

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

OPCIÓN IX TESIS

**“EVALUACIÓN DE MATERIALES NATURALES EMPLEADOS COMO
COAGULANTES PARA EL TRATAMIENTO DE UN AGUA RESIDUAL
TEXTIL”**

**Que para obtener el Título de
INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA

EVELYN GUADALUPE HINOJOSA JIMENEZ

DIRECTORA:

DRA. SAGNITE VENTURA CRUZ

ASESORA:

M. en C. ANA ELISA ALCÁNTARA VALLADOLID

AGOSTO 2024

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Instrumental de la División de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco y el Laboratorio de Calidad del Agua del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) UAEMéx, como parte del proyecto **DIDT/CI2023/06** “Evaluación de materiales naturales empleados como coagulantes para el tratamiento de un agua residual industrial”, bajo la responsabilidad de la Dra. Sagnite Ventura Cruz y la Mtra. Ana Elisa Alcántara Valladolid.



Este trabajo de investigación fue registrado con el título: “Evaluación de materiales naturales empleados como coagulantes para el tratamiento de un agua residual textil ”, con el número JDIA/T-210/2024 ante la Academia de Ingeniería Ambiental.

El trabajo se inscribe en la línea de investigación: Ingeniería Ambiental y Energías Renovables del Programa de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco



Agradecimientos

Como una muestra de mi cariño, por todo el amor y el apoyo brindado y por qué hoy veo llegar a su fin una de las metas de mi vida, le agradezco a Dios por la familia que me dio, porque sin ellos no estaría logrando esto, gran parte de este logro es gracias a su amor y confianza.

Gracias infinitas a mis padres María del Carmen Jimenez Morquecho y Octavio Hinojosa Silva, por su amor incondicional y su apoyo. Por su confianza en mí, incluso en los momentos más difíciles, por guiarme en el camino y apoyar cada sueño, han sido el pilar de este logro.

A mis hermanos Jesús y Alexander, y mi pequeña Kay por ser mi motivación para salir adelante por apoyarme y escucharme, por acompañarme en cada aventura y cada sueño, por su amor incondicional y por cuidar siempre de mí.

A mis asesoras Dra. Sagnite Ventura y Mtra. Ana Elisa Alcántara, infinitas gracias por haber depositado su confianza en mí, al darme este gran proyecto, por compartir sus conocimientos, por su comprensión, orientación y paciencia, su guía constante y su fe en mis habilidades, me han motivado a alcanzar cosas que nunca imagine.

A la L.C. Gabriela Rosales Muñoz por su cariño, apoyo y conocimientos compartidos, por su paciencia y carisma porque ser una excelente amiga y docente, gracias por su confianza y por ser parte de este maravilloso proyecto que hoy llega a su final.

A mis amigos y compañeros que estuvieron conmigo en los momentos de estrés y alegría durante este largo camino, por las aventuras compartidas. Por ser mi punto de apoyo, mi equipo de aliento y, lo más importante, la familia que yo elegí. América Reyes, Emmanuel Saldivar, hoy cierro un capítulo importante de mi vida, pero abro un nuevo camino lleno de posibilidades y aprendizajes.

Ustedes han sido parte fundamental de este proceso, gracias por acompañarme cuando esta aventura inicio, por creer en mí cuando yo misma dudaba, y por alentarme a seguir adelante en los momentos más difíciles. Este logro también es de ustedes. Sin ustedes, todo esto no habría sido posible. Su amor y sacrificio han sido la luz que guio mi camino a través de este viaje académico



ÍNDICE

SIGLAS Y ACRÓNIMOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
OBJETIVOS	18
Objetivo General	18
Objetivos Específicos	18
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	19
1.1 Calidad del Agua	19
1.2 Aguas Residuales Textiles	20
1.3 Tratamientos convencionales para efluentes textiles	21
1.3.1 Coagulación- floculación	21
1.3.2 Tipos de Coagulantes	23
1.3.2.1 Coagulantes sintéticos	24
1.3.2.2 Coagulantes naturales	25
CAPITULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	29
2.1 Obtención del material coagulante natural	30
2.2 Punto de carga cero (pH-PCC)	30
2.3 Efluente del proceso de lavado de mezclilla	31
2.4 Caracterización fisicoquímica del efluente textil	31
2.4.1 Color aparente y color verdadero	32
2.4.3 Conductividad eléctrica	33
2.4.4 Demanda Química de Oxígeno	34
2.4.5 Alcalinidad	34
2.4.6 Cloruros	34
2.4.7 Dureza total	35
2.4.8 Turbidez	35
2.4.9 Sólidos Totales (ST)	36

2.4.10	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	36
2.4.11	Sólidos sedimentables	37
2.5	Determinación de la dosis óptima de coagulante	37
CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		39
CONCLUSIONES.....		47
REFERENCIAS		48
ANEXOS		52



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del fenómeno de la coagulación (Marín, 2005)	22
Figura 2. Tipos de materiales celulósicos obtenidos a partir de residuos vegetales. a) Celulosa microcristalina. b) Nanocelulosa: c) nanofibras, d) nanocristales, e) celulosa bacteriana (Ventura-Cruz & Tecante, 2021)	27
Figura 3. Diagrama de la metodología utilizada en el estudio de la aplicación de un material natural como coagulante.....	29
Figura 4. Proceso de filtración de la muestra de agua residual textil.....	33
Figura 5. Medición de turbidez en muestras tratadas después del proceso de coagulación.	35
Figura 6. Inicio de la mezcla rápida para adicionar el coagulante natural.	38
Figura 7. Coagulante natural obtenido de bagazo de agave.	39
Figura 8. Punto de cero de carga de la celulosa microcristalina utilizada como coagulante natural.	40
Figura 9. Color verdadero a 436 m^{-1} en el agua tratada evaluando el coagulante natural (CMC) a las diferentes concentraciones.....	43
Figura 10. Color verdadero a 525 m^{-1} en el agua tratada evaluando el coagulante natural (CMC) a las diferentes concentraciones.....	44
Figura 11. Color verdadero a 620 m^{-1} en el agua tratada evaluando el coagulante natural (CMC) a las diferentes concentraciones.....	45
Figura 12. Turbidez en el agua tratada evaluando el coagulante natural (CMC) a las diferentes concentraciones.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de coagulantes naturales utilizados en el tratamiento de aguas contaminadas	26
Tabla 2. Condiciones de operación de la prueba de jarras.	37
Tabla 3. Comparación de los resultados del agua cruda y lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021.	41
Tabla 4. Comparación de los resultados del agua tratada y lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021.	42

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

DQO: Demanda Química de Oxígeno

NMX: Norma Mexicana

NOM: Norma Oficial Mexicana

SST: Sólidos Suspendidos Totales

ONU: Organización Mundial de la Salud

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

CMC: Celulosa Microcristalina

PCC: Punto de carga cero

NTU: Unidad Nefelométrica

RESUMEN

Los residuos agrícolas representan una fuente para la obtención de materiales naturales que pueden ser evaluados como coagulantes naturales. Con la reciente actualización a la normatividad NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de los contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, se buscan alternativas para el tratamiento de aguas residuales y disminuir su impacto después de ser vertidas a los cuerpos de aguas naturales.

El presente trabajo evaluó un material natural obtenido a partir de los residuos de bagazo de agave como coagulante en un agua residual textil. El bagazo de agave se purificó utilizando tratamientos químicos para separar la celulosa microcristalina de su estructura.

Para evaluar este material natural se realizaron dos corridas experimentales para encontrar las mejores condiciones de operación en una prueba de jarras y determinar la dosis óptima del coagulante. Esta prueba contempló los parámetros concentración del coagulante, mezcla rápida, mezcla lenta y tiempo de sedimentación.

El agua residual de origen textil se caracterizó con los procedimientos basados en la normatividad mexicana. El agua tratada se evaluó determinando la eficiencia de remoción para los parámetros, turbidez, color verdadero y DQO.

Los resultados mostraron una eficiencia de remoción superior al 50% para estos parámetros después de la aplicación del coagulante natural celulosa microcristalina.

Palabras claves: color verdadero, coagulación, coeficientes espectrales, coagulantes naturales, celulosa microcristalina

ABSTRACT

Agricultural residues represent a source for obtaining natural materials that can be evaluated as natural coagulants. With the recent update to the NOM-001-SEMARNAT-2021 regulation, which establishes the maximum permissible limits for pollutants in wastewater discharges into national waters and property, alternatives are being sought for wastewater treatment and to reduce their impact after being discharged into natural water bodies.

The present work evaluated a natural material obtained from agave bagasse residues as a coagulant in a textile wastewater. The agave bagasse was purified using chemical treatments to separate the microcrystalline cellulose from its structure.

To evaluate this natural material, two experimental runs were carried out to find the best operating conditions in a jar test and to determine the optimum coagulant dosage. This test contemplated the parameters coagulant concentration, fast mixing, slow mixing and sedimentation time.

The textile wastewater was characterized using procedures based on Mexican standards. The treated water was evaluated by determining the removal efficiency for the parameters turbidity, true color and COD.

The results showed a removal efficiency higher than 50% for these parameters after the application of the natural coagulant microcrystalline cellulose.

Key words: true color, coagulation, spectral coefficients, natural coagulants, microcrystalline cellulose.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de agua es un tema prioritario a nivel mundial debido al agotamiento de los recursos hídricos. El aumento constante de agua potable utilizada y de aguas residuales generadas por actividades urbanas e industriales lo que ha provocado problemas ambientales y de salud. Las aguas residuales se caracterizan por su composición química compleja y alta carga de contaminantes, alteran la vida acuática y la capacidad inherente de los cuerpos de agua receptores para diluir los contaminantes (Prabhakaran et al, 2020; Koul et al, 2022).

La industria textil utiliza en sus procesos de producción una cantidad de agua importante para el procesamiento de fibras y genera aguas residuales que destacan por las elevadas concentraciones de color y sales orgánicas, lo que provoca una reducción de la transparencia y disminución del oxígeno disuelto del agua (Mishra et al, 2021). La gran mayoría de los productos químicos y tintes no se adhieren a la fibra durante el proceso de teñido y el exceso se descarga al ambiente como aguas residuales.

Las tecnologías de tratamiento convencionales han resultado eficientes para remover este tipo de compuestos, se han implementado numerosos sistemas de tratamiento como: intercambio iónico, filtración, precipitación por electrodiálisis, procesos electroquímicos, coagulación-floculación, precipitación química, flotación, ósmosis inversa, procesos de oxidación avanzada y los biorreactores de membrana, su aplicación depende de la concentración y tipo de contaminantes presentes en los efluentes (Garba, et al. 2020).

Sin embargo, la desventaja de estos procesos está relacionada con los altos costos de operación, la formación de subproductos tóxicos que requieren procesos de tratamiento adicionales, y el uso de reactivos químicos, entre otros.

En el presente trabajo se utilizó un material natural celulósico para remover color en un agua residual textil. El agua residual textil fue monitoreada de una planta de tratamiento de un taller textil dedicado a la producción de mezclilla y se determinaron parámetros fisicoquímicos para determinar la calidad del agua con los procedimientos establecidos en la normatividad mexicana.

Se determinaron las condiciones de operación idóneas con el equipo de prueba de jarras para el proceso de coagulación y la dosis óptima de coagulante. También se determinó el punto de carga cero para conocer la carga eléctrica superficial en el material natural respecto al pH y señalar el intervalo más adecuado del valor de pH para alcanzar la remoción eficiente de un determinado contaminante en este caso el color.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es una sustancia indispensable para la vida, así como para el desarrollo de actividades domésticas, industriales y agrícolas. La generación y descarga de aguas residuales, han ocasionado un impacto en el ambiente y en la salud humana.

La industria textil es una de las principales generadoras de este tipo de efluentes, estas aguas residuales contienen además de colorantes, tensoactivos y aceites minerales. Los tintes o colorantes son sustancias tóxicas, mutagénicas y cancerígenas (Garba, et al. 2020).

Uno de los tratamientos más utilizados para sanear los efluentes residuales textiles es el proceso de coagulación-floculación. La coagulación química se define como un proceso unitario usado para causar coalescencia o agregación de material suspendido no sedimentable y partículas coloidales del agua y de aguas residuales, con la intervención de un reactivo químico (coagulante) (Iwuozor et al.,2023).

Los coagulantes de mayor uso son de origen químico, generalmente sales de metales trivalentes, entre estos se puede mencionar las sales de aluminio y de hierro. Sin embargo, algunas de sus desventajas es la generación de altos volúmenes de lodos residuales tóxicos para la salud humana.

Recientemente se han estudiado distintos materiales de origen biológico como coagulantes naturales para remover colorantes y turbidez del agua en efluentes industriales, como una alternativa a los coagulantes químicos. En los últimos años los materiales naturales de celulosa han sido utilizados como material adsorbente de origen natural para remover colorantes y metales pesados presentes en aguas residuales debido a sus características de biodegradabilidad, nula toxicidad y bajo costo (Koul et al., 2022; Iwuozor et al.,2023; Tomé et al., 2023).

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la celulosa cristalina del agave como coagulante natural para el tratamiento de un agua residual textil.

Objetivos Específicos

- Obtener un material natural a partir de bagazo de agave utilizando tratamientos químicos sucesivos, para evaluar su aplicación como coagulante natural en la remoción de color en un efluente textil.
- Implementar la técnica de determinación de color verdadero mediante el método de coeficientes de absorción espectral de acuerdo a la norma mexicana PROY-NMX-AA-017-SCFI-2020.
- Determinar el color verdadero de un agua residual textil.
- Aplicar diferentes dosis del coagulante natural para evaluar su eficiencia en la calidad de un agua residual textil.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Calidad del Agua

El agua es uno de los recursos naturales fundamentales para la vida y los ecosistemas, además contribuye al bienestar socioeconómico de la sociedad, por esta razón es importante su disponibilidad y correcto saneamiento (Kalibbala et al., 2020). La Agenda 2030 para el desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) establece en su objetivo 6 la importancia de garantizar la disponibilidad de agua y su correcto saneamiento, buscando aumentar el tratamiento de aguas residuales para su posterior reutilización.

En México, la normatividad oficial para calidad del agua NOM-002-ECOL-1996 y NOM-003-ECOL-199 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) están relacionadas con la disposición y los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas. Por esta razón, se busca implementar nuevos métodos para minimizar el impacto ambiental de estos contaminantes utilizando técnicas como la adsorción con materiales provenientes de fuentes naturales.

Asimismo, el 11 de marzo de 2022, la NOM-001-SEMARNAT-1996 fue modificada después de 26 años y se publicó la NOM-001-SEMARNAT-2021, donde establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, renovando aspectos técnicos que la anterior no consideraba.

Se introduce el parámetro de color verdadero, el cual representa el color del agua debido a sustancias en forma disuelta y que se mantiene después de eliminación de los sólidos suspendidos y pseudocoloidales, utilizando para su determinación el método de coeficientes de absorción espectral.

El objetivo de la NOM-001-SEMARNAT-2021 es prevenir riesgos ambientales, disminuir los contaminantes en las descargas, inversión y actualización de las plantas de tratamiento. Esta modificación ha obligado al sector industrial a colocar su atención en el parámetro de color verdadero y como dar cumplimiento a este parámetro.

1.2 Aguas Residuales Textiles

En México, las industrias, incluyendo las textiles, descargan efluentes residuales sin un tratamiento adecuado. Las aguas residuales textiles son complejas por su composición variada, productos químicos auxiliares, metales pesados, alta alcalinidad, conductividad y salinidad), incluyen colorantes difíciles de degradar (Iwuozor et al, 2023).

Son aguas vertidas de cualquier actividad comercial o industrial, resultantes de procesos para la obtención de productos consumibles o productos manufacturados. Aquí se incluye el agua desechada por fábricas, plantas de producción energética o cualquier otra actividad industrial. Esta agua se caracteriza por contener un elevado nivel colorantes, químicos sintetizados y metales pesados (entre los que se encuentran plomo, níquel, cobre, mercurio o cadmio, entre muchos otros).

Las descargas de este tipo de aguas suelen ser muy preocupantes debido a que los vertidos en las redes de alcantarillados suelen ser continuos o periódicos, por

lo anterior resulta importante realizar un estudio particular para determinar el tratamiento adecuado que se les debe dar.

Las industrias textiles utilizan una enorme cantidad de agua para el procesamiento de fibras y en respuesta, producen aguas residuales enriquecidas con compuestos tóxicos peligrosos de sales orgánicas y compuestos de tintes orgánicos cenobíticos, anualmente en ellas se encuentra un aproximado de 280 kg de tinte perdido (Mishra et al, 2021).

Esta se caracteriza por el color que contiene, ya que es el primer signo contaminante que se observa, provocando la reducción de la transparencia y disminución del oxígeno disuelto, lo que dificulta la función fotosintética de las plantas.

1.3 Tratamientos convencionales para efluentes textiles

1.3.1 Coagulación- floculación

La coagulación es uno de los procesos unitarios convencionales que actualmente se utiliza para el tratamiento de aguas en muchas Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), la coagulación y los procesos de floculación son procesos clave en la reducción eficiente con turbiedad, sólidos en suspensión, aceites, materia orgánica, color y demanda química de oxígeno (DQO) en el agua.

El proceso de coagulación tiene como finalidad anular las cargas eléctricas de las partículas y transformar las impurezas que se encuentran disueltas, finas o coloidales que puedan ser removidas por la decantación (sedimentación) y la filtración. Los aglomerados formados se agrupan y producen flóculos (Kalibbala et al, 2020).

La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la nube de iones que rodean los coloides de modo que puedan aglomerarse (Marín, 2005).

Las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos (Figura 1).

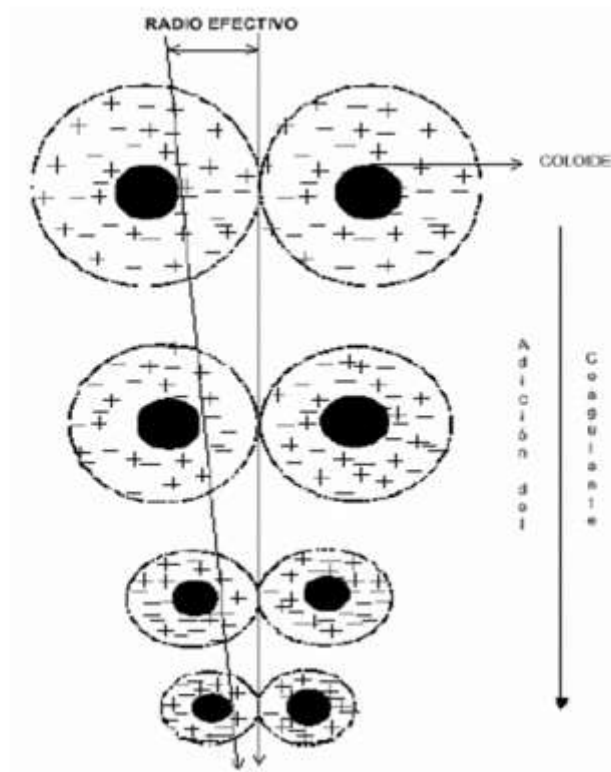


Figura 1. Esquema del fenómeno de la coagulación (Marín, 2005)

La coagulación se ha adoptado como pretratamiento antes al proceso de filtración por membrana con la intención de mitigar problemas de suciedad de la membrana.

Los principales mecanismos de coagulación se clasifican en cuatro categorías, estos explican las reacciones entre las partículas y el coagulante añadido, lo que causa la desestabilización y neutralización de las cargas iónicas de las partículas, estas dependen de la dosis del coagulante: coagulación por arrastre, puentes poliméricos, compresión de doble capa y neutralización de carga (Owodunni & Ismail, 2021).

El coagulante agregado para este proceso se debe mezclar intensamente para disolverse y distribuirse uniformemente por todo el cuerpo de agua mientras promueve el choque de las partículas. La eficiencia de este proceso depende en gran medida del tipo de coagulante utilizado, la velocidad de la mezcla y el tiempo de sedimentación.

Para el proceso de coagulación es indispensable contemplar la adquisición de reactivos químicos y generación de lodos tóxicos residuales. En el 2021 Owodunni e Ismail, demostraron en su investigación que el uso de grandes cantidades del coagulante convencional sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ produce altos niveles de aluminio residual lo que provoca Alzheimer y enfermedades incurables.

1.3.2 Tipos de Coagulantes

Los coagulantes son productos que actúan sobre el agua residual a tratar, desestabilizando tanto la materia suspendida como la materia disuelta. Existen dos tipos de coagulantes, los sintéticos y los de origen natural, Los coagulantes inorgánicos suelen ser un tipo de sal de aluminio o hierro. El sulfato de aluminio y el cloruro férrico son populares y los más utilizados.

Por otro lado, los coagulantes naturales, también conocidos como polímeros naturales, son sustancias dosificadas adecuadamente en una masa homogénea de agua que contiene partículas en suspensión (turbidez), son precursoras de generar la afinidad entre ellas, favoreciendo el crecimiento de los coágulos, (García et al., 2022). Estos eliminan totalmente el aumento de las sales y no aporta metales además de que reducen considerablemente los tiempos de coagulación mejorando la densidad del coágulo formado, aumentando así su efectividad.

1.3.2.1 Coagulantes sintéticos

Los coagulantes químicos, han sido los más utilizados en el tratamiento de aguas residuales, por su eficiencia y costo. Estos se utilizan en muchos tratamientos de agua y agua residual, por la eficiencia que tienen al eliminar la mayoría de los tipos de partículas sólidas.

En la literatura se ha encontrado que estos coagulantes sintéticos pueden ser precursores de enfermedades crónicas resultado de los residuos de metales que estos dejan en el agua, al no ser degradables estos permanecen en el agua incluso después del tratamiento, muchos estudios han demostrado sus desventajas como lo es la producción de grandes cantidades de lodo este suele ser peligroso y no biodegradable, provocan efectos considerables sobre el pH y son tóxicos para el ambiente, (Diver et al., 2023; Owodunni & Ismail, 2021).

Las industrias utilizan los coagulantes químicos para sus tratamientos de agua, usando principalmente, sulfato de aluminio (alumbre) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, policloruro de aluminio, cloruro férrico (FeCl_3), sulfato ferroso (FeSO_4) y cal, aun cuando se ha demostrado que altera el pH del agua, por lo que se requiere la adición de carbonato de sodio (Na_2CO_3) para obtener el pH deseado. otra característica de los coagulantes orgánicos es su propiedad corrosiva, el proceso de tratamiento requiere el uso de equipos resistentes a la corrosión, y los lodos resultantes de este proceso deben ser tratados y desechados con un método apropiado, (Owodunni & Ismail, 2021).

Los coagulantes sintéticos a base de aluminio dejan sal de aluminio como residuo, que es un producto neurotóxico, por lo que la exposición continua al agua puede provocar Alzheimer.

1.3.2.2 Coagulantes naturales

Los coagulantes naturales han sido utilizados a lo largo de la historia en el tratamiento de aguas residuales, destacan porque la materia prima puede obtenerse fácilmente, son económicos, no tóxicos, baja producción de lodos y son biodegradables. Estos coagulantes se obtienen de fuentes como plantas, semillas, crustáceos marinos y organismos microbianos (Tabla 1). Estos se han convertido en una alternativa segura, rentable y respetuosa con el ambiente para el tratamiento de aguas residuales.

Los coagulantes naturales pueden ser una opción para el tratamiento de aguas residuales, con ellos se pueden sustituir las sales de aluminio y férricas que se siguen utilizando como coagulantes en el tratamiento del agua. Las principales desventajas que tiene los coagulantes naturales son los bajos rendimientos de producción y los altos costos de operación, esto impide que sean aceptados en el mercado, (Prabhakaran et al., 2020; Al-Wasify et al., 2023 y Diver et al., 2023)

Ventajas de los coagulantes naturales:

- Respetuoso con el ambiente.
- El proceso de floculación es más eficiente y se reducen los costos.
- Método barato y fácil para los países en desarrollo.
- La eficiencia es independiente del pH del agua
- Disminución significativa de la turbidez.
- Mejorar el sistema de filtración.
- No altera el sabor del agua.
- Seguro para la salud humana.

- El bajo volumen de lodos precipitados es biodegradable y, por lo tanto, es ambientalmente seguro para la salud humana.
- Efecto antibiótico sobre diversas bacterias y hongos.

Tabla 1. Tipos de coagulantes naturales utilizados en el tratamiento de aguas contaminadas

Coagulante natural evaluado	Parte utilizada	Estado físico del coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
Maní	Semillas de maní	Polvo	15.0	Turbidez 75.4 a 85.0	Al-Wasify et al (2023).
Caña de azúcar	Bagazo de la caña	Polvo	90.0	Turbidez 97.3	Iwuozor et al (2023).
Quitosano		Polvo	400	SST: 98.95 Turbidez: 98.35 NH ₃ -N: 95.88 DQO: 68.31	Jagaba, et al (2020).
Moringa Olífera	Semillas	Polvo	2000	SST: 95.42 Turbidez: 88.30 Color: 90.15 NH ₃ -N: 89.81 Aceite y grasas 87.05	Jagaba, et al (2020).
Cáscaras de cactus y plátano.	Cáscaras	Polvo	100	Turbidez, TSS y E. coli osciló entre 62 y 87	Kalibbala et al (2020).
Moringa oleífera	Semilla	Polvo	100	Turbidez 94- 99	Kenea et al (2020).
Quitina	-----	Polvo	100	Turbidez 78.72	Saritha et al (2019).

Los residuos agrícolas son restos de cultivos de origen leñosos o herbáceos, son materiales lignocelulósicos que están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Además, se generan en grandes cantidades y son uno de los recursos renovables más abundantes del mundo. Estos materiales de desecho tienen poco o ningún valor económico y a menudo su eliminación es un problema (Adegoke et al. 2015). En la actualidad, se pueden obtener gran variedad de derivados de celulosa con importancia industrial como nanofibras de celulosa, nanocristales de celulosa y celulosa microcristalina (CMC) (Abdolali et al. 2014; Ng et al., 2015 Trache et al., 2016).

La celulosa microcristalina (CMC) es un polvo fino de color blanco que se purifica a partir de la celulosa, y que contiene dominios cristalinos y amorfos (Figura 2). Para la producción de CMC a nivel industrial se utilizan fibras de madera y algodón como materias primas, sin embargo, también se puede obtener de residuos agrícolas y agroindustriales (Garba et al. 2020).

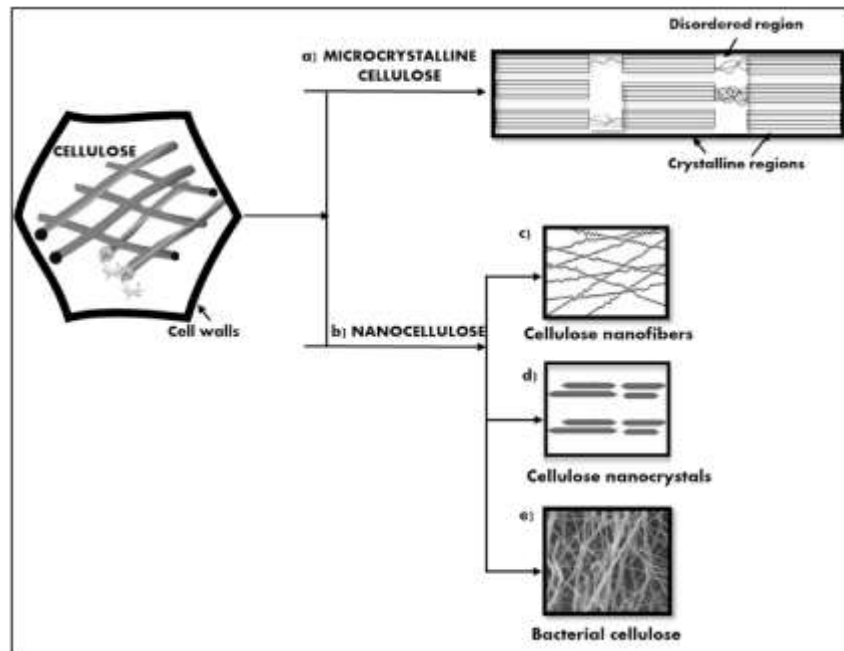


Figura 2. Tipos de materiales celulósicos obtenidos a partir de residuos vegetales.

a) Celulosa microcristalina. b) Nanocelulosa: c) nanofibras, d) nanocristales, e) celulosa bacteriana (Ventura-Cruz & Tecante, 2021)

En los últimos años la celulosa microcristalina ha sido utilizada como material adsorbente de origen natural para remover colorantes y metales pesados presentes en aguas residuales debido a sus características de biodegradabilidad, nula toxicidad y bajo costo.

Hussin et al. (2016), estudiaron la remoción de azul de metileno en disoluciones acuosas utilizando celulosa microcristalina porosa aislada de hojas de palma aceitera (CMC-PA). La CMC-PA exhibió una mayor área de superficie BET (5.64 m²/g) comparado con la celulosa purificada (2.04 m²/g), los experimentos de adsorción mostraron que la CMC-PA tiene una capacidad de adsorción en monocapa de 51.811 mg/g.

Tan et al. (2018), realizaron la inmovilización de CMC-PA en una placa de vidrio y la utilizaron como adsorbente de azul de metileno. La inmovilización tuvo como objetivo reducir la etapa de filtración posterior al tratamiento. Además, demostraron que la capacidad de adsorción de la CMC-PA inmovilizada depende de condiciones de operación como el pH, la concentración inicial del colorante, la carga, la dosificación, el espesor del adsorbente inmovilizado y el tiempo de contacto.

Tan et al. (2016) estudiaron y determinaron el mecanismo de adsorción entre el colorante azul de metileno y la celulosa microcristalina comercial (Avicel PH-102, FMC BioPolymer, USA). Ellos encontraron que la atracción electrostática entre el colorante cargado positivamente y la superficie de la CMCR cargada negativamente es el principal mecanismo de adsorción, por lo tanto, la adsorción física es el tipo de adsorción dominante.

CAPITULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Figura 3 se muestran las etapas utilizadas para llevar a cabo este proyecto, que contempla desde el acondicionamiento del material natural que se evaluó como coagulante hasta su aplicación en un agua residual de origen textil.

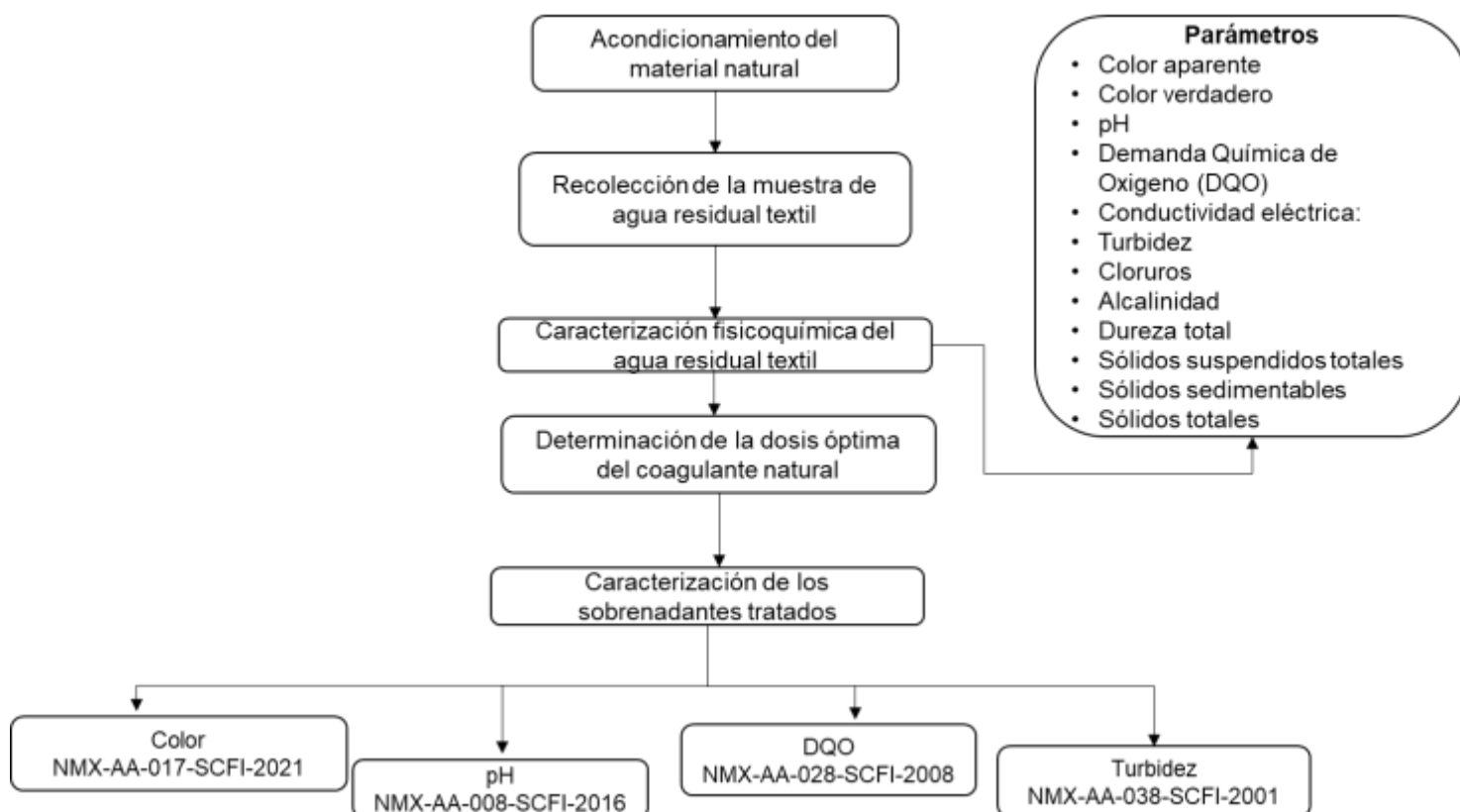


Figura 3. Diagrama de la metodología utilizada en el estudio de la aplicación de un material natural como coagulante.

2.1 Obtención del material coagulante natural

El material natural se obtuvo del proceso para la obtención de nanofibras de celulosa a partir del bagazo de agave mezcalero (Carrillo-Jiménez, 2022). El bagazo de agave se lavó con agua a presión y después se colocó en una superficie plana para secar a temperatura ambiente durante 13 hrs continuas. El material seco se trituró en una licuadora de uso doméstico (marca Oster), en seguida se tamizó con un tamiz con tamaño de partícula de 150 μm y se almacenó en bolsas de plástico herméticas.

El bagazo de agave acondicionado se sometió a una serie de tratamientos químicos sucesivos con mezclas de hidróxido de sodio (NaOH) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), además de una hidrólisis ácida con ácido sulfúrico (H_2SO_4). El material natural representa la parte sólida después del proceso de hidrólisis ácida, este material sólido se ultracongeló (REVCO ULT390, Legaci, EE. UU.) durante 24 hrs. Finalmente, después de ultracongelar las muestras se colocaron en una liofilizadora durante 36-48 hrs. El material después de la liofilización se tamizó para obtener un tamaño de partícula de 150 μm y es el que se usó como coagulante natural en este trabajo.

2.2 Punto de carga cero (pH-PCC)

Se determinó el punto de carga cero (pH-PCC) para conocer la carga eléctrica superficial en el material natural respecto al pH, se realizaron experimentos en solución acuosa variando el pH inicial (pH_{in}) entre 3 y 10 (ajustándolo con soluciones 0.1 M de HNO_3 o NaOH). Se pesaron muestras de 0.5 g de material natural y fueron colocadas en frascos con 20 mL de solución de NaNO_3 0.1 M, manteniéndose en agitación constante durante 24 hrs a una temperatura de 25°C, después se midió el pH final o de equilibrio (pH_{eq}) de la solución.

Finalmente se graficó pH_{ini} vs ΔpH ($pH_{ini}-pH_{eq}$), donde el pH-PCC correspondió a la intersección de la curva y el eje de las abscisas (Hernández et al., 2013).

2.3 Efluente del proceso de lavado de mezclilla

Se realizó un muestreo del efluente de una Planta de Tratamiento (PTAR) de un taller textil dedicado a la fabricación de mezclilla ubicado en Almoloya del Río municipio perteneciente a Santa Cruz Atizapán en el Estado de México, siguiendo el procedimiento descrito en la NOM-001-SEMARNAT-2021 apartado siete, donde se establecen los procedimientos sanitarios para el muestreo de agua. Se colectaron dos muestras de agua residual cruda en garrafones de polipropileno oscuros de 20 litros.

Las muestras se trasladaron al Laboratorio de Calidad del Agua del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), para su almacenamiento en condiciones de refrigeración durante 24 horas. Después de ese tiempo un garrafón de 20 litros se retiró del refrigerador y se dejó a temperatura ambiente hasta alcanzar una temperatura de 20 °C. El pH de la muestra se midió utilizando un potenciómetro (HANNA, Modelo HI9126).

2.4 Caracterización fisicoquímica del efluente textil

Para la caracterización de la muestra se determinaron los parámetros marcados en los diferentes procedimientos de normas mexicanas, que tienen por objetivo cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes basados en la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Para llevar a cabo la caracterización del efluente textil, se prepararon diluciones a tres diferentes concentraciones, 3/10, 5/10 y 7/10, debido a que la apariencia de la muestra presentaba color intenso y una importante cantidad de partículas disueltas.

2.4.1 Color aparente y color verdadero

El color aparente se midió con lo establecido en la norma NOM-AA-45-1981, las muestras se colocaron en tubos Nessler y se llevaron al espectrofotómetro marca HACH y modelo DR 6000, con el cual se registró el valor de color en unidades de Platino-Cobalto (PtCo).

Para medir el color verdadero se utilizó el método de coeficientes de absorción espectral establecido en la norma NMX-AA-017-SCFI-2021, las muestras se filtraron con un equipo de filtración y filtros de membrana de 0.45 μm , posteriormente se almacenaron en frascos ámbar de cristal (Figura 4). La muestra se depositó en celdas de cristal de 10 mm y se midieron a las longitudes de onda de 436, 525 y 620 nm, respectivamente en un espectrofotómetro marca HACH y modelo DR 6000. Se utilizó agua destilada filtrada (tamaño de poro 0.2 μm) como blanco.



Figura 4. Proceso de filtración de la muestra de agua residual textil.

2.4.2 pH

La medición de pH en las muestras se realizó con el método establecido en la norma NMX-AA-008-SCFI-2016, en un intervalo de pH de 0 a 14 y en un intervalo de temperatura de 0 a 50 °C, para esto se tomaron muestras a temperatura ambiente y con ayuda del potenciómetro (HANNA, modelo HI9126) se tomaron las lecturas de pH por triplicado.

2.4.3 Conductividad eléctrica

Se tomaron muestras del agua residual textil y se colocaron en vasos de precipitado de 250 mL, posteriormente se realizaron las lecturas con ayuda de un conductímetro (Thermo scientific, modelo, Oriion START A 212, Estados Unidos), se realizaron las lecturas por triplicado.

2.4.4 Demanda Química de Oxígeno

Para determinar la Demanda Química de Oxígeno se utilizó el método descrito en la norma NMX-AA-028-SCFI-2008. Se agregaron 2 mL de muestra de efluente textil en viales de digestión para DQO de alto rango (20-1500 mg/L, HACH). Posteriormente se colocaron en un digestor (HACH, modelo DRB-200, North America) durante 2 horas a una temperatura de 150°C, cada 30 min se agitaron los viales de digestión hasta disolver el reactivo. Al terminar el tiempo de reacción los viales se retiraron del digestor y se colocaron en una gradilla hasta alcanzar temperatura ambiente, para su posterior lectura en el espectrofotómetro (HACH, modelo DR 600).

2.4.5 Alcalinidad

Para la determinación de la alcalinidad en el agua se utilizó el método de la NMX-AA-036-SCFI-2001, para esto se colocaron 25 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer y se le adicionaron dos gotas de fenolftaleína, seguido de dos gotas de naranja de metilo dando un tono amarillo, después de esto la muestra se tituló con ácido sulfúrico (H_2SO_4) finalizando a un tono canela, hasta llegar al vire, esto se realizó por triplicado y fueron registrados los datos en la bitácora.

2.4.6 Cloruros

La cantidad de cloruros presentes en la muestra de agua residual textil se determinó con el método descrito en la norma NMX-AA-073-SCFI-2001, por medio de una valoración con nitrato de plata ($AgNO_3$) utilizando como indicador cromato de potasio (K_2CrO_4). Se agregaron 100 mL de muestra de agua residual textil en un matraz Erlenmeyer, posteriormente se le adiciono 1 mL de disolución indicadora de cromato de potasio y se tituló con nitrato de plata hasta el vire de amarillo a naranja rojizo, esta prueba se hizo por triplicado.

2.4.7 Dureza total

Para este parámetro se utilizó la norma NMX-AA-072-SCFI-2001 se tomaron tres muestras de 50 mL en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se le adicionó 1 mL de solución amortiguadora para alcanzar un pH de 10, se añadieron 0.2 g del indicador morado a cada muestra, estas presentaron un color morado, posteriormente, se titularon con disolución de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) 0.0152 M, se agitó constantemente hasta desaparecer el tono morado, al final de la titulación la muestra cambio a un tono azul, esta prueba se realizó por triplicado.

2.4.8 Turbidez

Se tomó muestra del agua residual textil en un vaso de precipitado de 250 mL, se homogenizo la muestra y con ayuda de un turbidímetro (SCIENTIFIC, INC, modelo Micro 100, Turbidimeter), se tomaron las lecturas por triplicado de las muestras (Figura 5). Se repitió este mismo procedimiento con el sobrenadante del agua después de adicionar el coagulante.



Figura 5. Medición de turbidez en muestras tratadas después del proceso de coagulación.

2.4.9 Sólidos Totales (ST)

Se determinaron con el procedimiento descrito en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015, para la concentración de todos los minerales, sales, cloruros, metales, orgánicos y otros contaminantes disueltos en el agua residual textil, esta medición se llevó a cabo al poner a peso constante las capsulas de porcelana a 550°C y posterior a esto se midió 25 ml de muestra y se colocó en la estufa durante 3 hrs a 105 °C o a sequedad. Posteriormente se enfrían en desecador a temperatura ambiente y se registró el peso de la capsula. Se determinó gravimétricamente la cantidad de sólidos totales en las muestras.

2.4.10 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Para la determinación de sólidos suspendidos totales, se utilizó el procedimiento de la norma NMX-AA-034-SCFI-2001, se prepararon crisoles de porcelana de la siguiente manera se les colocó un filtro de fibra de vidrio marca Whatman, con poro de 1.5 μm y diámetro de 24 mm, con la cara rugosa hacia arriba, se mojó el filtro con agua para asegurar que se adhiriera perfectamente con ayuda del equipo de filtración tipo Kitasato. Se llevaron a peso constante los crisoles y se adicionaron 5 mL de la muestra y posteriormente se colocaron en la estufa durante 1 hr a 105 °C. Se pesaron y posteriormente y se adicionaron, después de esto se llevaron nuevamente al horno y se repitió el ciclo horno-desecador, se pesaron y se hicieron los cálculos correspondientes para obtener el resultado. Posteriormente se enfrían en desecador a temperatura ambiente y se registró el peso del crisol, posteriormente por diferencia de pesos se determina gravimétricamente la cantidad de sólidos suspendidos totales en las muestras.

2.4.11 Sólidos sedimentables

Para este se utilizaron conos Imhoff y se añadió 1 L de muestra, se dejaron sedimentar durante 45 min, durante este tiempo con un agitador se desprendían los sólidos adheridos a las paredes, después de esto se mantuvo en reposo durante 15 min más para completar 1 hr y se registró la lectura en mL/L, esta prueba se hizo por triplicado.

2.5 Determinación de la dosis óptima de coagulante

Para determinar la dosis óptima del coagulante se llevó a cabo un proceso de coagulación-floculación en un equipo de prueba de jarras con agitador múltiple (SEV-Vidrio Científico, modelo AM-6, México). En cada corrida se utilizaron 500 mL de muestra de efluente textil en vasos de precipitados de 1 L de capacidad, bajo condiciones controladas (Tabla 2). El coagulante natural se incorporó directamente a las muestras de efluente textil durante la mezcla rápida de la prueba (Figura 4).

Tabla 2. Condiciones de operación de la prueba de jarras.

Concentración*	Mezcla rápida	Mezcla lenta	Sedimentación
(mg /L)	100 rpm, 1 min	60 rpm, 25 min	30 min
pH 7-7.5			
50	✓	✓	✓
100	✓	✓	✓
150	✓	✓	✓
250	✓	✓	✓
500	✓	✓	✓
1000	✓	✓	✓

*Número de repeticiones=3

Transcurridos los 30 min de sedimentación se procedió a colectar 50 mL del sobrenadante con ayuda de un vaso de precipitado y una pipeta volumétrica. Posteriormente se midieron y determinaron los parámetros de pH, turbidez, color aparente y verdadero, DQO, y sólidos totales, para cada una de las muestras obtenidas.



Figura 6. Inicio de la mezcla rápida para adicionar el coagulante natural.

Es importante precisar que se realizaron dos corridas experimentales, las que se presentan en la Tabla 2 y otras que no forman parte de este trabajo porque son resultados susceptibles para su publicación en un artículo científico. Sin embargo, los resultados de los parámetros de color verdadero y turbidez de esta segunda corrida si se presentan en las Figuras 9, 10, 11 y 12 para compararlos con los presentados en la Tabla 2.

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 7 se observa la celulosa microcristalina obtenida del bagazo de agave y que se aplicó como coagulante natural. Después del tratamiento químico realizado la CMC de bagazo de agave adquiere un tono blanco debido a la remoción de lignina y algunas hemicelulosas, en comparación al color café del bagazo que fue el material de partida para obtener la CMC.



Figura 7. Coagulante natural obtenido de bagazo de agave.

La Figura 8 muestra un valor de pH de 5 para el punto de carga cero (pH-PCC) del coagulante natural. Esto implica que a este pH la carga neta de la superficie es cero. El pH-PCC es de gran importancia para el estudio de superficies sólidas, porque describe la habilidad del material para remover los contaminantes, es un parámetro que indica la carga de la superficie de los materiales que prevalece a diferentes valores de pH en la solución (Kamari & Ngah, 2009).

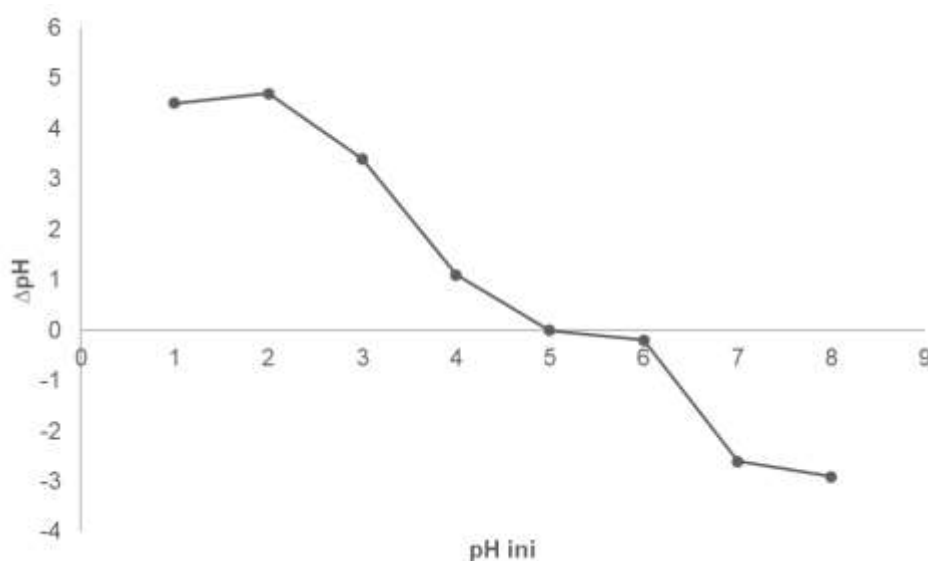


Figura 8. Punto de cero de carga de la celulosa microcristalina utilizada como coagulante natural.

Un material con un PCC de 5 significa que, a un pH de 5, la superficie del material tiene una carga neta cero. Por lo tanto, a $\text{pH} < 5$ la superficie del material estará cargada positivamente (protonada). En este rango, la superficie atraerá aniones y repelerá cationes.

El azul índigo es un colorante aniónico (Castillo Suárez et al., 2023), por lo que la remoción podría mejorar en muestras con valores menores a 5. A un $\text{pH}=5$ la superficie no tendrá carga neta. Este es el punto donde la atracción y repulsión de iones se neutralizan. A un $\text{pH} > 5$ la superficie del material estará cargada negativamente.

En la Tabla 3, se muestra una comparación de los resultados obtenidos durante la caracterización del agua residual textil vs con los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En la literatura se ha encontrado que las muestras de agua cruda utilizadas en la evaluación de coagulantes naturales son aguas residuales sintéticas, soluciones de azul de metileno y aguas sintéticas lácteas, así como aguas residuales de origen doméstico y superficial (Ponce et al., 2021; Tomé et al., 2021; Benalia et al., 2024).

Tabla 3. Comparación de los resultados del agua cruda y lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Parámetro	Límites de la NOM-001-SEMARNAT 2021	Caracterización del agua cruda	Cumple/No cumple
Color aparente (Pt-Co)	N/A	530.2	N/A
Color verdadero			
Color 436 nm (m^{-1})	7.0	1087.8	No
Color 525 nm (m^{-1})	5.0	970.6	No
Color 620 nm (m^{-1})	3.0	899.0	No
pH	6-9	6.81	Si
Turbidez (UNT)	N/A	183.3	N/A
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	210	1413.3	NO
Conductividad eléctrica ($\mu S/cm$)	N/A	844.1	N/A
Alcalinidad (mg/L $CaCO_3$)	N/A	95.0	N/A
Cloruros (mg/L)	N/A	3242.5	N/A
Dureza total (mg/L)	N/A	53.4	N/A
Sólidos disueltos totales (mg/L)	N/A	923.5	N/A
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	84	157.7	NO
Sólidos Sedimentables (mL/L)	N/A	6.2	N/A

Como se muestra en la Tabla 3 los valores de los parámetros color verdadero y DQO se encuentra en rangos muy superiores establecidos en la norma considerando que es un efluente de una Planta de Tratamiento, lo que indicaría que se requiere tratamientos adicionales si esta agua se descargará en cuerpos de agua superficiales.

En la Tabla 4 se muestran la comparación entre lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 vs el agua tratada con la dosis óptima del coagulante natural que fue de 0.5 g/ 500 mL. Como se observa en la Tabla 4 ,después del tratamiento con el coagulante natural, el agua tratada se encuentra fuera de los rangos establecidos en la norma, sin embargo, con respecto al agua residual textil las eficiencias de remoción en los parámetros fueron hasta del 50 %.

Tabla 4. Comparación de los resultados del agua tratada y lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Parámetro	Límites de la Nom- 001-SEMARNAT 2021	Agua tratada	Cumple/No cumple
Color (Pt-Co)	N/A	242.8 ± 2.16	N/A
Color verdadero			
Color 436 nm (m ⁻¹)	7.0	68.24 ± 0.15	NO
Color 525 nm (m ⁻¹)	5.0	59.68 ± 0.26	NO
Color 620 nm (m ⁻¹)	3.0	53.98 ± 0.27	NO
pH	6-9	6.81 ± 0.01	SI
Turbidez (UNT)	N/A	65.3 ± 0.21	N/A
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	210	544 ± 2.08	NO

Los parámetros de DQO y turbidez presentaron una eficiencia de remoción del 61.5 y 64.3 %, respectivamente. La cáscara de cacahuete fue evaluada como coagulante natural en un agua láctea sintética, la dosis óptima de este material fue de 0.05 g/L y la eficiencia de remoción para DQO y turbidez fueron del 98 y 92%, respectivamente, el valor de estos parámetros en el agua residual de partida fue de 410 mg/L de DQO y 120 UNT, respectivamente (Tomé et al., 2023).

En otro estudio las semillas de cacahuete en polvo se evaluaron como coagulante natural para el tratamiento de agua superficial de un río. Las semillas lograron eliminar entre el 75 y 85% de turbidez y el 42 al 53% de DQO, el valor para ambos parámetros en el agua residual cruda fue de 23-52 UNT para turbidez y 48-154 mg/L para DQO (Al-Wasify et al., 2023).

En las Figuras 9, 10 y 11 se muestran los resultados de la medición de color verdadero en el agua tratada a las diferentes longitudes de onda que se especifican en la norma NOM-001-SEMARNAT-2021.

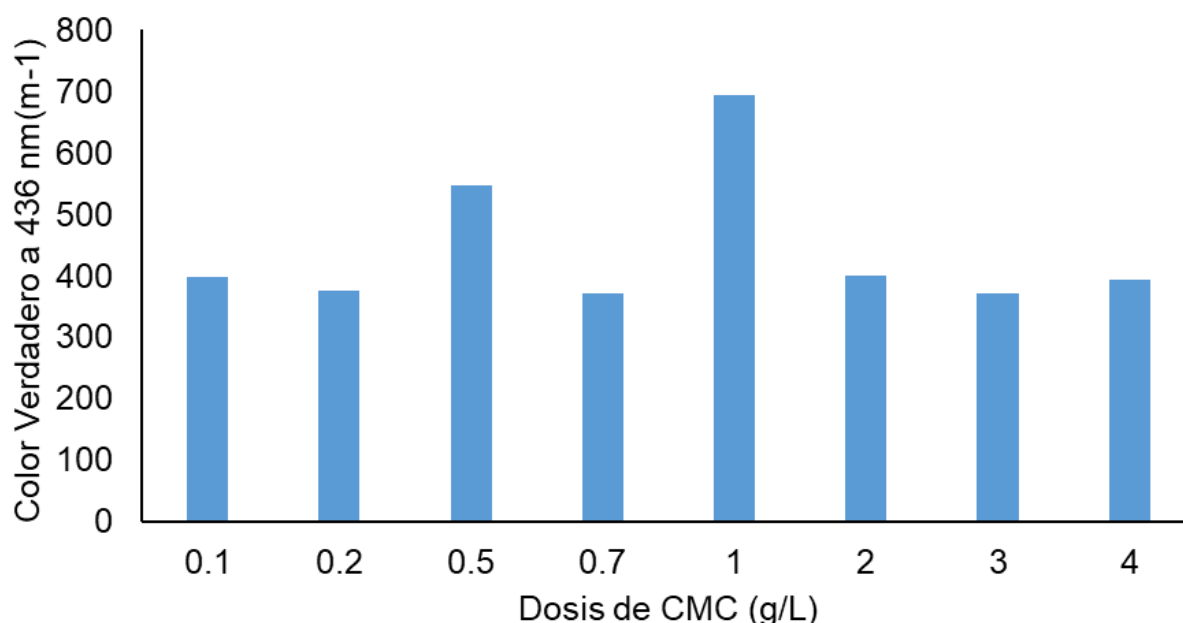


Figura 9. Color verdadero a 436 m⁻¹ en el agua tratada evaluando el coagulante natural (CMC) a las diferentes concentraciones.

Para la longitud de onda de 436 nm la eficiencia de remoción fue del 93%, mientras que, para las longitudes de 525 y 620 nm, fueron del 94%, respectivamente. El método para la medición de color verdadero en el agua residual tratada se realizó calculando los coeficientes de absorción espectral como lo menciona la norma, esto debido a que los diferentes colores presentes en las aguas residuales absorben a diferentes longitudes de onda, esta determinación en la norma anterior de 1996 quedaba limitada por el método utilizado.

Para la dosis óptima de coagulante (Tabla 4) se muestran que los coeficientes de absorción espectral obtenidos para el agua residual tratada para las longitudes de onda de 436, 525 y 620 nm fueron de 68, 60 y 54 m^{-1} , respectivamente.

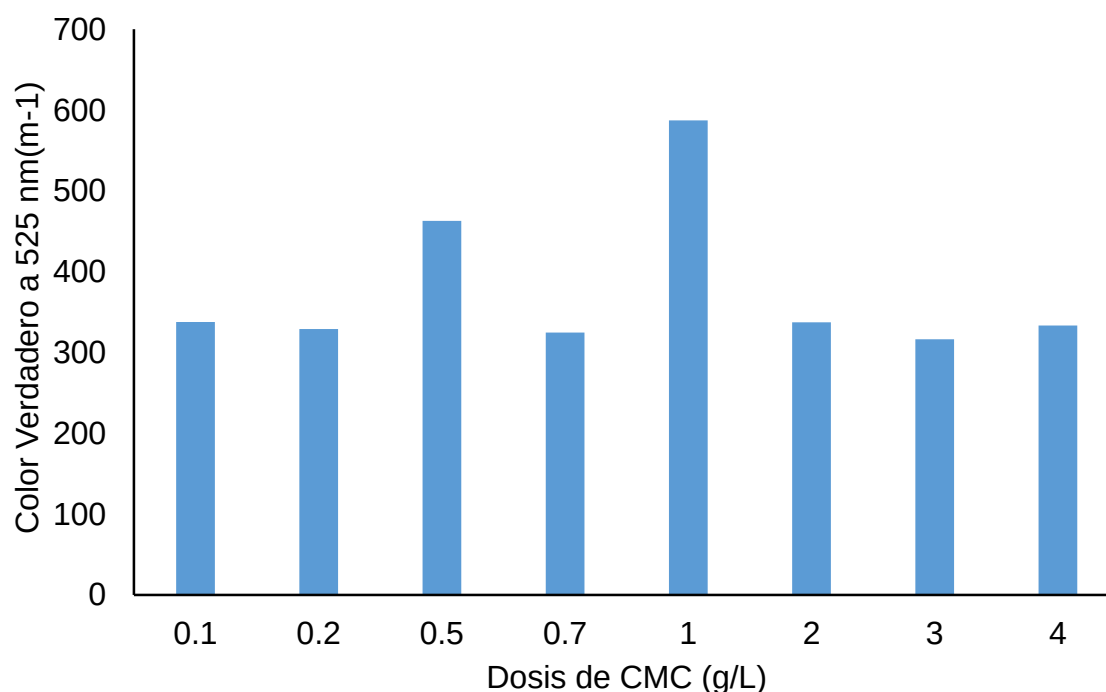


Figura 10. Color verdadero a 525 m^{-1} en el agua tratada evaluando el coagulante natural (CMC) a las diferentes concentraciones.

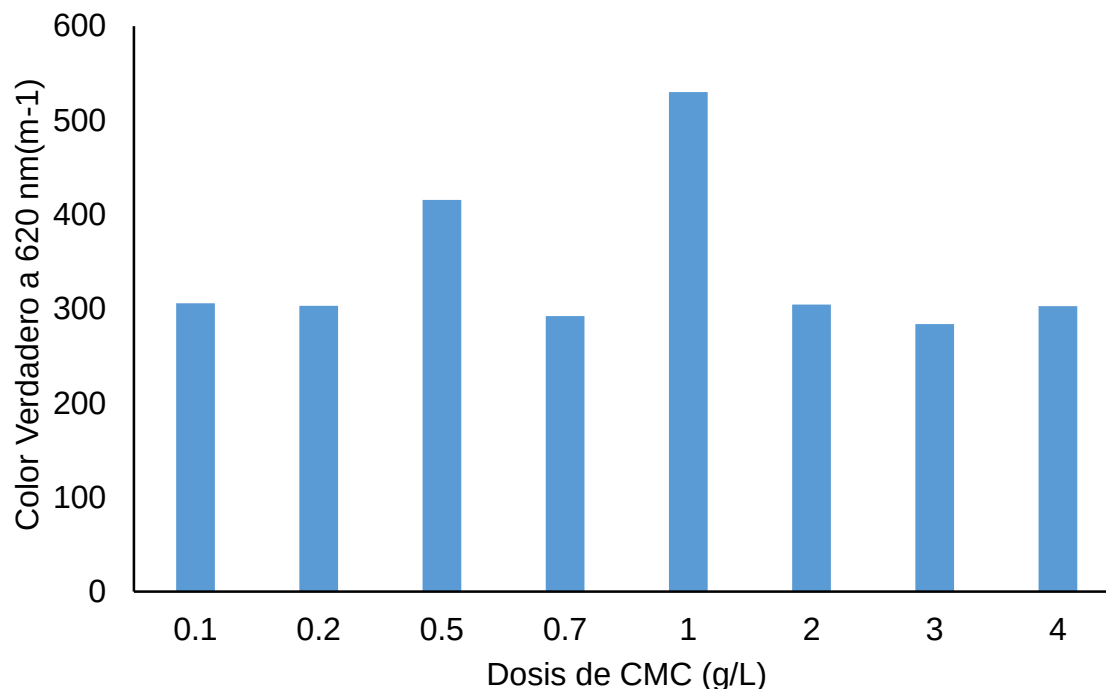


Figura 11. Color verdadero a 620 m⁻¹ en el agua tratada evaluando el coagulante natural (CMC) a las diferentes concentraciones.

Estos coeficientes espectrales son superiores a los límites permisibles establecidos en la norma, sin embargo, son congruentes con la composición compleja del agua estudiada, que incluso después de pasar por un tren de tratamiento sigue presentando concentraciones elevadas de todos los parámetros.

En la Figura 12 se presente los resultados del parámetro de turbidez en el agua tratada con el coagulante natural. El valor promedio de la remoción de turbidez en ambas corridas fue alrededor del 60%.

Saritha et al (2019), aplicaron sagú como coagulante natural en agua superficial, determinaron que la dosis óptima del sagú fue de 0.3 g/L de material y su eficiencia de remoción para la turbidez fue del 78%, en comparación con el coagulante natural utilizado en este trabajo estos valores son superiores, pero la naturaleza del coagulante y el tipo de agua (industrial textil) que se utilizó es diferente al de estos autores.

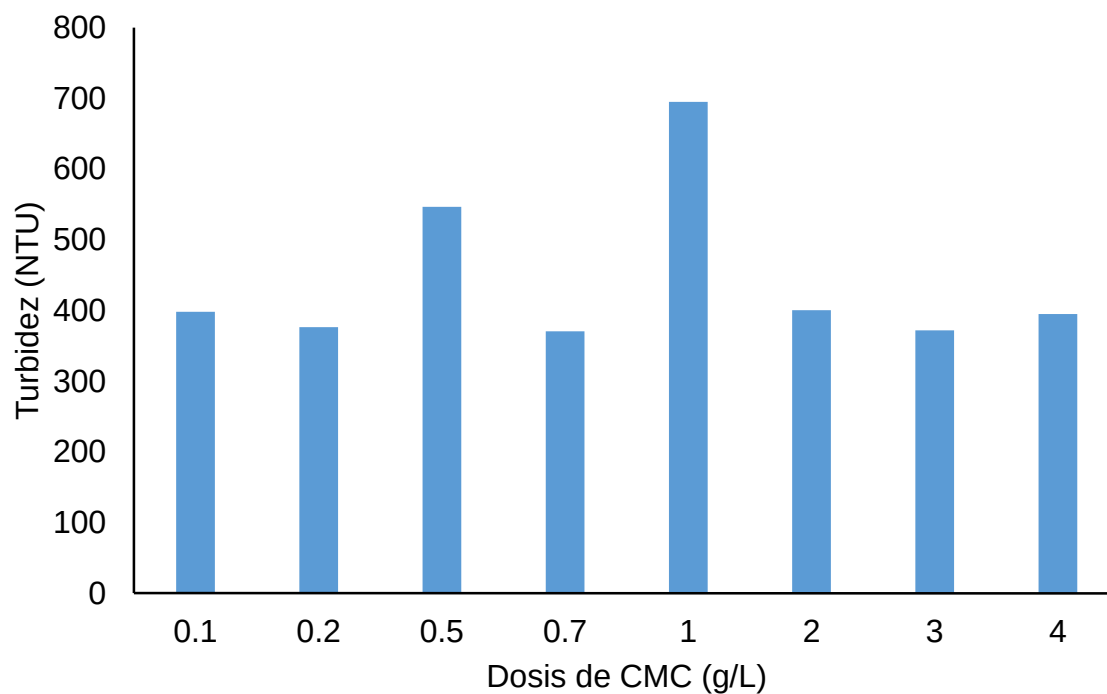


Figura 12. Turbidez en el agua tratada evaluando el coagulante natural (CMC) a las diferentes concentraciones.

CONCLUSIONES

El coagulante natural celulosa microcristalina resulto ser prometedor para ser utilizado como coagulante natural en el tratamiento de un agua residual de origen textil.

La dosis óptima del coagulante natural fue de 0.5 g / 500 mL y las condiciones de operación para la prueba de jarras fueron de 100 rpm durante 1 min para la mezcla rápida, 60 rpm durante 25 min en la mezcla lenta y 30 minutos de sedimentación.

El coagulante natural resulto eficiente para remover DQO y turbidez, lo valores obtenidos del mejor tratamiento con la dosis óptima fueron de 61.5 y 64.3 %, respectivamente.

Los coeficientes espectrales calculados para el agua tratada son superiores a los limites permisibles establecidos en la norma, sin embargo, son congruentes con la composición compleja del agua estudiada, que incluso después de pasar por un tren de tratamiento sigue presentando concentraciones elevadas de todos los parámetros

Se implemento la metodología de color verdadero especificada en la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 para la aplicación en el agua residual textil antes y después de su tratamiento.

El valor promedio de la remoción de turbidez en ambas corridas fue alrededor del 60%.

REFERENCIAS

Abdolali, A., Guo, W.S., Ngo, H.H., Chen, S.S., Nguyen, N.C., & Tung, K.L. (2014). Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water and wastewater treatment: A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 57-66.

Adegoke K.A., & Bello O.S. (2015). Dye sequestration using agricultural wastes as adsorbents. *Water Resources and Industry*, 12, 8-24.

Al-Wasify R., Hamed S. Y Ragab S. (2023). Assessing the potential of de-oiled peanut (*Arachis hipogea*) sedes for Surface waer treatment: A sustainable alternative to chemical coagulants. *Egyptian Jornal of Aquatic Research*.

Ang W. Y Mohammad A. (2020). State of the art and sustainability of natural coagulants in wáter and wastewater treatmen. *Journal of Cleaner Production*. 262,121267

Carrillo-Jiménez, A.N. (2022). Obtención y caracterización de nanofibras de celulosa de bagazo de agave. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Ambiental. Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco.

Castillo-Suárez, L.A., Sierra-Sánchez, A.G., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., Teutli-Sequeira, E.A. (2023). A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 27, 1-38.

Gallego D. Y Rodriguez D. (2019), Evaluation of chitosan as a natural coagulant, vol. XXI, núm. 1

Garba, Z., Lawan, I., Zhou W., Zhang M., Wang L. Y Yuan Z. (2020). Microcrystalline cellulose (MCC) basesd materialss as emerging adsorbed for the removal of dyes and heavy metals. *Science of the total Enviroment*, 717,135070

García B., Arnal J. Y Sancho M. (2022), Uso de coagulantes naturales: análisis del potencial en el tratamiento del agua potable para países desarrollados, ISIRYM.

Hernández, H.K.A, Solache, R.M, Díaz, N.M.C. (2013) Removal of brilliant blue FCF from aqueous solutions using an unmodified and iron modified bentonite and the thermodynamic parameters of the process, *Water, Air & Soil Pollution* , 224:1562–1573.

Iwuozor, K., Adeniyi A., Emenike, E. Ojeyemi T., Egbemhenghe A., Okorie C., Ayoku, B. Y Saliu O. (2023). Prospects and challenges of utilizing sugarcane bagasse as a bio-coagulant precursor for water treatment. *Biotechnology Reports*. 39, 00805

Kalibbala, H., Olupot P. Y Ambani O. (2023). Synthesis and efficacy of cactusbanana peels composite as a natural coagulant for water treatment. *Results in Engineering*. 17, 100 945.

Kamari, A. & Ngah, W. W. (2009). Isotherm, kinetic and thermodynamic studies of lead and copper uptake by H₂SO₄ modified chitosan. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 73(2), 257-266.

Kenea D., Denekew T., Bulti, R., Olani, B., Temesgen D., Sefiw D., Beyene, D., Ebba M. Y Mekonin W. (2023). Investigation on Surface water treatment using blended moringa oleífera seed and aloe vera plants as natural coagulants. *South African Journal Of Chemical Engineering*. 45, 294,304

Kingsley O. Iwuozora B., Adewale George Adeniyi D, Ebuka C., Emenikeb T., Ojeyemimi,i, Abel U. EgbemhengheF,j, Chika J.Okorieb J., Bridget D., Ayokugramo K., Oluwaseyi Y Damilare S. (2023), Prospects and challenges of utilizing sugarcane bagasse as a bio-coagulant precursor for water treatment

Marín, A. J. (2005). Remoción de materia orgánica por coagulación- floculación. Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 28-55.

Martinez D., Chavez M., Altamira D., Chacin E. y Nola F, (2003), performance of cactus lefaria to use like coagulating in the water clarification, *SciELO*. 26,1.

Nayeri, D. Y Mousavi S. (2022). A comprehensive review on the coagulants recovery and reuse from drinking water treatment sludge. *Journal Of Environmental Management*. 319, 115649

Ng, H.H., Sin, L.T., Tee, T.T., Bee, S.T., Hui, D., Low, C.Y., & A.R. Rahmat. (2015). Extraction of cellulose nanocrystals from plant sources for application as reinforcing agent in polymers. *Composites Part B*, 75, 176-200.

Okoro, B., Sharifi, S., Jesson, M. Y Bridgeman J. (2021). Natural organic matter (NOM) and turbidity removal by plant-based coagulants. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*. 9,106-588

Owodunni A. Y Ismail S. (2021). Revolutionary technique for sustainable plant-based Green coagulants in industrial wastewater treatment. *Journal of Water Process Production*. 42, 102096

Patel, H. y Vashi, R. (2013) Comparación de coagulantes preparados naturalmente para la eliminación de bacalao y color de aguas residuales textiles.,15, 522–528.

Pech C. (2018), Obtención y Modificación de Nanocristales de Celulosa de Residuos de Agave, Yucatan Mexico, CICY.

Quirós N., Vargas M. Y Jimenez J. (2010), “desarrollo de coagulantes y floculantes para la remoción del color en aguas de consumo humano; el río humo, reserva forestal río macho”, CIPA.

Ramalho A. (2021), Tratamiento de aguas residuales, Madrid, CIEM.

Ramos-Pacheco S., Choque-Quispe I. y Solano-Reynoso B. (2018), Capacity flocculant of natural coagulants in water treatment, Vol 38 no. 2, Peru

Rojas R. (2002), Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, División de Salud, Organización Panamericana de la Salud Organización Mundial de la Salud.

Saritha, V., Karnena M.K., & Dwarapureddi B.K. (2019). Exploring natural coagulants as impending alternatives towards sustainable water clarification—A comparative studies of natural coagulants with alum. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100982.

Shamsnejati, S., Chaibakhsh, N., Pendashteh, A., Y Hayeripour, S. (2015). Mucilaginous seed of *Ocimum basilicum* as a natural coagulant for textile wastewater treatment.

Tan, C.H.C., Sabar, S., & Hussin, M.H. (2018a). Development of immobilized microcrystalline cellulose as an effective adsorbent for methylene blue dye removal. *South African Journal of Chemical Engineering*, 26, 11-24.

Tan, K.B., Abdullah, A.Z., Horri, B.A., Salamatinia, B. (2016). Adsorption mechanism of microcrystalline cellulose as green adsorbent for the removal of cationic methylene blue dye. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 38, 651-664.

Tomé, A.G., Ribeiro E.A.M., Lima, M., Brocenschi, R.F., Ribeiro, L.N.M & Amaral, F.A. (2023). Biorefinery of peanut shell agroindustrial lignocellulosic waste for synthesis of a natural coagulant applied in the treatment of dairy wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11, 11535.

Trache, D., Hussin, M.H., Chuin, C.T.H., Sabar, S., Fazita, M.R.N., Taiwo, O.F.A., Hassan, T.M., & Mohamad Haafiz, M.K. (2016). Microcrystalline cellulose: Isolation, characterization and biocomposites application-A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 93, 789-804.

ANEXOS

La presente investigación fue reconocida con el tercer lugar a nivel nacional en el concurso de INNODRP 2023 con el nombre de “**CELLUSAN**”. Actualmente se encuentra en un proceso de incubación empresarial en el Centro de Incubación e Innovación Empresarial del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco.



INNO DROP
INCUBADORA DE TALENTO HÍDRICO

Ganadores 2023



Tercer lugar

Por: Evelyn Hinojosa, José Flores, Esdras Porcayo y Diego López.

PROYECTO:
COAGU-CELL: PRODUCTO ORGÁNICO QUE REVALORA LOS SUBPRODUCTOS DE LA DESTILACIÓN DE TEQUILA COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES.

Premio:
Capital semilla de \$30,000.00 pesos.

Asesores

Dra. Sagnite Ventura Cruz
Mtra. Ana Elisa Alcántara Valladolid
Lic. en Contaduría Gabriela Rosales Muñoz
Dr. Alberto Tecante Coronel

Centro de Incubación e Innovación e
Empresarial en colaboración con el equipo del centro de negocios TEST.