

**TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
TIANGUISTENCODIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

OPCIÓN IX: TESIS

**Optimización del proceso de coagulación floculación aplicando un
coagulante natural para la remoción de color en un agua residual textil**

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

PRESENTA

Josue Aaron Orozco Estrada

**DIRECTORA
Dra. Sagnite Ventura Cruz**

**ASESOR
Dr. Luis Antonio Castillo Suárez**

Abril 2025

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, en el laboratorio de Instrumental de la División de Ingeniería Ambiental, como parte del proyecto JD/IA/T-232/2025 ***“Optimización del proceso de coagulación floculación aplicando un coagulante natural para la remoción de color en un agua residual textil”***, bajo la responsabilidad de la Dra. Sagnite Ventura Cruz.

Este trabajo de investigación fue registrado con el título: *“Optimización del proceso de coagulación floculación aplicando un coagulante natural para la remoción de color en un agua residual textil”*, con el número ACA-IA/PI-025 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.

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ACRÓNIMOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN	vii
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	viii
JUSTIFICACIÓN	ix
OBJETIVOS	x
OBJETIVO GENERAL	x
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	x
HIPÓTESIS	xi
Capítulo 1 GENERALIDADES	44
Antecedentes	44
Marco Teórico	46
1.1 Agua	46
1.2 Aguas residuales en México	46
1.3 Características de las aguas residuales	48
1.4 Aguas residuales textiles	48
1.5 Métodos de tratamientos	49
1.5.1 Biológicos	51
1.5.2 Físicoquímicos	52
1.5.2.1 Coagulación-Floculación	53
1.6 Oxidación avanzada	54
1.7 Aplicaciones de la célula micro celulosa (CMC) en el tratamiento de aguas residuales	55
1.8 Colorantes textiles	55
Capítulo 2 Desarrollo experimental	58
2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL	58

2.2 Caracterización del agua residual	58
2.3 Optimización de las condiciones de operación	60
2.5 Validación del modelo de optimización	60
2.6 Evaluación de la eficiencia de aplicando un coagulante comercial	61
2.7 Caracterización fisicoquímica del agua residual textil tratada bajo condiciones óptimas	61
2.7.1 <i>Cuantificación de color</i>	61
2.7.2 <i>Medición del pH</i>	63
2.7.3 <i>Cuantificación de la conductividad eléctrica</i>	63
2.7.4 <i>Determinación de solidos disueltos totales</i>	64
2.7.5 <i>Determinación de la DQO</i>	64
3.1 Optimización de las condiciones de operación	66
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS	76

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 Formación de un acuífero	46
Figura 2 Descarga de aguas residuales	47
Figura 3 Descarga de aguas residuales textiles a un río	49
Figura 4 Planta de tratamiento de agua residual de Tejupilco	51
Figura 5 Reactor biológico.....	52
Figura 6 Prueba de jarras para el tratamiento de coagulación-floculación.....	54
Figura 7 Procesos de oxidación avanzada.....	54
Figura 8 Estructura de la celulosa microcristalina	55
Figura 9 Colorantes utilizados 1: Azoicos, 2: Quinonas, 3: Anilinas	56
Figura 10 Estructura química de los pigmentos	56
Figura 11 Reacciones implicadas en la transformación del índigo.....	57
Figura 12 Diagrama general del desarrollo experimental.....	58
Figura 13 Muestra del agua residual cruda	59
Figura 14 Espectrofotómetro HACH.....	62
Figura 15 Medición de parámetros pH, conductividad eléctrica, temperatura, sólidos suspendidos	63
Figura 16 Viales de DQO con agua residual tratada	64
Figura 17 Proceso de digestión de los tubos de DQO	65
Figura 18 A) muestra sin tratamiento b) muestra con tratamiento.....	71
Figura 19 Gráfica de la eficiencia de remoción de color.....	71
Figura 20 Gráfica en la remoción de color con Sulfato de Aluminio	72
Figura 21 Remoción de color con celulosa microcristalina.....	73
Figura 22 Comparación de los resultados de los coagulantes	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos para el muestreo.....	59
Tabla 2 Matriz experimental usada en la optimización.....	60
Tabla 3 Parámetros fisicoquímicos evaluados en el agua cruda.....	66
Tabla 4 Parámetros obtenidos en la remoción de color	68
Tabla 5 Resultados obtenidos después de la experimentación	69
Tabla 6 Comparación de los parámetros de la NOM-001-SEMARNAT-2021	70

ACRÓNIMOS

CMC: Celulosa Microcristalina

DQO: Demanda Química de Oxígeno

EDTA: Acido etilendiaminotetraacético

RPM: Revoluciones por minuto

pH: potencial de iones de hidrogeno

m⁻¹: unidades de medida de la absorbancia, metros a la menos uno

RESUMEN

La industria textil consume para sus procesos de fabricación una cantidad importante de agua potable, la etapa de tinción es una de las que genera efluentes residuales con una carga alta de colorantes sintéticos como el azul índigo, este colorante es de azul oscuro, por lo que las telas deben lavarse para obtener un azul con menos intensidad. En el presente proyecto se utilizó para el tratamiento de un agua residual de lavado textil el proceso de coagulación-floculación, este tratamiento es uno de los más utilizados por su fácil manejo, su bajo costo de operación y por su efectividad.

La coagulación floculación se realizó con una mezcla de sulfato de aluminio y un coagulante natural obtenido a partir del sargazo. La eficiencia de remoción para sólidos suspendidos, color, Demanda Química de Oxígeno (DQO) fue en promedio del 94.9%. La dosificación que se utilizó fue de 1g/L de sulfato de aluminio y 200 mg/L de coagulante natural, con un tiempo de agitación rápida de 200 rpm por 5 min y una agitación lenta a 20 rpm por 5 min. La eficiencia obtenida con esta dosis óptima fue de 94.5 % para color y un 52.3% para DQO.

Utilizar sulfato de aluminio para el tratamiento del agua residual es una ventaja por sus elevadas eficiencias de remoción, sin embargo, existe la desventaja de que este puede alterar el pH del agua acidificándola, esto genera lodos los cuales presentan una toxicidad por la presencia de aluminio. Utilizar un coagulante natural como la celulosa microcristalina tiene la ventaja de no alterar el pH del agua tratada, sin embargo, presentó una baja en la remoción de DQO, esto genera lodos los cuales no presentan una toxicidad como el sulfato de aluminio, solo los compuestos que se presentan en el agua residual.

Modificar la celulosa microcristalina para que tenga una mayor cantidad de poros ayudara a tener una mayor eficiencia en la remoción de color, entre otros parámetros ayudando, así como una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales ya no tanto textiles, si no municipales o de otro giro industrial.

ABSTRACT

The textile industry consumes a significant amount of drinking water for its manufacturing processes, the dyeing stage is one of those that generates residual effluents with a high load of synthetic dyes such as indigo blue, this dye is dark blue, so the fabrics must be washed to obtain a blue with less intensity. In this project, the coagulation-flocculation process was used for the treatment of textile washing wastewater, this treatment is one of the most used due to its easy handling, low operating cost and effectiveness.

Flocculation coagulation was performed with a mixture of aluminum sulfate and a natural coagulant obtained from sargassum. The removal efficiency for suspended solids, color, Chemical Oxygen Demand (COD) was on average 94.9%. The dosage used was 1 g/L of aluminum sulfate and 200 mg/L of natural coagulant, with a rapid stirring time of 200 rpm for 5 min and a slow stirring at 20 rpm for 5 min. The efficiency obtained with this optimal dose was 94.5 % for color and 52.3% for COD.

Using aluminum sulfate for wastewater treatment is an advantage due to its high removal efficiencies, however, there is the disadvantage that it can alter the pH of the water by acidifying it, this generates sludge which presents toxicity due to the presence of aluminum. Using a natural coagulant such as microcrystalline cellulose has the advantage of not altering the pH of the treated water, however, it presented a decrease in COD removal, this generates sludge which does not present a toxicity like aluminum sulfate, only the compounds that are present in the wastewater.

Modifying microcrystalline cellulose so that it has a greater number of pores will help to have greater efficiency in color removal, among other parameters helping, as well as an alternative for the treatment of wastewater not so many textiles, but municipal or other industrial activities.

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales es la composición variada provenientes de las descargas de usos domésticos, industriales y agrícolas, son también consideradas aguas negras o cloacales, por lo que sus características han sido modificadas por las actividades humana (AGUAS, 2002).

Por lo que la escasez de agua ha incrementado a un ritmo alarmante, por lo que un 80% de las aguas residuales son descargadas sin un tratamiento adecuado provocando una mayor contaminación y disminución de la calidad del agua de los acuíferos, ríos o lagos. Por lo que el tratamiento puede evitar una contaminación física, química, bioquímica y biológica (Jiménez, *et al.*, 2010).

La descarga de las aguas residuales sin un tratamiento adecuado provoca la contaminación de los cuerpos receptores disminuyendo calidad, por lo que los contaminantes que están presentes en el agua son compuestos orgánicos e inorgánicos (nitrógenos y fosfatos), bacterias coliformes fecales, materia orgánica e inorgánica (Jiménez, *et al.*, 2010).

Para poder remover los contaminantes que están presentes en las aguas residuales existen diversos procesos de tratamientos, de lo cual incluyen diferentes etapas para poder la remover la mayor cantidad de contaminantes(Rojas, 2002).

Los tratamientos son preliminares, primarios, secundarios y terciarios de los cuales cada uno de ellos puede llegar a tener una o más etapas de las cuales cada una de ellas elimina una cierta cantidad de contaminantes(Rojas, 2002).

El tratamiento preliminar este tratamiento esta destinado a la preparación o acondicionamiento por lo que ayuda a proteger las instalaciones por lo que elimina solidos gruesos, arenas, aceites y grasas (Silva, 2008).

El tratamiento primario ayuda a la remoción por los medios físicos o mecánicos de material sedimentable o flotante de mayor tamaño que no son sedimentables en el agua (Quintero & Rodríguez, 2022).

El tratamiento secundario reduce los compuestos orgánicos este proceso utiliza procesos biológicos convirtiendo la materia orgánica en sólidos sedimentables flocúlenos (Quintero & Rodríguez, 2022).

El tratamiento terciario tiene por objetivo la complementación de los procesos anteriores para lograr un efluente con la menor carga de contaminantes para que pueda ser utilizado como recarga de acuíferos, recreación entre otros, estos tratamientos utilizan procesos físicos, químicos y biológicos. Los tratamientos químicos mas utilizados son la precipitación química, osmosis inversa, intercambio iónico, oxidación química, coagulación-floculación entre otros (Judith & Alfredo, 2013).

De los tratamientos químicos antes mencionados la coagulación floculación es uno de los tratamientos que tiene una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes. Por lo que coagulación es uno de los pasos iniciales para poder desestabilizar las cargas de las partículas con aditivos químicos de los cuales los más utilizados son sulfato de aluminio y sulfato férrico (Veliz, *et al.*, 2016).

Actualmente se han buscado alternativas para los tratamientos de las aguas residuales como lo son los coagulantes naturales los cuales ayudan en el proceso de la clarificación de agua por lo que pueden ser biodegradables, económicos y compatibles con el medio ambiente (Prado, *et al.*, 1991).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las industrias que existen en México pueden llegar a utilizar más de 13 millones de Litros de agua, cada una de las industrias tiene un distinto giro para poder producir cierto producto, por lo que actualmente la escases de agua en varios estados del país ha incrementado el interés en los tratamientos de aguas residuales por métodos físicos, químicos o biológicos CONAGUA señalo que el 2019 existían 3661 plantas de tratamientos de aguas residuales municipales e industriales (Al-Wasify *et al.*, 2023) con el paso del tiempo dejaron de operar varias plantas municipales debido a la falta de capacidad financiera, vida útil rebasada o por el desinterés del personal.

Las industrias textiles son las responsables de la principal contaminación del agua en el mundo, el agua que es utilizada en los procesos de producción se le agrega colorantes o así mismo en los tratamientos como el efecto gastado. La empresa de lavado textil utiliza cerca de 10,000 litros en cada una de sus lavadoras, por lo que al día se llegan a descargar más de 50,000 litros de agua sin un tratamiento, por lo que el agua que se descarga puede llegar a contener colorantes que no son degradables o que pueden llegar a ser tóxicos para la vida acuática, por lo que un tratamiento ayuda a la disminución de los contaminantes que se encuentran en el agua residual (Zamora *et al.*, 2018).

JUSTIFICACIÓN

El agua es uno de los recursos más abundante que se encuentra en la Tierra siendo la que se encuentra en la atmosfera en estado líquido, sólido y gaseosos, por lo que un 97% es salada y el otro 3% es agua dulce que se encuentra en congelada en los glaciares y polos, otra parte se encuentra en los acuíferos subterráneos, por lo que el agua dulce está disponible para consumo humano, sin embargo, su utilización también es para la agricultura, ganadería y la industrias(Fernández *et al.*, 2002).

El incremento de la población es un factor que ha afectado a la Tierra esto por el incremento de la demanda de los productos, por lo que las industrias utilizan grandes cantidades de agua para la elaboración de cada uno de los productos, en el caso de la industria textil tiene un gran impacto en el medio ambiente, para la producción de un pantalón se utilizan 2,000 y 3,000 litros de agua por lo que se llegan a utilizar colorantes sintéticos los cuales no son biodegradables, por lo que terminan en las descargas de aguas residuales sin tratamiento alguno, esto porque tiene un coste adicional para poder degradar los colorantes de manera efectiva, dentro de la industria textil se pueden utilizar diferentes tipos de materias primas como el algodón, lana y fibras sintéticas por lo que en el proceso de tintado se pueden generar sales inorgánicas, almidón, peróxidos, acido etilendiaminotetraacético (EDTA), tensoactivos, enzimas, surfactantes, metales pesados(Esteban *et al.*, 2018).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de remoción de color por coeficiente espectral de un agua residual textil aplicando un proceso de coagulación usando un coagulante natural aplicado en un agua residual textil

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímicamente el agua residual textil mediante la determinación de sólidos suspendidos totales, DQO y color.
- Realizar pruebas preliminares para definir los niveles experimentales de la optimización, dosis del coagulante y condiciones de la prueba de jarras.
- Optimizar las condiciones de operación de un proceso de coagulación-floculación aplicando un coagulante natural para la remoción de color por Pt-Co.
- Evaluar la eficiencia de remoción de los parámetros sólidos suspendidos totales, DQO y color utilizando un coagulante comercial.
- Caracterizar fisicoquímicamente el agua residual textil tratada bajo condiciones óptimas.

HIPÓTESIS

La estructura de la celulosa microcristalina tiene propiedades adsorbentes por lo que puede llegar a contribuir significativamente en la remoción de color del agua residual textil, por lo que su eficiencia de remoción será de un 85% para poder cumplir con los parámetros establecidos de color platino-cobalto que marca la NOM-001-SEMARNAT-2021.

La celulosa microcristalina que se utilizara no alterara el pH como lo hace el coagulante inorgánico, así mismo se obtendrá los flóculos de mayor tamaño para que la sedimentación sea rápida para que el tiempo corto y obtener una mayor eficiencia en el tratamiento, sin embargo, la DQO es uno de los parámetros que también se establecen dentro de la norma por lo que celulosa será de gran beneficio al disminuirla para así solo tener un tratamiento corto.

CAPITULO 1 GENERALIDADES

ANTECEDENTES

Al-Wasify *et al.*, (2023) evaluaron la efectividad de las semillas de maní desaceitadas (*Arachis hypogea*) como coagulante natural para el tratamiento de aguas superficiales. Realizaron pruebas de jarras con 5 dosis diferentes (5.0, 10.0, 15.0, 20.0 y 25.0 mg/L), se mezcló rápidamente durante 1 min a 200 rpm y una agitación lenta durante 15 min a 40 rpm. Por lo que las semillas de maní presentaron una eficiencia de remoción de 80% en la turbidez, 55% en la DQO y 90% en sólidos suspendidos totales.

Lwuzor *et al.*, (2023) estudiaron las perspectivas y desafíos de la utilización del bagazo de caña de azúcar como precursor de biocoagulantes para el tratamiento de aguas residuales. Realizaron las pruebas de la efectividad del bagazo de caña de azúcar utilizando disolventes como el hidróxido de sodio con una dosis optima de 90 mg/L, Cloruro de aluminio hexahidratado con 150 mg/L, ácido sulfúrico con 80 mg/L, por lo que han demostrado que el bagazo de azúcar tiene un gran potencial para la eliminación de partículas en suspensión con una eficiencia de un 95%, una disminución de DQO de un 72% y el color en un 73%.

Jagaba *et al.*, (2020) realizó un análisis comparativo de uso sostenible de coagulantes naturales y químicos para la eliminación de contaminantes de efluentes de planta de aceite de palma. Realizar una prueba de jarras con varios coagulantes para determinar la dosis optima (250, 500, 600, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 y 6000 mg/L) y un tiempo de agitación rápida por 3 min a 250 rpm y una agitación lenta por 30 min a 30 rpm. Donde se demostró que la dosis optima de 4000 mg/L, se obtuvo una eliminación de sólidos suspendidos totales de un 98%, una disminución en la DQO de un 93%, en la turbidez de un 94%, el aceite de palma no pudo reducir el color por lo que su eficiencia fue un 66%.

Kalibbala *et al.*, (2023) sintetizaron la eficiencia del compuesto de cascara de cactus y plátano como coagulante natural para el tratamiento de aguas residuales sintéticas y agua de río. Realizaron una prueba de jarras con una solución madre donde se utilizó 10 g de cascara de cactus y cascara de plátano en un 1L de agua destilada, por lo que utilizaron 15ml/L de coagulante con una velocidad de agitación de 5 min a 200 rpm y una agitación lenta por 10 min a 40 rpm, por lo que se demostró que la cascara de plátano y la de cactus tiene una eliminación de la turbidez de un 78% y del 89% en SST.

Martha *et al.*, (2013) realizaron una experimentación con la *moringa oleífera* como una alternativa para sustituir coagulantes naturales metálicos en el tratamiento de aguas superficiales. Donde se realizó una prueba de jarra con dos coagulantes (alumbre y *moringa*), por lo que se realizaron soluciones madres de 10 g en 1 litro de agua destilada, se utilizaron concentraciones de 0, 10, 15, 20, 30 y 40 mg/L con una agitación rápida por 2 min a 150 rpm y una agitación lenta por 30 min a 30 rpm, demostrando una efectividad de la *moringa* en la remoción de color de un 96 % y turbidez de un 95 %.

MARCO TEÓRICO

1.1 AGUA

El agua en el medio ambiente se puede encontrar en ríos, lagos, manantiales o acuíferos acuáticos, es fundamental para la vida de los seres vivos, el agua es abundante en la tierra por lo que se encuentran en estado líquido, sólida y gaseosa. La distribución del agua en la Tierra está compuesta de un 97% de agua salada que se encuentra la mayor parte en los océanos y el 3% es la representación del agua dulce para consumo de los seres vivos, por lo que la mayoría del agua dulce se encuentra almacenada en los glaciales(Toledo, 2002).

El agua dulce se puede encontrar en los acuíferos los cuales son depósitos subterráneos que son capaces de almacenar y transmitir agua, por lo que son parte del ciclo del agua donde se filtra en el suelo por medio de las capas porosas, por lo que dos factores intervienen en la formación de los acuíferos la gravedad que atrae el agua hacia el centro de la tierra para filtrarse hacia el subsuelo (Figura 1)(Fernández *et al.*, 2002).



Figura 1 Formación de un acuífero

1.2 AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

Las aguas residuales son consideradas como el producto del uso al que ha sido sometida y que como resultado ha sido contaminada con sustancias que afectan negativamente su calidad debido a la acción del hombre, por lo que son consideradas no aptas para ser utilizadas nuevamente, la calidad puede verse afectada por la cantidad de contaminantes que pueda contener estos son sólidos o

disueltos, la producción del agua residual proviene de los hogares, industrias, de actividades de agricultura y ganadería (Peña *et al.*, 2013)

Por lo general el agua potable se utiliza para uso personal y para la elaboración de productos que se utilizan día a día en la vida cotidiana, por lo que su descarga es sin un tratamiento por lo que se provoca la contaminación de ríos, lagos y acuíferos que pueden poner en riesgo la salud de la población y afectando el ecosistema que se encuentra alrededor. (Rojas, 2002).

En México las aguas residuales domésticas pueden contener una gran variedad de contaminantes como patógenos, metales pesados, residuos de productos personales y domésticos, derivados de combustibles, disolventes industriales y plaguicidas (Figura 2) (Rojas, 2002).

Por lo que el tratamiento inadecuado de las aguas residuales puede conducir a una sobreexplotación de los recursos hídricos de la contaminación de los ecosistemas y la degradación de los suelos, los daños que pueden causar las aguas residuales sin tratar pueden contener bacterias, virus y parásitos que pueden causar enfermedades como la colera, la hepatitis A, la fiebre tifoidea, la disentería, la poliomielitis y entre otras (Zurita-Martínez *et al.*, 2011).



Figura 2 Descarga de aguas residuales

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las características o la composición de las aguas residuales pueden variar en la cantidad de generación y en la cantidad de contaminantes o factores que pueden componerse de un 99% de agua y un 1% de sólidos por lo que pueden estar compuestos de materia mineral o materia orgánica (Muñoz, 2008).

Se pueden encontrar las características físicas, químicas y biológicas por lo que:

- Físicas: hace referencia a toda la materia suspendida, sedimentable, coloidal y disuelta, por lo que se presenta la turbidez debido a las partículas en suspensión donde es difícil la penetración de la luz afectando la vida acuática, el olor también es otro de los factores que está relacionado con la presencia de compuestos orgánicos y el color puede llegar a ser influenciado por las sustancias orgánicas e inorgánicas por lo que pueden tener colores intensos debidos a los tipos de químicos utilizados en los procesos.
- Químicas: hace referencia al pH que es el indicador para conocer su acidez o alcalinidad del agua residual ya que esto puede influir en la eficiencia de los tratamiento, la demanda química de oxígeno (DQO) esto refleja la cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición de la materia orgánica presente en el agua, los contaminantes inorgánicos como las sales, los metales pesados, nitratos y fosfatos y los contaminantes orgánicos que son los pesticidas, detergentes y productos farmacéuticos.
- Biológica: por lo regular las aguas residuales contienen una gran cantidad de microorganismos como bacterias, virus, parásitos y hongos por lo que algunos de estos pueden ser patógenos para los seres humanos (Manga *et al.*, 2001).

1.4 AGUAS RESIDUALES TEXTILES

En México las industrias textiles descargan sus aguas residuales sin tratamientos adecuados por lo que la cantidad de contaminantes afecta al medio ambiente, en cada una de las descargas que se realizan se pueden encontrar una gran cantidad de contaminantes como los orgánicos y los inorgánicos, donde unos los principales

contaminantes son los colorantes sintéticos por lo que estos son los que se pueden llegar a producir más de 700,000 toneladas anuales (Romero *et al.*, 2016)

Las aguas residuales pueden contener sustancias químicas peligrosas además de los colorantes, se pueden encontrar metales pesados y los compuestos orgánicos, llegando a afectar la calidad del agua, los ecosistemas tanto terrestres como acuáticos (Figura 3). Los colorantes del efluente pueden generar más contaminantes como las sales inorgánicas, peróxidos, hipocloritos de sodio, EDTA, tensoactivos, enzimas, entre otros compuestos (Garcés Giraldo *et al.*, 2005).



Figura 3 Descarga de aguas residuales textiles a un río

1.5 MÉTODOS DE TRATAMIENTOS

Los efluentes que son producidos por cualquier industria son perjudiciales para el medio ambiente y para la salud, los contaminantes que están presentes en el agua residual pueden llegar a presentar una amenaza inmediata a sus destinatarios, es por eso que actualmente existen varios procedimientos para el tratamiento de las aguas residuales, por lo que se han llegado a utilizar los microorganismos de los cuales se obtienen resultados variados en la degradación de los tipos de compuestos, otros tratamientos físico-químicos como los reactivos de Fenton, ozonación, oxidación fotoquímica, oxidación electroquímica estos tratamientos son conocidos como procesos de oxidación avanzada (POA) (Chavez, 2017).

Dentro de un tratamiento de aguas residuales se cuentan con un cierto número de etapas o procesos los cuales son los pretratamientos, tratamiento primario,

tratamiento secundario y tratamiento terciario por lo que cada uno de los tratamientos tiene una función diferente para cada agua residual (Correa-Torres *et al.*, 2023).

El pretratamiento se utilizado para la remoción de los materiales de mayor tamaño que sedimentan o quedan flotando con facilidad, este tratamiento se utiliza para evitar los daños en los demás tratamientos (Correa-Torres *et al.*, 2023).

Tratamiento primario es utilizado para la remoción de los contaminantes orgánicos e inorgánicos los cuales son removidos por los procesos fisicoquímicos, por lo que se puede considerar una de las primeras etapas para la depuración del agua que consiste en eliminar los sólidos suspendidos y otros materiales, por lo que se pueden realizar mediante medios mecánicos como las cribas, mallas de filtrado, desarenadores y tanques de sedimentación este proceso tiene por objetivo retirar entre el 40% y el 60% de los sólidos en el agua (Quintero-Yepes & Rodríguez-Valencia, 2020).

Tratamiento secundario es utilizado para la eliminación de la materia biológica de los desechos orgánicos que son de procedentes de los humanos, por lo que lo reduce o los convierte en solidos sedimentables flóculos que puedan ser sedimentados en los tanques de decantación, los tratamientos que más se utilizan son los lodos activados y los filtros percoladores, las lagunas de estabilización y aereadas, estos tratamientos tienen una eficiencia en la remoción de la DQO entre un 85% al 95% (Delgado, 2019)

Tratamiento terciario es uno de los últimos tratamientos para la eliminación de los contaminantes que no se eliminaron en los tratamientos anteriores, por lo que ayuda a la reducción de la carga de los contaminantes para que el agua sea reutilizada o sea liberada en el medio ambiente, por lo que el tratamiento puede ser fisicoquímico, es uno de los más utilizados por lo que en este paso dependerá de la calidad del agua, por lo que se utiliza la filtración, la decantación y la adsorción (Figura 4) (Mier Mabel *et al.*, 2000).



Figura 4 Planta de tratamiento de agua residual de Tejupilco

1.5.1 BIOLÓGICOS

Los tratamientos biológicos son los de menor coste y de bajo mantenimiento por lo que pueden remover en un 90% los contaminantes transformándolos en las sustancias inocuas como el Dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), nitrógeno o en agua. La desventaja de este tratamiento está limitada en cuanto al efluente que contienen moléculas xenobióticos o tóxicas que pueden dañar el cultivo ya que esta emplea bacterias, microorganismos, hongos, protozoos (Oliveros & Wild, 2019) .

Los tipos de los tratamientos biológicos son los siguientes:

- Lodos activados estos se basan en los cultivos en suspensión de los microorganismos por lo que el oxígeno se suministra para permitir la descomposición de la materia orgánica(Andrés *et al.*, 2008)
- Filtros percoladores estos utilizan soportes generalmente de plásticos para la fijación de la biomasa, estos son adecuados para cargas de contaminantes elevados (Bendezu *et al.*, 2017)
- Biodiscos y contactores biológicos rotativos son sistemas biológicos que permiten estar sumergidos parcialmente en el agua residual, donde se forma una biopelícula compuesta por microorganismos (bacterias), por lo que descomponen la materia orgánica por medio de los procesos aeróbicos (Menendez & Dueñas, 2020).
- Sistemas de biorreactores de membranas es un proceso donde se integra un proceso de lodos activados con una unidad de filtración por membranas por lo que actúan como barrera física que retiene los sólidos suspendidos y los

microorganismos permitiendo solo el pase del agua clarificada (Rivas *et al.*, 2003)(Figura 5).



Figura 5 Reactor biológico

1.5.2 FISICOQUÍMICOS

Es un tratamiento donde se emplean las combinaciones técnicas físicas y químicas para la eliminación o la reducción de los contaminantes que están presentes en las aguas residuales.

Los procesos físicos son:

- Sedimentación los sólidos suspendidos se asientan por medio de la gravedad en los tanques de sedimentación o en los decantadores, por lo que se retira el lodo acumulado.
- Filtración se realiza mediante tamices o membranas por lo que se eliminan partículas más grandes y materiales flotantes
- Aireación se introduce el oxígeno para favorecer la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos aeróbicos (Llano *et al.*, 2014)

Los procesos químicos son:

- Coagulación floculación es uno de los procesos donde se agregan coagulantes como el sulfato de aluminio o cloruro férrico, por lo que los coagulantes forman flóculos al unirse las partículas suspendidas y de la materia orgánica, por lo que los flóculos se vuelven más pesados y sedimentan facilitando su eliminación. La floculación es un proceso que va

en conjunto con la coagulación esto se realiza con el objetivo de que los flóculos se vuelvan más pesados y puedan sedimentar las fácilmente.

- Neutralización en este proceso se ajusta el pH utilizando ácidos o bases para mejorar la eficiencia de otros procesos.
- Adsorción es un proceso fundamental en el tratamiento de las aguas residuales para la eliminación de los contaminantes, por lo que es un proceso donde los átomos, iones o moléculas se adhieren (adsorbatos) a la superficie de un sólido (adsorbente) los más utilizados son el carbón activado, las zeolitas, las arcillas y los óxidos metálicos(Ortega Ramírez & Sánchez Rodríguez, 2021) .

1.5.2.1 COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

La coagulación en las aguas residuales ayuda a la remoción de sólidos suspendidos totales, turbiedad y color, este tratamiento ayuda a modificar las propiedades físicas de los contaminantes por lo que se agregan productos químicos como sal de aluminio o hierro son uno de los productos más utilizados (Lorenzo *et al.*, 2010).

El sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ por lo que es un compuesto químico inorgánico donde se utiliza ampliamente como coagulante en la purificación del agua potable así mismo en las industrias de papel debido a que ayuda a precipitar las impurezas que encuentra en el agua (Daniel & Quispe, 2020).

El sulfato de hierro FeSO_4 es un compuesto químico iónico, que se utiliza como coagulantes para la purificación del agua, así mismo se utiliza en las plantas de depuración municipales o en las industriales para la eliminación de fosfatos y la reducción de los cromatos (Aldana, 2014).

La floculación es un proceso químico donde se utilizan floculantes minerales, orgánicos o inorgánicos por lo que ayuda a que las partículas coloidales se aglomeren para sedimentar, los factores que ayudan a que una coagulación-floculación sea optima son los gradientes de la velocidad, el tiempo y el pH (López *et al.*, 2011)(Figura 6).

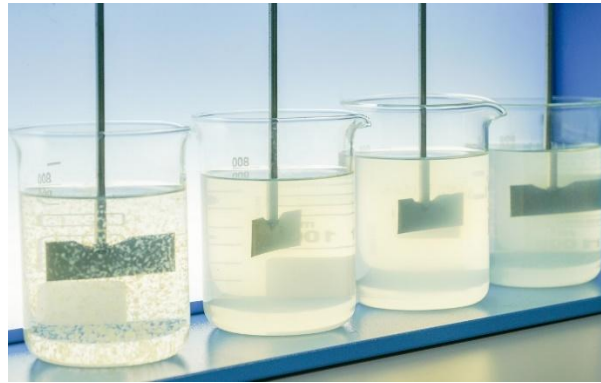


Figura 6 Prueba de jarras para el tratamiento de coagulación-floculación

1.6 OXIDACIÓN AVANZADA

Es uno de los tratamientos alternativos para las aguas residuales que se caracteriza por ser eficientes y útiles para la eliminación de los contaminantes orgánicos no degradables, por lo que se utiliza una oxidación fuerte para romper los enlaces de los compuestos orgánicos destruyendo sus propiedades químicas y convertirlos en compuestos biodegradables (Forero *et al.*, 2005)

Los procesos de Oxidación avanzada son también conocidos como POA (Figura 7), se consideran tratamientos terciarios que son basados en la generación de fuertes oxidantes o grupos de hidroxilos (OH), para reducir los niveles de DQO así mismo para separar los componentes orgánicos e inorgánicos transformándolos en carbono o en CO₂ (Proaño & Gualoto, 2018).

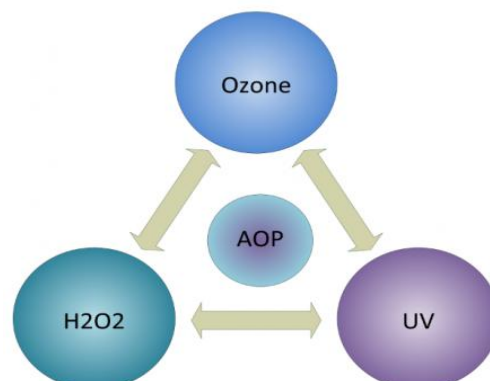


Figura 7 Procesos de oxidación avanzada

1.7 APLICACIONES DE LA CÉLULA MICRO CELULOSA (CMC) EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La celulosa es considerada un biopolímero cristalino, su estructura posee cadenas largas de β -D-glucopiranosas las cuales se unen por un enlace de β -1,4-glucosídico por lo que existen enlaces de hidrógeno intermoleculares e intramoleculares. Los enlaces de hidrógeno son los responsables de la alta cohesión molecular en la celulosa, por lo que se origina que las cadenas puedan alinearse en grupos formando zonas ordenadas (cristalinas) (Briones, 2023)

También se dice que la celulosa microcristalina es un polímero lineal de β -anhidroglicopiranosido, donde su fórmula química es $C_6H_{10}O_5$ donde las cadenas de los grupos hidroxilos pueden formar enlaces de hidrógeno entre las moléculas de la celulosa (Figura 8) (Linares, 2023).

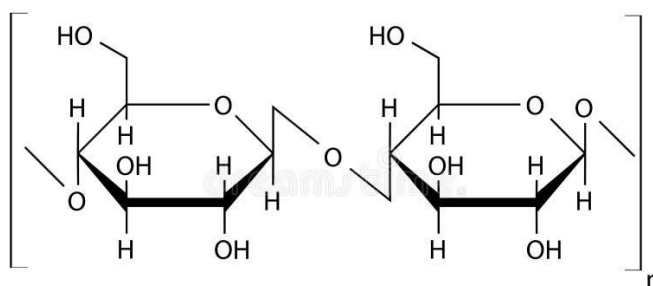


Figura 8 Estructura de la celulosa microcristalina

1.8 COLORANTES TEXTILES

Se les conoce como colorantes a las sustancias que pueden ser aplicadas a un sustrato para impartirle color con un cierto grado de permanencia, por lo que el proceso de elaboración de los productos textiles consiste en una serie de operaciones unitarias que emplean diferentes materias primas como el algodón, lana, fibras sintéticas (Alvarez Martin *et al.*, 2017).

En la actualidad se utilizan diferentes tipos de tintes en las industrias clasificados en dos grupos como:

- Colorantes: son sustancias las cuales se aplican en el tejido para darle un color y este permanezca de forma uniforme, el colorante se utiliza de acuerdo con el tipo de tela que se utilizara. Dentro de la industria textil los colorantes que más se utilizan son los azoicos, quinonas y anilinas (Figura 9) permitiendo que sean solubles en el agua (Saura & Galindo, 2016).

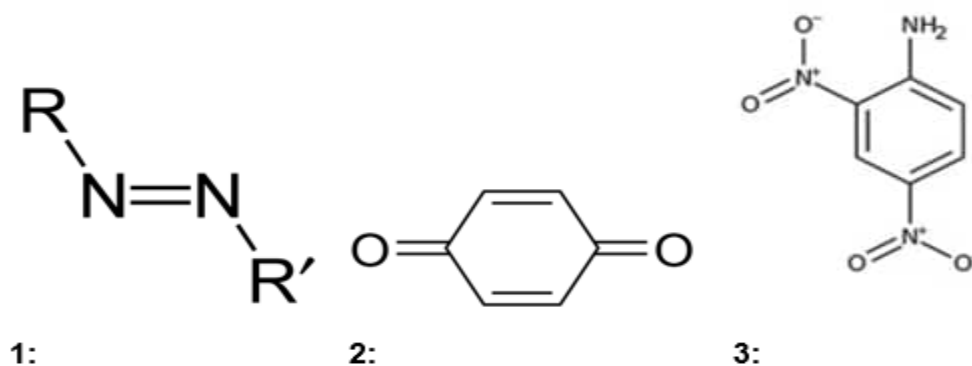


Figura 9 Colorantes utilizados 1: Azoicos, 2: Quinonas, 3: Anilinas

- Pigmentos: son colorantes insolubles que se utilizan para teñir polímeros y fibras, por lo que sus colores pueden ser intenso o fluorescentes, los pigmentos se extraen de plantas, animales o minerales, en la industria textil los pigmentos que más se utilizan son las quinonas, anilinas y azo compuestos (Figura 10) (Jameco *et al.*, 2023).

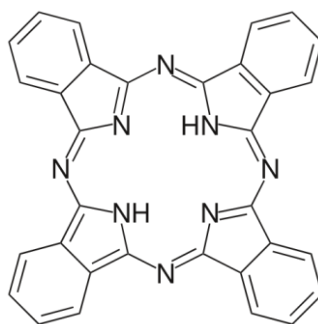


Figura 10 Estructura química de los pigmentos

El azul índigo es uno de los colorantes antiguos, por lo que es insoluble en el agua es ampliamente utilizado en la industria textil para el teñido de los blue jeans, este pigmento es de color azul oscuro garantiza que no se elimine del tejido con el paso del tiempo. El azul índigo lleva a cabo por medio de un procedimiento de tinción a

la cuba, por lo que este procedimiento el índigo tiene una transformación a una forma soluble llamada leucoíndigo (Figura 11) esto sucede mediante la reducción de un reactivo como el ditionito sódico, sulfuro sódico (Saura & Galindo, 2016)

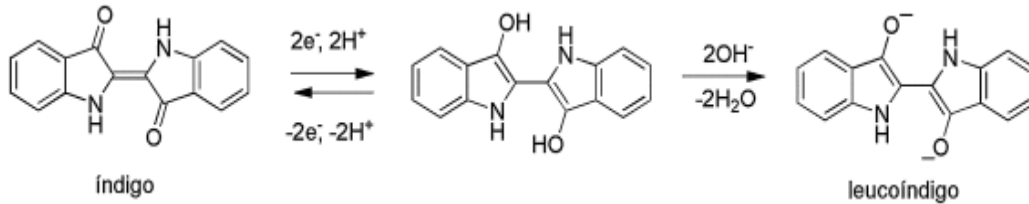


Figura 11 Reacciones implicadas en la transformación del índigo

El azul índigo es utilizado por las industrias textiles por su intensidad y durabilidad, por lo que es resistente a la decoloración, por lo que una fracción del azul índigo es descargado al medio ambiente. El azul índigo pertenece a las colorantes quininas, las cuales contienen doble enlaces con radicales libres (González, 2007).

Capítulo 2 Desarrollo experimental

2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la figura 12 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.

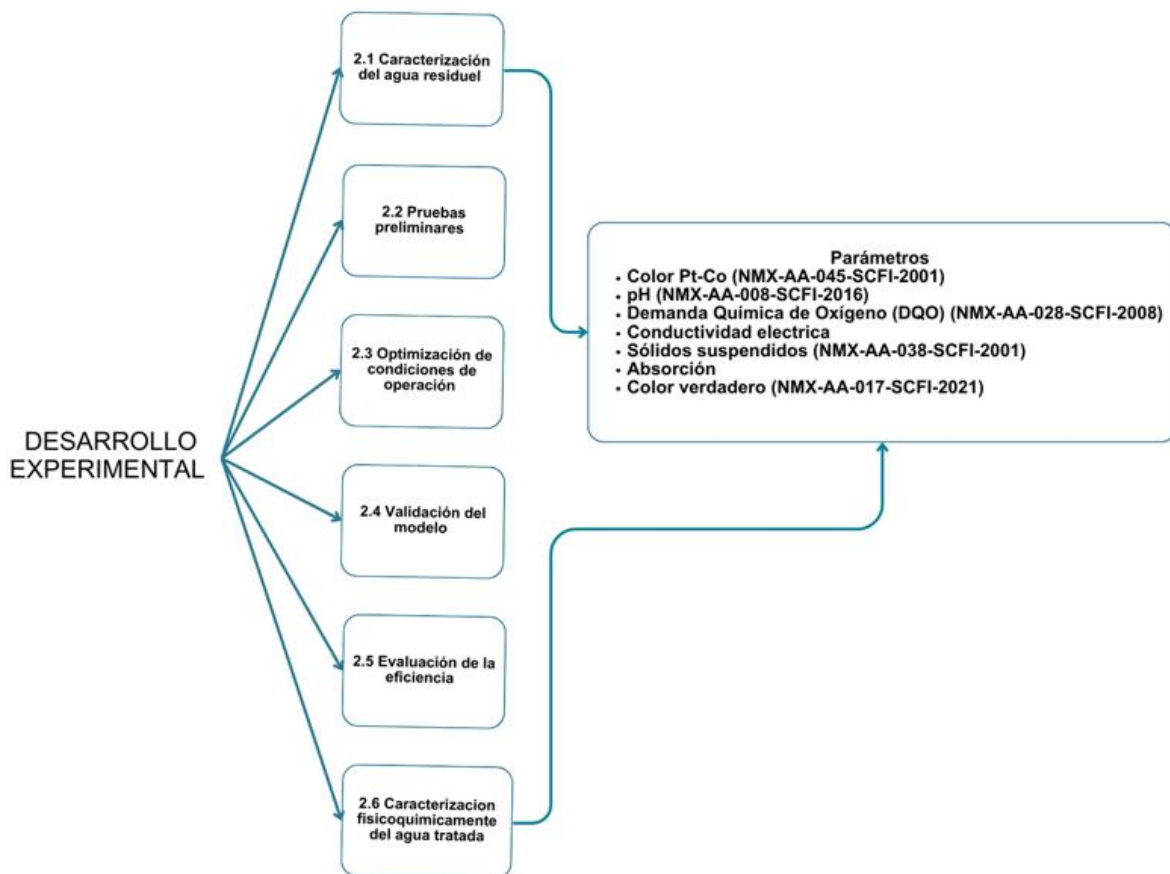


Figura 12 Diagrama general del desarrollo experimental

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

El agua residual se obtuvo de una empresa de lavado Textil, ubicada en el municipio de San Pedro Tlaltizapán, EDO. MÉX. por lo que dentro de la empresa cuentan con 3 lavadoras industriales por lo que están conectadas a un punto de descarga al drenaje municipal. Para la toma del muestro se realizó con la NMX-AA-003-1980, en un bidón de 20 L de capacidad se tomó una muestra en el punto final de la

descarga de las lavadoras, por lo que la muestra se trasladó a las instalaciones del tecnológico donde se almaceno un refrigerador a una temperatura de 4°C para así poder conservar los parámetros y poder realizar los parámetros fisicoquímicos correspondientes.

La caracterización se realiza para conocer los parámetros que contiene el agua residual, la cual proporciona una variedad de información para conocer los parámetros que deberán ser analizados como el pH, la conductividad, los sólidos en suspensión, DQO, por lo que en la siguiente (Figura 13) se muestra el agua residual cruda para su medición de cada uno de los parámetros.



Figura 13 Muestra del agua residual cruda.

Con los parámetros de la caracterización se puede proponer un diseño para un tratamiento adecuado al efluente que se descarga y que se tratara para disminuir el impacto ambiental que se genera día con día.

Al agua residual se le realizo la medición de los parámetros que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos para el muestreo

Parámetro	Método
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016

DQO (mg/L)	NMX-AA-030/2- SCFI-2012
Color (Pt-Co)	NMX-AA-179-SCFI-2018
Temperatura (°C)	NMX-AA-007-SCFI-2013

2.3 OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Se seleccionaron las condiciones de operación del proceso de coagulación-floculación velocidad de agitación, tiempo de agitación y la dosificación de los coagulantes, utilizando el programa estadístico de Statgraphics Centurion XIX versión 19.6.05. En la Tabla 2 se muestra la matriz experimental.

Tabla 2 Matriz experimental usada en la optimización

Experimento	Dosis de coagulante sulfato de aluminio (g/L)	Velocidad de agitación lenta (rpm)	Dosis de CMC (mg/L)
1	1	20	50
2	1	100	50
3	6	20	50
4	6	100	50
5	1	20	200
6	1	100	200
7	6	20	200
8	6	100	200
9	1	20	50
10	1	100	50
11	6	20	50
12	6	100	50
13	1	20	200
14	1	100	200
15	6	20	200
16	6	100	200

2.5 VALIDACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN

El modelo de optimización nos proporcionó el programa de statgraphics fue un modelo estadístico que nos ayudó en la realización de la experimentación, esto

porque se le agregaron datos descriptivos de lo que se realizó como la disminución de color de acuerdo con los parámetros que lo establecían la norma vigente.

2.6 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE APLICANDO UN COAGULANTE COMERCIAL

El tratamiento que recibió el agua residual textil fue por medio del coagulante sulfato de aluminio y la celulosa microcristalina para conocer la eficiencia del tratamiento por el programa de statgraphics proporciono 16 experimentos con las diferentes cantidades de alumbre y de celulosa para así evaluar su eficiencia tanto de manera combinada como de manera independiente. Los experimentos que se realizaron fueron con una agitación rápida y una agitación lenta y se utilizó el FP4 floculador portátil para pruebas de jarras, con el cual se pudo ajustar la velocidad de agitación y el tiempo.

2.7 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA RESIDUAL TEXTIL TRATADA BAJO CONDICIONES ÓPTIMAS

Para la caracterización del agua residual tratada se determinaron los parámetros con la normatividad vigente de la NOM-001-SEMARNAT-2021 donde se establecen los parámetros permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores propiedad de la nación con el fin de disminuir el impacto ambiental.

2.7.1 Cuantificación de color

El análisis del color se aplicó la normatividad vigente NOM-AA-045-1981 donde se aplica para la determinación de color en la escala platino cobalto por lo que se tomaron muestras después del proceso de filtración esto para que los sedimentos o los flóculos que se formaron en el proceso de coagulación-floculación, se tomó la muestra de concentraciones en tubos de nessler y se coloraron en el

espectrofotómetro HACH DR 6000 con el cual se pudo determinar el color para una de las muestras que se realizó.

Así mismo la norma vigente NMX-AA-017-SCFI-2021 está hace referencia a al análisis de agua y la medición del color verdadero en las aguas naturales o en las aguas residuales tratadas mediante el coeficiente de absorción espectral, dentro se establecen los parámetros de absorción de luz, diferentes colores absorben diferentes longitudes de onda que son a 436 nm, 525 nm y a 620 nm, para que los sólidos no afectaran en la medición de la luz, así mismo se utilizó un filtro de membrana de 0.45µm y se utilizó una celda de 10 mm de cuarzo y se colocaron las mediciones y las muestras en el espectrofotómetro HACH DR 6000 (Figura 14).



Figura 14 Espectrofotómetro HACH

Para poder obtener el coeficiente espectral se utilizó la fórmula que se encuentra en la NMX-AA-017-SCFI-2021

$$\alpha(\lambda) = \left(\frac{A}{d} * \mathcal{F} \right)$$

Donde:

A: es la absorbancia de la muestra de agua a la longitud de onda λ

λ : es la longitud de onda a la que se realizó la medición de absorbancia

d: es el paso de la luz de la celda, en milímetros

f: es un factor utilizado para obtener el coeficiente espectral en m^{-1}

2.7.2 Medición del pH

Para la medición de este parámetro se basó en la norma NMX-AA-008-SCFI-2016 la cual nos establece el método de medición del pH en las aguas naturales residuales o residuales tratadas donde se establecen intervalos de 0 a 14, para poder medir el pH del agua residual tratada se utilizó un potenciómetro portátil el cual se dejó hasta que la lectura se estabilizara.



Figura 15 Medición de parámetros pH, conductividad eléctrica, temperatura, sólidos suspendidos

2.7.3 Cuantificación de la conductividad eléctrica

Para poder medir la conductividad eléctrica del agua residual tratada se realizó con base a la norma NMX-AA-093-SCFI-2018 donde se establecen los métodos para la determinación de la conductividad eléctrica en el agua potable, agua residual y agua tratada, este parámetro nos ayudó para la evaluación de la calidad del agua y conocer la cantidad de iones disueltos o el contenido de sales, para poder medir la

conductividad eléctrica se utilizó el potenciómetro portátil el cual cuenta con la función de medición de conductividad.

2.7.4 Determinación de solidos disueltos totales

El agua residual textil contenía una gran cantidad de solidos disueltos por lo que se utilizó el potenciómetro para poderlos medir en PPM (partes por millón) esto nos ayuda para la comparación de los sólidos que se presentaban en el agua cruda y en agua tratada, por lo que el tratamiento aumento los contaminantes disueltos, esto por la presencia de los cloruros que contenía el agua residual.

2.7.5 Determinación de la DQO

Para poder medir la demanda química de oxígeno se llevó a cabo en tubos sellados esto de acuerdo con la normatividad vigente NMX-AA-030/2-SCFI-2011 donde establece el análisis para la determinación de la DQO en aguas naturales, aguas residuales y aguas residuales tratadas método de tubo sellado a pequeña escala, por lo que se utilizaron viales de digestión de la marca HACH 8000, los cuales presentan un rango de 20-1500 mg/L (Figura 16).

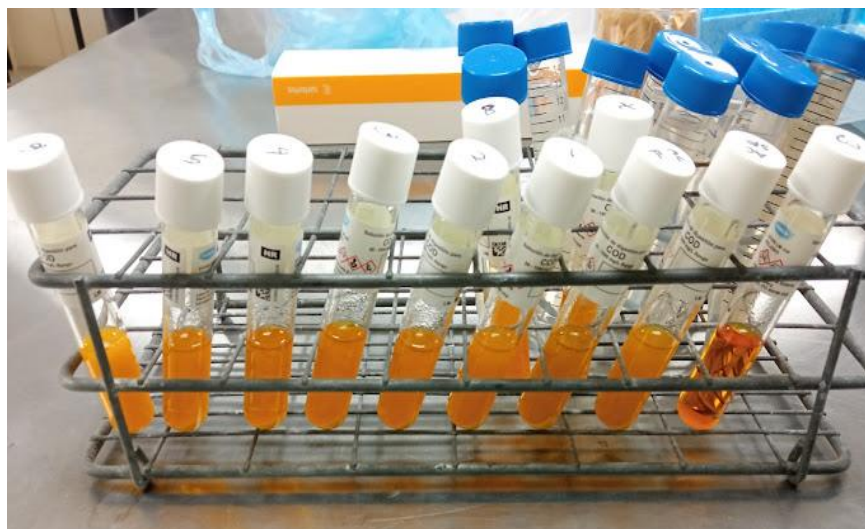


Figura 16 Viales de DQO con agua residual tratada

Para la preparación de los tubos sellados se agregaron 1000 ml de agua residual tratada con una micropipeta volumétrica para una medición exacta, se agito contantemente hasta que la mezcla de los reactivos alcanzo una temperatura alta, mientras se realizaban las demás pruebas de DQO se ajustó el digestor a una temperatura de 150°C para poder seguir descomponiendo la materia orgánica (Figura 17) esto para poder mantener una temperara dentro de un rango como la marca la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011.



Figura 17 Proceso de digestión de los tubos de DQO

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

De los 16 experimentos que se realizaron en el laboratorio del cada uno de ellos presento una diferente remoción de color y de DQO, sin embargo, algunos de ellos no presentaron una efectividad por encima del 80%, por lo que no cumplían con los parámetros que solicitaban la norma con la cual nos apoyamos para poder cumplir con un proceso adecuado, por lo que para conocer cada una de las eficiencias de los experimentos se le realizaron las pruebas con el agua cruda los cuales se muestran los parámetros en la tabla 3.

Los parámetros fisicoquímicos determinados en la muestra cruda, el contenido de 1115 mg/L de DQO indica que se trata de un agua residual industrial con un alto contenido de materia contaminante. El límite máximo permisible por la NOM-001-SEMARNAT-2021 de DQO es de 210 mg/L, lo que indica un alto riesgo de impacto ambiental y de salud a la descarga este tipo de agua sin un tratamiento previo (SEMARNAT, 2022).

Tabla 3 Parámetros fisicoquímicos evaluados en el agua cruda

Parámetro	Valor	NOM-001-SEMARNAT-2021
pH	6.6	6-9
Conductividad eléctrica (μS/cm)	7020	NA
Sólidos disueltos totales (ppm)	3530	60
Color 436 (m ⁻¹)	8.3	7.0
Color 525 (m ⁻¹)	-0.9	5.0
Color 620 (m ⁻¹)	-0.1	3.0
Potencial redox (mV)	400	NA
DQO (mg/L)	1158	180
Color aparente (Pt-Co)	1514	NA

El color verdadero a 436 nm fue de 8.3 m^{-1} , esto indica la presencia de contaminantes disueltos en la muestra que son capaces de absorber a esa longitud de onda y que corresponde a la sección del espectro visible los colores azul-amarillo, que es característico de las aguas residuales de la industria textil de la mezclilla (Ben Salah *et al.*, 2024).

El valor se encuentra por fuera del rango que establece la norma mexicana, lo que indica que contaminantes en suspensión como compuestos colorantes, materia orgánica disuelta, ácidos húmicos y fúlvicos pueden limitar el paso de la luz si es descargada sin tratamiento en un cuerpo de agua, causando la muerte de plantas subacuáticas disminuyendo los niveles de oxígeno disuelto (Kahraman & Şimşek, 2020). El color en la Pt-Co del agua residual cruda, sin tratamiento fue de 1514 Pt-Co, este valor no está normado en nuestro país, pero su valor indica la intensidad de color de la muestra de agua, es un parámetro usado en el análisis de calidad del agua y en otros países el color es normado en 280 Pt-Co (Yurtsever *et al.*, 2020).

Una alta conductividad eléctrica de $7020 \text{ } \mu\text{S/cm}$ puede significar una alta concentración de sales disueltas en la muestra, las que comúnmente son usadas en el proceso de tinción para mejorar la solubilidad de los reactivos, esto puede generar un incremento en la presión osmótica de algunos organismos y causar un impacto severo en el ambiente (Zhang *et al.*, 2019).

La Tabla 4 representa cada uno de los experimentos, así como la remoción de color que se presentó en cada uno de ellos de acuerdo con la absorbancia de color amarillo (436nm), rojo(525nm) y azul (620nm).

Tabla 4 Parámetros obtenidos en la remoción de color

Experimento	Coeficient e espectral a 436 nm	Remoción	Coeficiente espectral a 525 nm	Remoción	Coeficiente espectral a 620 nm	Remoción
	m ⁻¹	%	m ⁻¹	%	m ⁻¹	%
1	3.8	54.2	0.4	95.1	-0.1	101.2
2	3.5	57.8	0.1	98.80	0.3	96.4
3	3.8	54.2	0.4	95.18	-0.3	103.6
4	4.7	43.4	0.4	95.18	0.6	92.8
5	2.3	72.3	-0.2	102.4	-0.6	107.2
6	3.3	60.2	-0.1	101.2	0.3	96.4
7	4.3	48.2	0.7	91.57	0.1	98.8
8	4.1	50.6	0.5	93.98	0.5	94.0
9	3.3	60.2	1	87.95	0.6	92.8
10	10.8	-30.1	5.2	37.35	2.7	67.5
11	6.5	21.7	2.3	72.29	1.5	81.9
12	5.9	28.9	2.3	72.29	1.3	84.3
13	22.8	-174.7	12.4	-49.4	8.1	2.4
14	11	-32.5	5	39.76	2.8	66.3
15	6.3	24.1	2.1	74.70	1.5	81.9
16	5.4	34.9	2.9	65.06	1.3	84.3

Los resultados que se obtuvieron en cada una de las experimentaciones, se realizó una comparación para conocer la dosis óptima para el tratamiento del agua residual, así mismo se compararon los resultados de los demás parámetros como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 Resultados obtenidos después de la experimentación

Experimento	pH final	DQO	% removido DQO	SDT final	Potencial Redox final	Conductividad eléctrica final	Color	Color
		mg/L		ppm	mV	μS/cm	Pt-Co	%
1	4.6	526	47.6	3690	422	7500	182	88.0
2	4.6	490	51.1	3730	427	7460	155	89.8
3	3.6	546	45.6	4630	453	9190	658	56.5
4	3.7	711	29.1	4620	448	9150	410	72.9
5	4.5	478	52.3	3740	432	7500	108	92.9
6	4.4	521	48.1	3610	477	7250	165	89.1
7	3.7	539	46.3	4610	450	9190	809	46.6
8	3.7	577	42.5	4610	476	9160	599	60.4
9	4.6	481	52.0	3610	340	7280	111	92.7
10	6.7	831	17.1	3550	302	7160	350	76.9
11	3.7	573	42.9	4660	352	9160	363	76.0
12	3.7	539	46.3	4570	343	9060	251	83.4
13	6.6	729	27.3	3680	317	7360	412	72.8
14	6.7	731	27.1	3600	313	7170	338	77.7
15	3.7	516	48.6	4630	367	9160	408	73.1
16	3.8	613	38.9	4470	347	8860	226	85.1

En el experimento 5 el cual fue una concentración de 1g de sulfato de aluminio y 200 mg de celulosa fue una de las mejores optimizaciones en cuanto a la remoción de color que se presentaba en el agua obteniendo una eficiencia de un 90% en cuanto a la absorción y al color de platino-cobalto de los cuales se encuentran en los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (Tabla 6), por lo que la optimización que adecuada mostro tener un resultado favorable para el tratamiento del agua residual.

Tabla 6 Comparación de los parámetros de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Parámetros (mg/l) Nom-001-SEMARNAT-2021		Valores del agua residual cruda	Valores obtenidos experimentación
Parámetro instantáneo	Valor	Valor	Valor
Temperatura	35°C	20°C	16°C
Demanda química de Oxígeno	180 mg/L	1158	478 mg/L
pH	6-9	6.6	4.5
Color verdadero			
Longitud de onda	Coeficiente de absorción		
436 nm	7.0 m ⁻¹	8.3 m ⁻¹	2.3 m ⁻¹
525 nm	5.0 m ⁻¹	0.9 m ⁻¹	-0.2 m ⁻¹
620nm	3.0 m ⁻¹	0.1 m ⁻¹	-0.6 m ⁻¹

En la (Figura 18 a) se muestra el agua residual sin recibir un tratamiento por lo que presenta turbidez, solidos suspendidos y un color amarillo más oscuro y DQO alta además de que sus parámetros que muestran en la tabla 3 no cumplen con la normatividad vigente, en la (Figura 18 b) el agua residual fue tratada con la dosis optima presento un tratamiento eficiente de la cual en la tabla 5 y 6 se muestran los valores obtenidos en cada una de las experimentaciones por lo que disminuyo el color, DQO, turbidez, y los sólidos suspendidos.

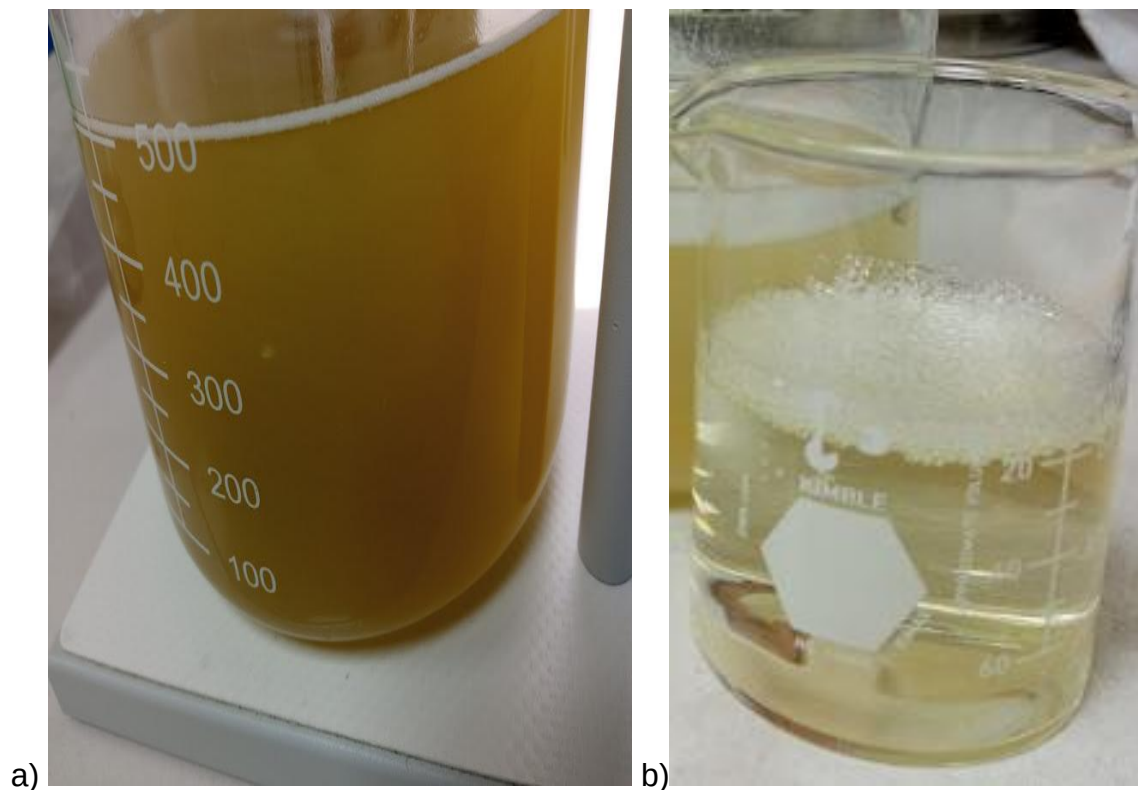


Figura 18 a) muestra sin tratamiento b) muestra con tratamiento

En la siguiente Figura 19 se presenta la eficiencia en la remoción de color, por medio de la dosis optima, de cual los dos compuestos tanto la CMC y el sulfato de aluminio tuvieron la eficiencia de un 92%, por lo que se observa que entre más dosificación de los compuestos menos eficiencia se obtiene.

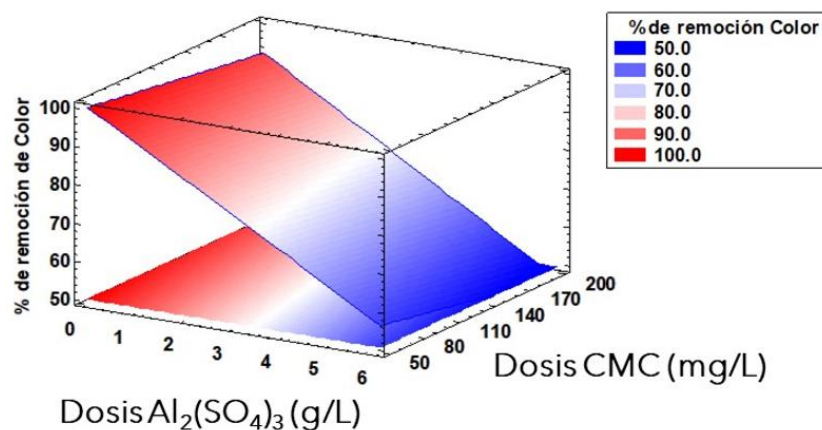


Figura 19 Gráfica de la eficiencia de remoción de color

En la figura 20 se muestra el sulfato de aluminio de acuerdo a los parametros que se establecieron como el tiempo de agitacion y la dosificacion, se realiza una comparación donde se muestra la eficiencia en la remocion de color de acuerdo con las dosis que se establecieron (1-6 g/L) al igual que tiempo (10-30 min), demostrando que tiempo es un factor que interfiere en la remocion de color teniendo una menor eficiencia.

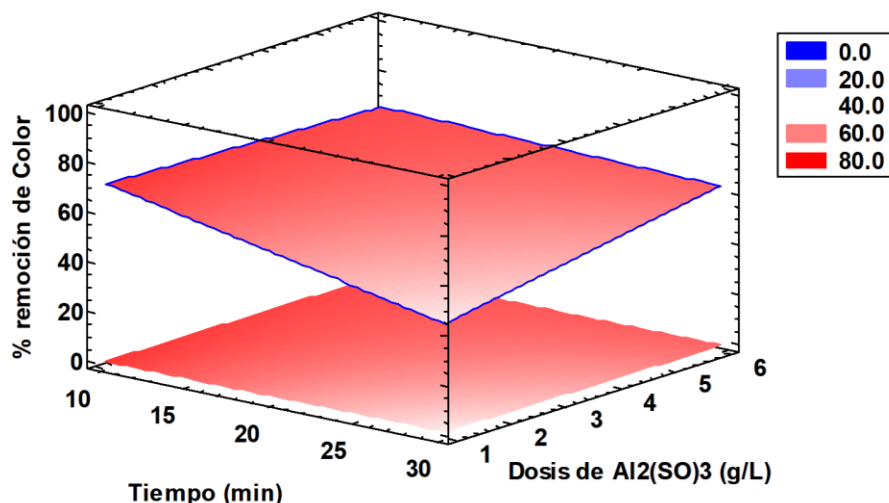


Figura 20 Grafica en la remoción de color con Sulfato de Aluminio

En la siguiente figura 21 se muestra la gráfica en la remoción de color utilizando la celulosa microcristalina con las diferentes dosificaciones (50-200 mg/L) y tiempo (10-30 min), demostrando que no tiene una efectividad mayor en la remoción de color, por la menor dosificación de celulosa mayor presentara una eficiencia de remoción de color.

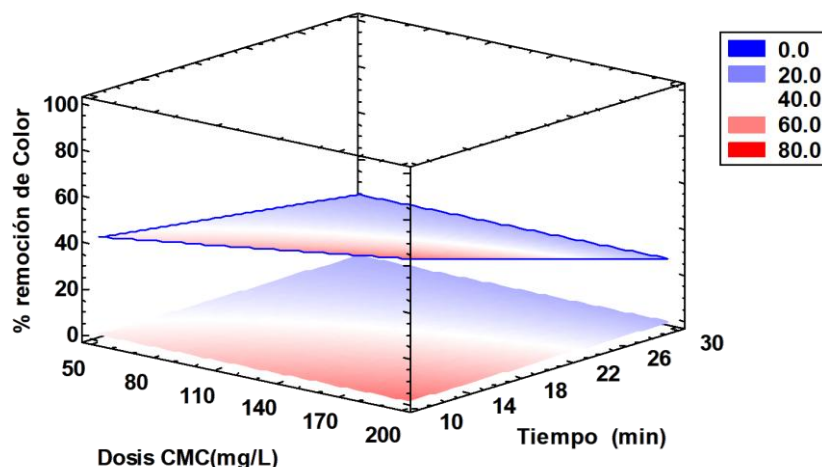


Figura 21 Remoción de color con celulosa microcristalina

En la figura 22 se muestran las comparaciones de las figuras 19, 20 y 21, esto se realizó con la dosis optima, con los parámetros de una agitación rápida a 200 rpm por 5 minutos y una agitación lenta a 20 rpm por 30 minutos, por lo que los resultados que se obtuvieron fueron que el sulfato de aluminio puede tener una remoción de color en un 94% y una remoción de DQO de un 50%, mientras que la celulosa puede llegar a tener una remoción de color de un 81% y una remoción de DQO de un 31%, por lo que al utilizar los dos, se mostró una eficiencia de remoción de color de un 95% y una disminución en la DQO de un 54%.

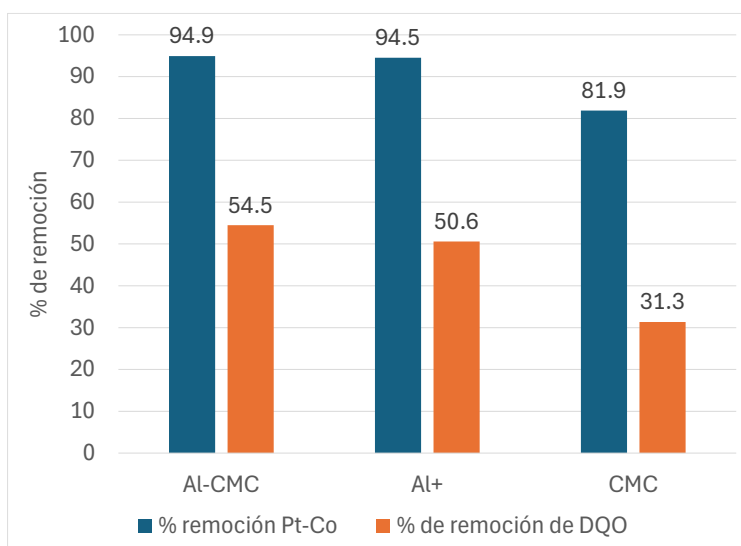


Figura 22 Comparación de los resultados de los coagulantes

CONCLUSIONES

El utilizar una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales es algo que ha incrementado el interés día con día, esto porque existen diferentes tratamientos para cada uno de los tipos de aguas residuales que por su composición puede ser diferente, el utilizar la celulosa microcristalina es una de las alternativas más sustentables, por lo que se reutilizan materias primas de las cuales sirvieron para la elaboración de productos.

El utilizar el programa de statgraphics nos ayudó con la dosificación de cada uno de los reactivos que se utilizarían, esto para facilitar más rápido la experimentación y otorgarnos un diseño experimental más eficiente y factible que haciendo la prueba de jarras que lleva más tiempo y más materiales para encontrar la dosificación.

Para poder conocer la dosis optima del coagulantes se realizaron los 16 experimentos, por lo que se realizó la comparación de entre ellos cual tenia la mayor eficiencia demostrando que el experimento 5 con la dosis de alumbre de 1g/L y 200 mg/L de celulosa, con un agitación rápida de 200 rpm en un tiempo de 5 min y una agitación lenta de 20 rpm en un tiempo de 10 min, por lo que esto nos dio una eficiencia de un 94.9 % en la remoción de color y una remoción de DQO de un 54.5 %, al compararlo con la NOM-001-SEMARNAT-2021, los valores de color son aceptados, por lo que se implementaría otro tratamiento para disminuir la DQO y así tener un valor aceptable.

Las ventajas de usar la celulosa microcristalina es una de las alternativas para los tratamientos de las aguas residuales, ya que es un buen absorbente por la porosidad que llega a tener, además de que no tiene modificaciones en el agua como el pH lo puede mantener en el rango que se encuentra la muestra, no genera lodos tóxicos como lo hace el alumbre.

RECOMENDACIONES

Se puede realizar una experimentación de la celulosa microcristalina con cloruro férrico para comparar la efectividad con otros tipos de compuestos y en otros tipos de aguas residuales, ya que se puede demostrar una eficiencia en la celulosa, tomando en cuenta que sería una alternativa como un coagulante natural, para así disminuir la contaminación que se genera en los lodos residuales, producidos por la coagulación floculación.

El utilizar la celulosa microcristalina se puede aumentar la dosificación para así conocer la efectividad ya que la dosificación fue de menor cantidad, por lo que al aumentarla puede tener una disminución en el color y en la DQO.

REFERENCIAS

Aldana, Luis. (2014). Comparación de la eficiencia del sulfato de aluminio y el sulfato ferroso en la remoción de sólidos en suspensión en aguas residuales de tipo ordinario.

Alvarez Martin, A., Trashin, S., Cuykx, M., Covaci, A., De Wael, K., & Janssens, K. (2017). Photodegradation mechanisms and kinetics of Eosin-Y in oxic and anoxic conditions. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.06.031>. This

Al-Wasify, R. S., Hamed, S. R., & Ragab, S. (2023a). Assessing the potential of de-oiled peanut (*Arachis hypogea*) seeds for surface water treatment: A sustainable alternative to chemical coagulants. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 49(3), 297–302. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2023.04.003>

Al-Wasify, R. S., Hamed, S. R., & Ragab, S. (2023b). Assessing the potential of de-oiled peanut (*Arachis hypogea*) seeds for surface water treatment: A sustainable alternative to chemical coagulants. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 49(3), 297–302. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2023.04.003>

Andrés, J., Quiroga, V., & Díaz López, F. E. (2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio Sewage treatment by activated sludge at laboratory scale.

Ben Salah, S., Missaoui, M., Attia, A., Lesage, G., Heran, M., & Ben Amar, R. (2024). Treatment of real textile effluent containing indigo blue dye by hybrid system combining adsorption and membrane processes. *Frontiers in Membrane Science and Technology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmst.2024.1348992>

Bendezu, B., Rocío, M., Carmen, D., Martínez, B., & Alexander, M. (2017). PROPUESTA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES UTILIZANDO FILTROS PERCOLADORES-LODOS ANAERÓBICOS ECOLÓGICOS PARA EL DISTRITO DE HUANCAYO, PROVINCIA DE HUANCAYO-JUNÍN.

Briones, J. (2023). Diseño de un proceso industrial para la obtención de celulosa microcristalina a partir del *Pennisetum purpureum* mediante combinación de hidrólisis ácida y alcalina para la Asociación Agropecuaria “Maconta Arriba.”

Chavez, I. (2017). Design and implementation of a treatment system Wastewater Projeto e implementação de um sistema de tratamento de águas residuais. 3(1), 2477–8818. <https://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.1.mar.536-560>

- Correa-Torres, S. N., Reátiga, A., Duran, M. C., & Florville, T. R. (2023). Eficiencia de la aplicación de *Chrysopogon zizanioides* en un sistema de agua residual doméstica rural con pretratamiento de pozo séptico. *Información Tecnológica*, 34(5), 1–10. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642023000500001>
- Daniel, P., & Quispe, Q. (2020). Evaluación de aguas residuales bajo el tratamiento a diferentes temperaturas de coagulación-floculación con semillas de Durazno (*Prunus pérsica*), Tuna (*Opuntia ficus indica*) y cáscara de Papa (*Solanum tuberosum*) del río Jillusaya. 6, 1839–1852. <https://doi.org/10.53287/zgkd8571yr70y>
- Delgado, G. (2019). Estudio de biodiscos como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas. *TECNIA*, 29(1). <https://doi.org/10.21754/tecnia.v29i1.545>
- Dialnet-ElAguaEnMexicoYElMundo-2887484. (n.d.).
- Esteban, P., Arias, Z., Bernardo, J., Nájera, P., Chaires Hernández, I., Iván, H., Ayala, S., & Nacional, I. P. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión Textile Industrial Dyes and optimal wastewater effluents treatments: A short review.
- Eugenia de la Peña Jorge Ducci Viridiana Zamora, M. (n.d.). Tratamiento de aguas residuales en México.
- Fernández, C., Alberto, J., & Milliet, C. (n.d.). El agua, recurso único.
- Forero, E., Ortiz, P., & Rios, F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. 3.
- Garcés Giraldo, C., Fernando, L., Ángel, H., Lucía, M., Mesa, P., Antonio, G., Restrepo, R., Palacio, S., & Andrés, J. (2005). *Revista Lasallista de Investigación*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520103>
- Gomez, H. (2014). Fiscalizacion ambiental en aguas residuales.
- González, G. A. (2007). DECOLORACIÓN DE EFLUENTES TEXTILES DE AZUL ÍNDIGO.
- Iwuozor, K. O., Adeniyi, A. G., Emenike, E. C., Ojeyemi, T., Egbemhenghe, A. U., Okorie, C. J., Ayoku, B. D., & Saliu, O. D. (2023). Prospects and challenges of utilizing sugarcane bagasse as a bio-coagulant precursor for water treatment. In *Biotechnology Reports* (Vol. 39). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00805>
- Jagaba, A. H., Kutty, S. R. M., Hayder, G., Latiff, A. A. A., Aziz, N. A. A., Umaru, I., Ghaleb, A. A. S., Abubakar, S., Lawal, I. M., & Nasara, M. A. (2020).

Sustainable use of natural and chemical coagulants for contaminants removal from palm oil mill effluent: A comparative analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 951–960. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.01.018>

Jameco, C., Aucatoma, K., Agualongo, S., Callan, C., & Montero, V. (2023). Biotecnología para la extracción de pigmentos vegetales, para uso industrial. 1, 1475.

Judith, M.-B., & Alfredo, J.-B. (n.d.). Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV (número 2), abril-junio 2013: 223-235 Rodríguez-González María Reyes Suárez-López Joaquín.

Kahraman, Ö., & Şimşek, İ. (2020). Color removal from denim production facility wastewater by electrochemical treatment process and optimization with regression method. *Journal of Cleaner Production*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122168>

Kalibbala, H. M., Olupot, P. W., & Ambani, O. M. (2023). Synthesis and efficacy of cactus-banana peels composite as a natural coagulant for water treatment. *Results in Engineering*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100945>

Linares, C. (2023). ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CELULOSA MICROCRISTALINA OBTENIDA A PARTIR DEL RAQUIS Y PSEUDOTALLO DEL BANANO (*Musa sapientum*) APLICANDO EL MÉTODO DE HIDRÓLISIS ÁCIDA-ALCALINA PARA SU USO EN LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS.

Llano, B. A., Cardona, J. F., Ocampo, D., & Ríos, L. A. (2014). Tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio de arcillas y alternativas de uso de los lodos generados en el proceso. *Informacion Tecnologica*, 25(3), 73–82. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300010>

López, G., Campos, C., & María, J. (2011). Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación-floculación de aguas residuales. *Tecnología En Marcha*, 24(2), 18–26. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=699878352002>

Lorenzo, E., Llanes, J., Garcia, L., & Bataller, M. (2010). Redalyc.Evaluación de la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y ozonización a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales municipales. 41, 49–56.

Martha, M., Arreola, S., Ramón, J., & Canepa, L. (2013). Moringa oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales (Vol. 17, Issue 2).

Menendez, C., & Dueñas, J. (2020). Criterios de diseño y escalado de biodiscos para el tratamiento de aguas residuales: Vol. XLI (Issue 2).

Mier Mabel, V., Chapa Laura, M., Carrera Mónica, S., Mendieta Magdalena, M., & Cisneros Blanca, J. (2000). TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES POR FILTRACIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO.

Muñoz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales.

Oliveros, D., & Wild, J. (2019). Evaluación de la eficiencia de remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales en un sistema de tratamiento terciario.

Ortega Ramírez, A. T., & Sánchez Rodríguez, N. (2021). Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 31(2), 121–134. <https://doi.org/10.18359/rcin.5343>

Proaño, R. G. S., & Gualoto, K. J. G. (2018). Wastewater treatment of industrial loads with advanced oxidation in conventional systems. Granja, 27(1), 103–111. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.08>

Quintero-Yepes, L., & Rodríguez-Valencia, N. (2020). Evaluación de tres tipos de cal para el tratamiento primario de las aguas residuales del café. Revista Cenicafé, 71(2), 105–117. <https://doi.org/10.38141/10778/71208>

Quintero-Yepes, L., & Rodríguez-Valencia, N. (2022). Uso de cales para el tratamiento primario de las aguas residuales del café. Avances Técnicos Cenicafé, 537, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0537>

Rivas Lucero, M., Moorillón, N., Virginia, G., Margulis, B., Hernandez, P., & Terán, S. (2003). Tratamiento de aguas residuales de uso agrícola en un biorreactor de lecho fijo. 37, 157–166. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30237206>

Rojas, R. (n.d.). Curso Internacional “GETIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES” 25 al 27 de setiembre de 2002 Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales CONTENIDO.

Rojas, R. (2002). Curso Internacional “GETIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES” 25 al 27 de setiembre de 2002 Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales CONTENIDO.

Romero, T., Rodriguez, H., & Maso, A. (2016). Caracterización de las aguas residuales generadas en una industria textil cubana Characterization of wastewater generated in a Cuban textile industry: Vol. XXXVII (Issue 3).

Saura, A. V., & Galindo, F. (2016). Utilización del colorante índigo en el laboratorio docente de Química Orgánica. Educacion Quimica, 27(2), 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.11.005>

SEMARNAT. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-AA-36-1980, Agua Determinación de Acidez Total y Alcalinidad Total, (esta norma cancela la NOM-AA-36-1976).

Silvia, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domesticas en agricultura.

Yurtsever, A., Sahinkaya, E., & Çınar, Ö. (2020). Performance and foulant characteristics of an anaerobic membrane bioreactor treating real textile wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101088>

Zaruma, P., Proal, J., Chaires, I., & Salas, H. (n.d.). Vista de Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual_ Una Breve Revisión.

Zhang, W., Wang, X. chuan, Wang, J. jun, & Zhang, L. le. (2019). Drugs adsorption and release behavior of collagen/bacterial cellulose porous microspheres. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.139>

Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., & Rodríguez-Sahagún, A. (2011). EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN LAS COMUNIDADES RURALES DE MÉXICO* MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT IN RURAL COMMUNITIES IN MEXICO.

