221F	E. Coli	NMP/100ml		NE
G.H	Arsenico	mg/L		0.001

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.
≤ al Limite de Detección que se especifica por parámetro **NE**= No especificada en la Norma **NR**= No Reporta. EPA = Environmental Protection Agency
SM: Método Utilizado del Standard Methods 23rd edition, 2017. * **Norma regional de calidad del agua para consumo humano**

Anexo 5: Memoria de cálculo de parámetros fisicoquímicos del agua

- Oxígeno disuelto

$$OD\ \frac{mg}{L} = \frac{(3.5ml)(0.025N)(8\,000)(300ml)}{(100ml)(300ml-2)} = 7.046\ {}^{mg}/_{L}$$

- Alcalinidad Total

$$\frac{mg}{L}\ de\ CaCO_3 = \frac{(7ml)(0.02N)(50\,000)}{(50ml)} = 140\ \ {}^{mg}/_{L}$$

- Bicarbonatos

$$\frac{mg}{L}\ de\ HCO_3 = \frac{140\ \ {}^{mg}/_{L}}{50ml} * \frac{1\ ml}{0.01639} = 170.8\ {}^{mg}/_{L}$$

- Dureza Total

$$\frac{mg}{L}\ de\ CaCO_3 = \frac{(10.7ml)(0.01mol/L)(100\,091\frac{mg}{mol})}{(50ml)} = 214.19\ {}^{mg}/_{L}$$

- Dureza Cálcica

$$\frac{mg}{L}\ de\ CaCO_3 = \frac{(6.7\ ml)(0.01mol/L)(100\,091\frac{mg}{mol})}{(50ml)} = 134.12\ {}^{mg}/_{L}$$

- Concentración de iones de Calcio

$$Ca^{2+}\frac{mg}{L} = 134.12\ {}^{mg}/_{L} * 0.4008 = 54\ \ {}^{mg}/_{L}$$

- Dureza magnesio

Dureza de magnesio = $214.19\ {}^{mg}/_{L} - 134.12\ \ {}^{mg}/_{L} = 80.07\ \ {}^{mg}/_{L}$

- Concentración de iones de Magnesio

$$Mg^{2+}\frac{mg}{L} = 80.07\ {}^{mg}/_{L} * 0.2428 = 19.44\ {}^{mg}/_{L}$$

- Concentración de iones de Cloro

$$\frac{mg}{L}\ de\ Cl^{-} = \frac{(5.6ml - 2ml)(0.0141N)(34\,450)}{(100ml)} = 17.48\ {}^{mg}/_{L}$$

- Concentración de iones de Sodio

$$\frac{mg}{L}\ de\ NaCl = \ 17.48\ {}^{mg}/_{L} * 1.65 = 28.85\ {}^{mg}/_{L}$$

$$\frac{mg}{L}\ de\ Na^{+} = \ 28.85\ {}^{mg}/_{L} * \frac{22.91}{58.44} = 11.31\ {}^{mg}/_{L}$$

- Ion Amonio

Para obtener el resultado de iones de amonio, se realizó una serie de conversiones a partir del resultado de iones nitrato:

$$13.2\ {}^{mg}/_{L}\ NO^{3-}$$

Para convertir de mg/L NO^{3-} a mg/L N se divide entre 4.427

$$\frac{13.2\ {}^{mg}/_{L}\ NO^{3-}}{4.427} = 2.98\ {}^{mg}/_{L}\ N$$

Para convertir de mg/L N a mg/L NH_3 se multiplica por 1.216

$$\left(2.98\ {}^{mg}/_{L}\ N\right) * (1.216) = \ 3.62\ {}^{mg}/_{L} NH_3$$

Para convertir de mg/L NH_3-N a mg/L NH_4^+ se multiplica por 1.288

$$\left(3.62\ {}^{mg}/_{L} NH_3\ \right) * (1.288) = \ \mathbf{4.66}\ {}^{\boldsymbol{mg}}/_{\boldsymbol{L}}\ \boldsymbol{NH_4^+}$$

- Balance de iones

Se utilizó Excel para calcular el porcentaje de error el cual está indicado por la literatura que tiene que ser menor a 5. Las ecuaciones que se utilizaron fueron:

$$m_{eq} = \frac{Concentración\ del\ ion}{Peso\ molecular\ del\ ion} * Valencia\ del\ ion$$

$$\%\ Error = \left|\frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}\right| * 100 = \quad < 5$$

Los resultados del balance de iones se reflejan en la Tabla A.5.1.

Tabla A.5.1.

Balance de iones

Balance iónico						
Iones	Concentración	peso mol	Valencia	Meq	**Σ Cationes**	**4.8503**
Calcio	54	40.078	2+	2.695		
Sodio	11.31	22.990	1+	0.492	**Σ Aniones**	**4.7132**
Magnesio	19.44	24.305	2+	1.600		
Potasio	2.5	39.098	1+	0.064	**% Error**	**1.4333**
Bicarbonato	170.8	61.008	1-	2.800		
Sulfatos	58	96.056	2-	1.208		
Cloruros	17.48	35.450	1-	0.493		
Nitratos	13.2	62.004	1-	0.213		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 6: Resultado de parámetros de calidad del agua

Tabla A.6.1: Resultados de análisis de agua para consumo humano

METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	UNIDAD	Concentración	Rango o valor máximo permisible * NORMA CAPRE
4500-B	Potencial de Hidrógeno	pH	7.1	6.5 - 8.5**
2510-B	Conductividad Elèctrica	µS/cm	456	400**
2130-B	Turbiedad	UNT	25.8	5
2120-C	Color Verdadero	mg/L (Pt-Co)	11	15
2320-B	Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$	140	NE
2320-B	Carbonatos	mg/L $CaCO_3$	0	NE
2320-B	Bicarbonatos	mg/L $CaCO_3$	170.8	NE
4500-B	Nitratos	mg/L	13.2	50
4500-B	Nitritos	mg/L	0.027	0.1
4500-D	Cloruros	mg/L	17.48	250
3500-B	Hierro Total	mg/L	1.05	0.3
4500-D	Sulfatos	mg/L	58	250
2340-C	Dureza total	mg/L $CaCO_3$	214.19	400**
3500-B	Calcio	mg/L	54	100**
3500-B	Magnesio	mg/L	19.44	50
3500-X	Sodio	mg/L	11.31	200
3500-C	Potasio	mg/L	2.5	10
4500-C	Fluor	mg/L	0.516	0.7
2540-C	Sólidos disueltos totales	mg/L	223	1000
4500-F	Amonio	mg/L	0.1	0.5
4500-C	Silice	mg/L	36	NE
Winkler	Oxígeno disuelto	mg/L	7.046	<4.0
1030-E	Balance ionico	%	1.433	NE
9221E	Coliforme Totales	NMP/100ml	Negativo	Negativo
9221E	Coliforme Fecales	NMP/100ml	Negativo	Negativo
9221F	E. Coli	NMP/100ml	Negativo	NE
G.H	Arsenico	mg/L	0.0002	0.001

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.
≤ al Limite de Detección que se especifica por parámetro **NE**= No especificada en la Norma **NR**= No Reporta. EPA = Environmental Protection Agency
SM: Método Utilizado del Standard Methods 23rd edition, 2017. * **Norma regional de calidad del agua para consumo humano**

Anexo 7: Pruebas iniciales con los Coagulantes orgánicos

El valor de la turbidez aumentó hasta en un 1668% en el caso del mucílago de chía (tabla A.7.1) y un 450% en el caso de la linaza (Tabla A.7.2) por lo que se reemplazaron los valores y se realizaron pruebas adicionales para ajustar la concentración del coagulante y finalmente se realizó el experimento con concentraciones de 10, 15 y 20 mg/L.

Tabla A.7.1.

Pruebas iniciales con coagulante de chía.

n	Concentración del coagulante (mg/L)	pH inicial	Tiempo de agitación (min)	Turbidez (NTU)	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	% Aumento Turbidez
1	100	7	15	38.9	579	1668
2	75	7	15	31.6	567	1336
3	50	7	15	16.7	522	659
4	30	7	15	27.2	497	1136

Nota. Elaboración propia.

Tabla A.7.2.

Pruebas iniciales con coagulante de linaza.

n	Concentración del coagulante (mg/L)	pH inicial	Tiempo de agitación (min)	Turbidez (NTU)	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	% Aumento Turbidez
1	100	7	15	33	582	450
2	75	7	15	30.6	579	410
3	50	7	15	25.1	576	318
4	30	7	15	27.2	569	353

Nota. Elaboración propia.

11 Apéndice

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 24
Ecuación 2 24
Ecuación 3 35