

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

OPCIÓN IX
TESIS

EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE AGAVE MEZCALERO PARA REMOVER
ÍNDIGO CARMÍN DE SOLUCIONES ACUOSAS

Que para obtener el Título de
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA

MICHEL YEIMY RASSO GÓMEZ

ASESOR (A) / DIRECTOR (A):
DRA. MIRIAM JENIFFER JIMÉNEZ CEDILLO

SEPTIEMBRE 2024

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 ITESTIAN-CA-6 “Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para la síntesis verde de materiales microporosos y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales”, bajo la responsabilidad de la Dra. Miriam Jeniffer Jiménez Cedillo.

Este trabajo de investigación fue registrado con el título “Extracción de celulosa de agave mezcalero para remover índigo carmín de soluciones acuosas”, con el número ACA-IA/PI-022 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

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iii
INTRODUCCIÓN	iv
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN.....	4
OBJETIVOS	6
HIPÓTESIS	6
1. GENERALIDADES.....	2
1.1 Estructura de los materiales lignocelulósicos	2
1.1.1 Celulosa	3
1.1.2 Hemicelulosa	4
1.1.3 Lignina	5
1.1.4 Fuentes de los materiales lignocelulósicos	6
1.2 Producción anual de agave mezcalero en México	7
1.2.1 Desechos generados de la producción de mezcal.....	7
1.3 Pretratamientos de lignocelulosa	8
1.3.1 Pretratamientos físicos.....	9
1.3.2 Pretratamientos químicos	10
1.4 Aplicaciones.....	10
1.5 Métodos de cuantificación de celulosa.....	11
1.6 Adsorción.....	14
1.6.1 Biosorción	15
1.6.2 Biosorbentes.....	16
1.6.3 Mecanismos de remoción.....	16
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	18

2.1 Obtención y acondicionamiento de la penca de agave.....	18
2.2 Extracción y caracterización de la celulosa obtenida a partir de la penca de agave	19
2.2.1 Análisis infrarrojo.....	19
2.2.2 Análisis de difracción de rayos-X (DRX).....	20
2.3 Estudio preliminar de los materiales obtenidos.....	20
2.4 Evaluación de las propiedades adsorbentes de la celulosa de la penca de agave	19
2.4.1 Efecto del tamaño de partícula	19
2.4.2 Efecto del pH.....	20
2.4.3 Efecto del tiempo.....	20
2.4.4 Efecto de la temperatura	20
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
3.1 Obtención y acondicionamiento de la penca de agave.....	24
3.2 Síntesis y caracterización de la celulosa obtenida a partir de la penca de agave	24
3.3 Evaluación preliminar de índigo carmín	26
3.4 Efecto del tamaño de partícula.....	28
3.5 Efecto del pH.....	32
3.6 Efecto del tiempo.....	34
3.7 Efecto de la temperatura	36
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES.....	45
REFERENCIAS	47
ANEXOS	53

RESUMEN

En este trabajo se realizó un estudio sobre la factibilidad de obtener celulosa a partir de residuos agrícolas de agave, específicamente de la penca de agave, mediante un tratamiento químico; el material resultante fue evaluado como adsorbente del colorante índigo carmín en solución acuosa, el cual es utilizado principalmente en la industria textil.

La penca de agave con corteza y descortezada fue recolectada, lavada, secada, triturada y tamizada a diferentes tamaños de partícula, posteriormente se sometieron a un tratamiento alcalino con NaOH y H₂O₂ en diferentes concentraciones, seguido de un blanqueamiento e hidrólisis con H₂SO₄, al final de los tratamientos, los materiales en su forma natural y tratados químicamente con y sin corteza, fueron puestos en contacto con el colorante índigo carmín durante 24 horas, para verificar de manera preliminar sus propiedades adsorbentes, dando como resultado que el material natural y sometido a una hidrólisis ácida (H₂SO₄) con corteza, son los que presentan una mayor remoción del colorante. Posteriormente, se evaluó la remoción del colorante utilizando diferentes tamaños de partícula; malla 60, 80 y 100, siendo los materiales tamizados a malla 100, los que presentaron mayor remoción del colorante. Se evaluó el efecto del pH en la remoción del colorante, concluyendo que el pH 4 y 7 empleando penca de agave natural y tratada removieron efectivamente el colorante carmín.

ABSTRACT

In this work, feasibility to obtain cellulose by chemical treatment from agave agricultural residues, specifically from agave leaves, was studied. Resulting material was evaluated as adsorbent to remove indigo carmine dye from aqueous solution; this dye is mainly used in textile industry.

Agave leafs were collected, washed, dried, crushed and sieved to different particle sizes, obtaining materials with bark and without bark, and then were subjected to a

sequential treatment composed by an alkaline reaction (NaOH and H_2O_2) at different concentrations, followed by bleaching and hydrolysis with H_2SO_4 . For treatments, agave leaves with or without bark were used as raw materials. Raw materials and those obtained after chemical treatments were used to evaluate indigo carmine dye removal in 24 hours process, to preliminary identify their adsorbent properties, showing that raw and barked material obtained after acid hydrolysis (H_2SO_4) have major efficiency to remove organic dye. Afterwards, dye removal was evaluated by using either natural or synthesized materials at different particle sizes; 60, 80 and 100 mesh, being the materials sieved at 100 mesh those with the highest dye removal. The effect of pH on dye removal was evaluated, concluding that pH 4 and 7 employing natural and treated agave leaves effectively removed carmine dye.

INTRODUCCIÓN

En el Estado de México y en el municipio de Santiago Tianguistenco, existen empresas de giro textil que con su producción y el uso de colorantes pueden generar una considerable cantidad de aguas residuales contaminadas. Estas aguas residuales a menudo contienen sustancias tóxicas y compuestos químicos que pueden ser dañinos para los ecosistemas acuáticos y la salud humana.

El Índigo Carmín (IC) es considerado uno de los componentes más contaminantes encontrados en los efluentes de la industria textil. Su uso puede tener efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente, ya que se ha reportado que es irritante para la piel, los ojos y las mucosas.

Por otro lado, la producción anual de agave mezcalero en México y la cantidad de desechos generados durante la producción del mezcal justifican la necesidad de implementar métodos adecuados para la gestión de estos residuos. Sin embargo, se ha explorado la posibilidad de aprovechar estos residuos para obtener diferentes productos, como materiales adsorbentes.

En este trabajo se utilizará la penca de agave mezcalero como materia prima para la extracción de un material a base de celulosa, el cual se evaluará como material adsorbente para eliminar el color en agua.

La celulosa de penca de agave, derivada de las fibras de agave, ha demostrado una alta capacidad de adsorción, estabilidad química y biodegradabilidad, lo que la convierte en un material atractivo para la remoción de contaminantes en soluciones acuosas. Su estructura porosa y su alta área superficial brindan sitios de adsorción efectivos para una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Ha sido estudiada para la remoción de metales pesados, colorantes, compuestos orgánicos, y otros contaminantes presentes en aguas residuales industriales. Su capacidad para adsorber eficazmente estos contaminantes la convierte en un candidato atractivo para su uso en procesos de tratamiento de aguas residuales.

Las etapas para utilizar la celulosa de penca de agave como adsorbente incluyen la obtención de la celulosa de la penca de agave, su modificación química o física para mejorar sus propiedades de adsorción, y su posterior aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

La investigación en este campo ha demostrado que la celulosa de agave puede ser una alternativa sostenible y efectiva para la remoción de contaminantes, ofreciendo ventajas como su disponibilidad, bajo costo y capacidad de adsorción. Estudios han explorado diferentes aspectos como la cinética de adsorción, equilibrio de adsorción, y la optimización de condiciones para maximizar su eficiencia como adsorbente.

Planteamiento del problema, Justificación, Hipótesis y Objetivos

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Estado de México y en el municipio de Santiago Tianguistenco, existen empresas de giro textil que generan aguas residuales con color y muchas de ellas necesitan modificar o implementar sus procesos de tratamiento para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-2021. La industria textil es el segundo sector más contaminante del agua generando el 20% de todas las aguas residuales. Utiliza 93 mil millones de metros cúbicos de agua al año, suficiente para satisfacer las necesidades de cinco millones de personas. Además, libera medio millón de toneladas de microfibras en el océano anualmente. La producción de una camisa de algodón requiere 4,100 litros de agua, mientras que un par de jeans requieren 7,500 litros. El consumo excesivo de agua en el proceso de producción contribuye al impacto ambiental negativo de la industria. Para abordar este problema, se requiere un tratamiento adecuado de las aguas residuales textiles, utilizando una combinación de tecnologías como el cribado, la homogeneización, la neutralización, los procesos fisicoquímicos, absorción, el tratamiento biológico y la filtración o evaporación adicional para reutilizar el agua (Bolaños, 2010).

Los colorantes son compuestos químicos utilizados para dar color a diversos materiales, incluyendo textiles. En la industria textil, los colorantes se utilizan para teñir las telas y crear una amplia gama de colores y diseños. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los colorantes pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente si no se manejan adecuadamente.

La producción y el uso de colorantes en la industria textil pueden generar una considerable cantidad de aguas residuales contaminadas. Estas aguas residuales a menudo contienen sustancias tóxicas y compuestos químicos que pueden ser dañinos para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Además, los colorantes también pueden ser una fuente importante de contaminación del agua debido a su liberación durante el proceso de lavado de las prendas teñidas.

Para abordar este problema, es crucial que las empresas textiles cumplan con las regulaciones ambientales, como la NOM-001-SEMARNAT-2021 en México, que establece límites para los contaminantes en las descargas de aguas residuales. Estas regulaciones buscan garantizar un manejo adecuado de las aguas residuales textiles, incluyendo el tratamiento adecuado de las mismas antes de su liberación al medio ambiente (De la Peña, 2013).

El Índigo Carmín (IC) es considerado uno de los componentes más contaminantes encontrados en los efluentes de la industria textil. Su uso puede tener efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente, ya que se ha reportado que es irritante para la piel, los ojos y las mucosas. Por lo tanto, es fundamental buscar métodos efectivos de remoción de este colorante para minimizar su impacto en el agua y el suelo.

Por otro lado, la producción anual de agave mezcalero en México y la cantidad de desechos generados durante la producción del mezcal justifican la necesidad de implementar métodos adecuados para la gestión de estos residuos. El mezcal es una bebida alcohólica tradicional que se obtiene del agave, y su producción está en aumento debido a la creciente demanda. Sin embargo, este proceso de producción genera residuos líquidos llamados vinazas y residuos sólidos conocidos como bagazos. Estos desechos pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente, especialmente si no se gestionan correctamente.

Los residuos generados de la producción de mezcal representan un problema de disposición debido a su volumen y composición. Sin embargo, se ha explorado la posibilidad de aprovechar estos residuos para obtener diferentes productos, como materiales adsorbentes.

El bagazo de agave es un material de desecho del proceso de mezcal y tiene una disponibilidad abundante, por lo tanto, las fibras lignocelulósicas del agave tienen el

potencial para ser utilizadas para la remoción de contaminantes en diversas aplicaciones industriales y ambientales.

Por lo tanto, en este trabajo se utilizará la penca de agave mezcalero como materia prima para la extracción de un material a base de celulosa, el cual se evaluará como material adsorbente para eliminar el color en agua.

JUSTIFICACIÓN

Es esencial implementar métodos de gestión de residuos alternativos, como el compostaje y el tratamiento fisicoquímico, para minimizar los impactos ambientales y proteger la calidad del agua y la salud pública. Además, la producción masiva de mezcal en estados como Oaxaca genera una cantidad significativa de bagazo, lo que destaca la importancia de encontrar soluciones sostenibles para su manejo. La correcta gestión de estos desechos contribuirá a preservar los recursos naturales, proteger la salud pública y promover el desarrollo sostenible en la industria del mezcal en México. El bagazo al ser un material lignocelulósico tiene un alto contenido de carbohidratos que pueden ser aprovechados para la producción de aditivos naturales, polímeros, biocombustibles, composta y materiales adsorbentes, con características biodegradables y biocompatibles.

Por otro lado, la problemática del color en las aguas residuales se debe a la presencia de tintes y productos químicos utilizados en diversos procesos industriales y domésticos. Estas aguas residuales presentan una composición extremadamente variable. El problema radica en que el tratamiento convencional de aguas residuales no está diseñado para eliminar eficientemente los colorantes, lo que puede resultar en la liberación de aguas residuales contaminadas con colores intensos en los cuerpos de agua receptores.

Este fenómeno del color en las aguas residuales plantea una serie de desafíos. En primer lugar, los colorantes pueden ser tóxicos y dañinos para los organismos

acuáticos, afectando negativamente la flora y fauna en los cuerpos de agua receptores. Además, la presencia de agua residual coloreada puede dificultar la identificación y monitoreo de otros contaminantes presentes en el agua, lo que dificulta la evaluación de su calidad y la implementación de medidas de mitigación adecuadas.

El agua con color puede ser una señal de la presencia de contaminantes en el agua, como compuestos orgánicos e inorgánicos. Si no se eliminan de manera adecuada, estos contaminantes pueden tener efectos perjudiciales en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana.

La adsorción es un proceso eficiente para eliminar el color y otros contaminantes del agua. Los materiales a base de celulosa, como las cáscaras de frutas o los residuos agrícolas, son especialmente adecuados como bioadsorbentes debido a su alta capacidad de adsorción y disponibilidad. Estos materiales pueden adsorber los compuestos que causan el color y otros contaminantes presentes en el agua, lo que resulta en una mejora en la calidad del agua.

Además de los beneficios ambientales, el tratamiento del agua por adsorción también tiene implicaciones estéticas importantes. El agua con color puede ser visualmente poco atractiva y afectar negativamente la percepción de la calidad del agua. Al eliminar el color y otros contaminantes del agua por adsorción puede mejorar la apariencia del agua, lo que a su vez puede aumentar la aceptación de esta. El tratamiento del agua por adsorción utilizando materiales a base de celulosa como bioadsorbentes es una estrategia efectiva y sostenible para eliminar el color y otros contaminantes del agua. Esto ayuda a proteger el medio ambiente, preservar la calidad del agua y garantizar la salud pública.

La obtención de celulosa a partir de la penca de agave mezcalero mediante un tratamiento químico para evaluar sus propiedades adsorbentes en la eliminación del color del agua es una estrategia justificada por varias razones. En primer lugar, la celulosa es un material natural y renovable, lo que la hace una opción sostenible

para el tratamiento de aguas residuales. Además, el agave mezcalero es ampliamente cultivado en México, lo que significa que hay un suministro abundante de materia prima disponible para su extracción. La celulosa tiene propiedades adsorbentes que le permiten atrapar y remover eficientemente compuestos coloreados y contaminantes presentes en el agua. Esto contribuye a mejorar la apariencia del agua tratada y potencialmente aumentar su aceptación y consumo. Además, el tratamiento puede mejorar con la modificación de parámetros como el tamaño de partícula, pH, tiempo de contacto, concentración y temperatura para optimizar la eficacia del proceso de adsorción.

Con esta investigación se pretende tratar estas dos problemáticas, con la penca de agave resultante del proceso del mezcal realizar un adsorbente que quite el color de aguas residuales de las industrias textiles, sin generar más residuos ya que la parte líquida del proceso se puede fermentar para generar biocombustibles y la parte sólida se puede ocupar en aditivos en fármacos, coagulantes, etc.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Obtener celulosa a partir de la penca de agave mezcalero mediante un tratamiento químico y evaluar sus propiedades adsorbentes para la eliminación de color en agua, tomando en cuenta los parámetros de tamaño de partícula, pH, tiempo de contacto y temperatura.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Obtener y caracterizar la penca de agave.
- b) Extraer celulosa a partir de la penca de agave.
- c) Caracterizar la celulosa obtenida de la penca de agave.
- d) Evaluar las propiedades adsorbentes de la penca de agave y de la celulosa obtenida, tomando en cuenta tamaño de partícula, pH, tiempo de contacto, concentración y temperatura.

HIPÓTESIS

Los tratamientos químicos realizados para obtener celulosa a partir de los residuos de agave de mezcal mejorarán las propiedades adsorbentes de estos para remover de manera eficiente el colorante índigo carmín de agua.

Capítulo 1. Generalidades

1. GENERALIDADES

1.1 Estructura de los materiales lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos son aquellos que están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, se encuentran en plantas como la madera y los residuos agrícolas. Estos materiales presentan una estructura compleja, con elementos fibrosos y una matriz amorfa, lo que los hace particularmente interesantes para aplicaciones de adsorción (Hongzhang, 2015).

En la Figura 1.1 se observa la estructura de los materiales lignocelulósicos, la cual, está constituida por elementos fibrosos (fibras, orientadas longitudinalmente al tronco o tallo de la planta) y no fibrosos (canales de resina, vasos y células parenquimatosas) los cuales tienen las funciones principales de brindar resistencia mecánica, transportar líquidos y almacenar alimento (Sixta, 2006). Estos elementos se componen principalmente de los polímeros de celulosa, hemicelulosas y lignina, además de otros componentes que se encuentran en menor proporción (proteínas, extractivos y minerales inorgánicos). La pared de estos elementos fibrosos está formada por un esqueleto de moléculas de celulosa ordenadas en microfibrilas y fibrilas que están rodeadas por hemicelulosas (funciona como matriz) y lignina (funciona como cementante) (Mussatto, 2016).

La celulosa es el componente estructural principal, mientras que la hemicelulosa actúa como unión entre la celulosa y la lignina. La lignina proporciona rigidez y resistencia a los materiales lignocelulósicos. Estas propiedades los hacen adecuados para su uso en la producción de biocombustibles, enzimas, productos químicos, pulpa y papel, y aplicaciones de refuerzo en sistemas de embalaje sostenible (Wiedenhoeft *et al.*, 2005).

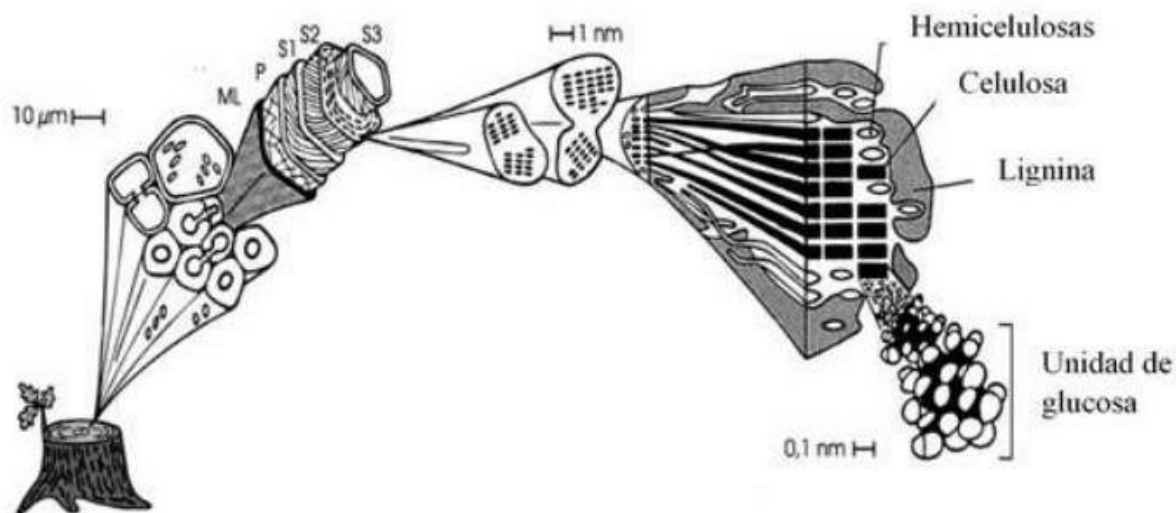


Figura 1.1 Estructura de los materiales fibrosos (Mussatto, 2016).

La celulosa, hemicelulosas y lignina son los principales constituyentes de la pared celular de fibras de plantas. La morfología de fibras depende principalmente de la composición y la organización estructural de estos constituyentes. Sin embargo, contiene compuestos minoritarios no poliméricos que pueden ser de vital importancia para los procesos fisiológicos de la célula. La cantidad y el tipo de estos compuestos pueden influir mucho en procesos industriales.

1.1.1 Celulosa

La celulosa es un polisacárido compuesto de glucosa que se encuentra en las paredes celulares de las plantas, y es el componente principal de las fibras de papel, cartón y textiles. Es el polímero natural más abundante en la Tierra y se extrae de materiales lignocelulósicos como madera, algodón, cáñamo y otras plantas. La celulosa es ampliamente utilizada en la industria para la producción de papel, tejidos, biocombustibles y productos químicos. Además, su estructura fibrosa y su capacidad de adsorción la hacen útil en aplicaciones de purificación de agua y en la fabricación de materiales compuestos (Barbosa de Sousa *et al.*, 2021).

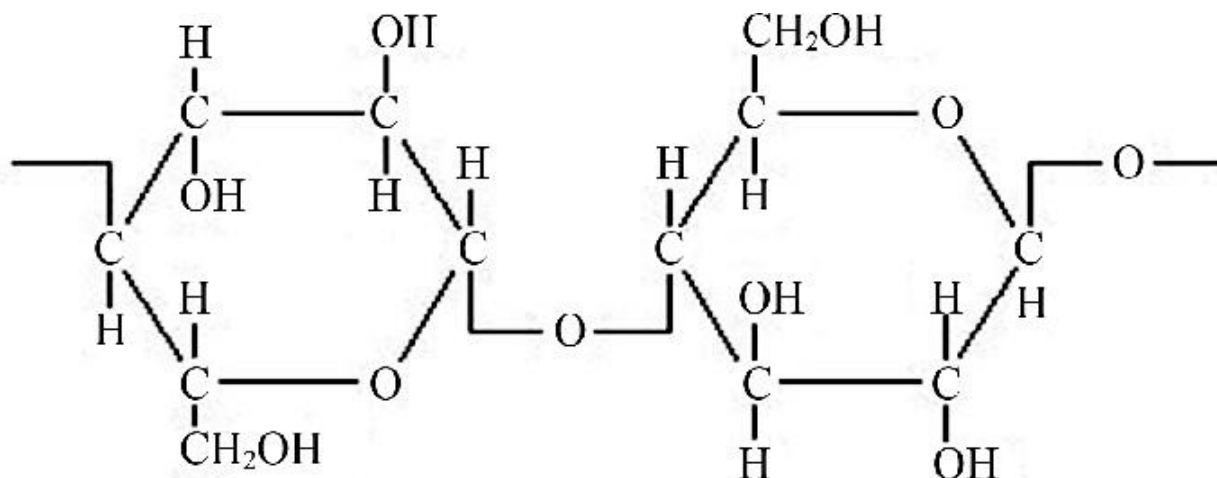


Figura 1.2 Estructura de celulosa (Wertz, 2013).

La molécula de celulosa, como se muestra en la Figura 1.2, contiene entre 5000-10000 unidades de glucosa (grado de polimerización). En el material lignocelulósico, las moléculas de celulosa se encuentran formando enlaces de puente de hidrógeno intra e intermoleculares lo cual produce una estructura rígida y compacta que forman regiones cristalinas (ordenadas) y amorfas (menos ordenadas). Las regiones cristalinas son más difíciles de hidrolizar (enzimática o químicamente) a moléculas de glucosa que las regiones amorfas. La celulosa es insoluble en la mayoría de los solventes (Mussatto, 2016).

1.1.2 Hemicelulosa

La hemicelulosa, como se muestra en la Figura 1.3, es un componente importante de las paredes celulares de las plantas, formado por glucosa y otros azúcares solubles en agua. Representa el 20-35% del peso seco de la madera y tiene un grado de polimerización menor que el de la celulosa. La hemicelulosa es amorfa, suave y atrae más agua debido a su estructura abierta. Está compuesta por una variedad de monómeros de carbohidratos como arabinosa, manosa, galactosa, glucosa y xilosa. Es un polisacárido natural renovable y el segundo componente más abundante de la biomasa lignocelulósica después de la celulosa, y tiene potencial para producir diversos materiales y productos químicos finos. (Gatenholm, 2004).

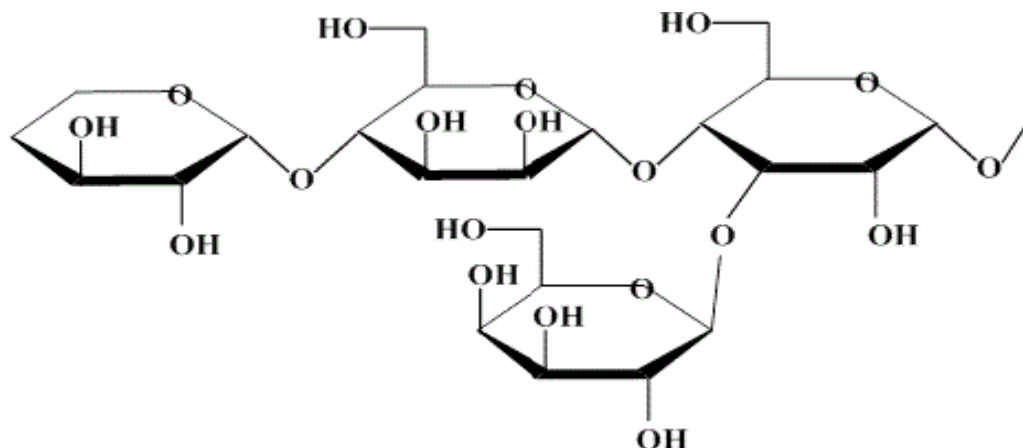


Figura 1.3 Estructura de hemicelulosa (Heldt & Piechulla, 2011).

Son polisacáridos heterogéneos ramificados que en su estado natural tienen una estructura amorfa. Su grado de polimerización es del orden de 200-300. En su estructura química hay principalmente tres clases de moléculas:

- Azúcares simples, hexosas (C6: glucosa, manosa, galactosa) y pentosas (C5: xilosa, arabinosa, ramnosa y fucosa),
- Ácidos urónicos (residuos de ácidos urónico y glucorónicos) y
- Grupos acetilos.

Las hemicelulosas son fácilmente hidrolizables a sus componentes monoméricos (azúcares C5 y C6, ácidos urónico, glucorónicos y acético, principalmente) (Farhat *et al.*, 2017).

1.1.3 Lignina

La lignina (Figura 1.4), es un material orgánico renovable que se encuentra en la biomasa vegetal. Puede ser definida como un material aromático que produce lignina de Klason positiva. La lignina se destaca por su importancia en la degradación de lignocelulosa, ya que proporciona rigidez y fuerza a las plantas. Además, la lignina se puede convertir en combustibles de alta densidad energética, productos químicos y otros productos valiosos. Es un componente clave en la estructura de la lignocelulosa, que también incluye celulosa y hemicelulosa, y es

fundamental en la producción sostenible de biocombustibles y productos bioquímicos (Area, 2012).

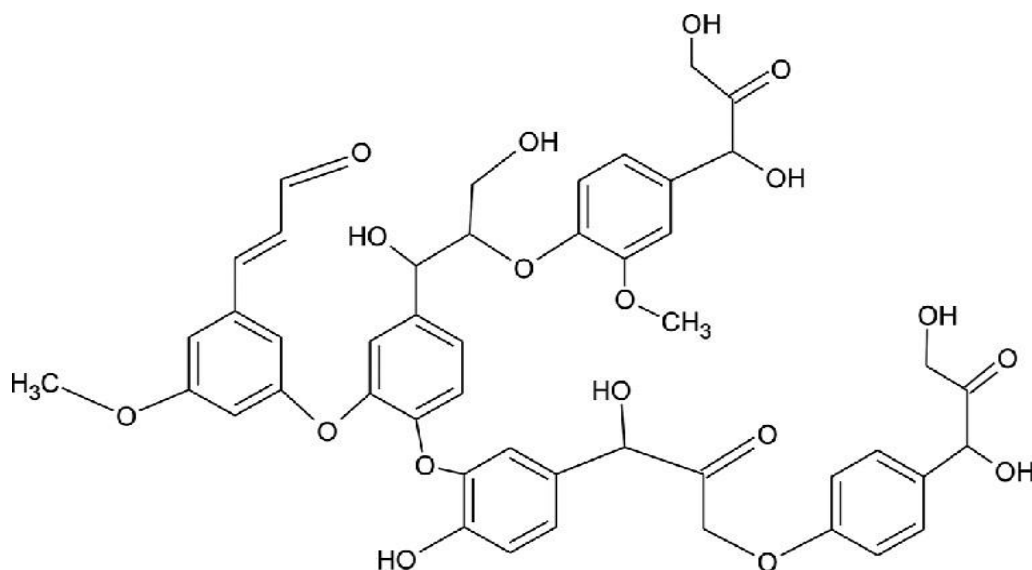


Figura 1.4 Estructura química lignina (Area, 2012).

Las ligninas son el tercer componente mayoritario de los materiales lignocelulósicos, constituyendo de un 20 a un 30% del total en la mayoría de las maderas, y de un 5 a un 15% del total en los residuos agrícolas de las cosechas. Todos los monómeros de las moléculas de lignina no se encuentran unidos de la misma forma: algunos están implicados en varios enlaces, mientras que otros únicamente en uno o dos (Mussatto, 2016).

1.1.4 Fuentes de los materiales lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos provienen de fuentes como desechos agrícolas (paja de arroz, paja de trigo, rastrojo de maíz, madera residual, etc.). Estos son utilizados en biorrefinerías para producir una variedad de productos químicos comopolímeros, productos farmacéuticos y combustibles. La cadena de suministro para las biorrefinerías está influenciada por variables de relevo y requiere control de los interesados para anticipar y facilitar su creación. La purificación de bioetanol, especialmente a partir de fuentes lignocelulósicas, puede realizarse mediante

procesos como la pervaporación y un esquema clásico que implica destilación, despojo de vapor, columna rectificadora y deshidratación para producir etanol anhidro (Oliveira, 2021).

1.2 Producción anual de agave mezcalero en México

De acuerdo con la búsqueda realizada, la producción anual de agave mezcalero en México ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años. En 2014, la producción de mezcal alcanzó aproximadamente 3.9 millones de litros. Sin embargo, para 2021, se estima que la producción anual de agave mezcalero en México ha aumentado a alrededor de 8 millones de litros. Este aumento en la producción refleja el creciente interés y demanda tanto a nivel nacional como internacional por esta tradicional bebida mexicana. Cabe destacar que Oaxaca es el principal estado productor de mezcal en México, generando la mayoría de la producción total (Ríos-Corona, 2016).

1.2.1 Desechos generados de la producción de mezcal

La producción de mezcal en México genera una cantidad significativa de desechos que son perjudiciales para el medio ambiente si no se tratan adecuadamente. La producción de un litro de mezcal genera aproximadamente 17 kilogramos de bagazo húmedo y 10 litros de vinaza, ambos altamente contaminantes y potencialmente tóxicos. En 2021, la producción nacional de mezcal en México generó alrededor de 136,000 toneladas métricas de bagazo húmedo y 80 millones de litros de vinaza, la mayoría de los cuales probablemente fueron vertidos sin tratamiento. Sin embargo, se están desarrollando soluciones para reutilizar estos desechos, como utilizar las hojas de agave como alimento para el ganado, reutilizar la vinaza para reciclaje de envases o biocombustible, y producir pellets de fibra a partir de las hojas de agave para alimentos para mascotas. Estas soluciones no solo protegen el medio ambiente, sino que también crean oportunidades laborales en la industria del mezcal (García Sánchez, *et al*, 2019).

1.3 Pretratamientos de lignocelulosa

La cristalinidad de la celulosa y las incrustaciones de ligninas en las fibras de celulosa hacen que los materiales lignocelulósicos sean compuestos muy estables y resistentes a la biodegradación, presentándose muy inaccesibles a los enzimas. Cualquier modificación de la estructura de la lignina que incremente la eficacia del ataque químico o enzimático es de interés desde el punto de vista industrial. Por lo tanto, a menos que las ligninas sean despolimerizadas, solubilizadas o eliminadas, no será factible la fácil hidrólisis de celulosa y hemicelulosa en bioconversiones que permitan la obtención de productos de interés tecnológico (Mathew *et al.*, 2014).

Los objetivos fundamentales de los pretratamientos son el de modificar las características de estos materiales de modo que se incremente el rendimiento de la hidrólisis posterior, así como:

- a. Reducir la cristalinidad de la celulosa.
- b. Disociar el complejo lignina-celulosa.
- c. Aumentar el área superficial de la fibra de celulosa.
- d. Disminuir en la medida de lo posible la presencia de aquellas sustancias que dificulten el proceso.

Un pretratamiento eficaz debería reunir, además, otras características tales como consumo pequeño de energía, costes de inversión y mantenimiento bajos, uso de reactivos baratos y fácilmente recuperables y posibilidad de aplicación a diversos pretratamientos. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que determinados productos, formados durante el pretratamiento, pueden inhibir bien el crecimiento de microorganismos celulolíticos (cuando los materiales lignocelulósicos pretratados se usan como fuente de carbono) o bien la actividad de los enzimas implicados. En cualquier caso, la función principal de estos tratamientos es abrir la estructura de los materiales lignocelulósicos para mejorar el acceso de los enzimas celulolíticos.

Los métodos de pretratamiento pueden clasificarse, según su naturaleza, en: físicos, químicos y biológicos (Mathew *et al.*, 2014).

1.3.1 Pretratamientos físicos

Los pretratamientos físicos pueden subdividir los materiales lignocelulósicos en partículas finas, más fácilmente susceptibles a la hidrólisis ácida o enzimática, o bien pueden descomponer los sustratos lignocelulósicos al someterlos a fuerzas externas no mecánicas. En este sentido, se consideran dos categorías generales de pretratamientos físicos: mecánicos y no mecánicos:

- Los **pretratamientos mecánicos** utilizan fuerzas cortantes e impactantes para producir un sustrato fino de bajo índice de cristalinidad y elevada superficie específica. Sin embargo, las ligninas permanecen asociadas y siguen actuando como barreras en la accesibilidad del enzima.
- Entre los pretratamientos **no mecánicos** puede incluirse el uso de irradiación, temperatura o vapor de agua. Debido a que la irradiación con electrones da lugar a una amplia despolimerización de los materiales, se ha empleado para mejorar la digestibilidad de pajas y maderas sometidos a la acción de microorganismos procedentes de rumiantes (Mathew *et al.*, 2014).

La utilización de vapor a presión y temperatura elevadas (4 MPa y 185-240 °C, respectivamente) da como resultado la descomposición de algunas hemicelulosas que se convierten en ácidos urónicos y otros ácidos (principalmente acético), capaces de catalizar la reacción de despolimerización de hemicelulosa y lignina. Después del tratamiento con vapor, el residuo puede ser descargado explosivamente mediante una drástica disminución de la presión o vaciado tras un proceso gradual de "bleed-down". Este tipo de pretratamiento es atractivo porque permite el fraccionamiento selectivo de los tres tipos de componentes (celulosa, hemicelulosa y lignina) en un amplio rango de maderas y residuos agrícolas (Mathew *et al.*, 2014). Mientras que la lignina y la hemicelulosa recuperadas pueden

ser transformadas en productos útiles, la celulosa puede ser hidrolizada más fácilmente.

1.3.2 Pretratamientos químicos

Extracción química

Existen diversos métodos químicos para la extracción de celulosa, entre los cuales cabe destacar la hidrólisis ácida o alcalina, método combinado e hidrólisis enzimática. La hidrólisis ácida consiste en la resuspensión de la materia orgánica en agua desionizada con una concentración conocida de ácido, generalmente ácido sulfúrico o ácido clorhídrico. La adición de ácido provoca un cambio en la carga superficial sobre las partículas y estabiliza la suspensión. Tras un determinado tiempo de reacción, se inactiva la reacción y el material extraído es sometido a procesos de separación y lavado para la obtención de la celulosa. El proceso de la hidrólisis alcalina es similar a la hidrólisis ácida, aunque la biomasa previamente desecada es mezclada con soluciones alcalinas (como hidróxido de sodio o potasio) para posteriormente purificar el extracto. El método combinado ha sido empleado para la extracción de celulosa a partir de la biomasa seca. Este consiste en el lavado de la materia con metanol en condiciones determinadas (ácidas, básicas o neutras) para la eliminación de lípidos, seguido del blanqueamiento de los residuos y lavados ácidos y básicos. En cuanto a la hidrólisis enzimática, se somete la biomasa a una solubilización enzimática capaz de disolver componentes celulares que no son fibras, siendo empleadas usualmente xilanasas y lacasas. El residuo de dicha solubilización es filtrado y tratado para la purificación de la celulosa (Moral, 2012).

1.4 Aplicaciones

La celulosa, exhibe un comportamiento elástico al ser aplicada tensión, aunque difiere por poseer un mayor grado de cristalinidad (Moral, 2012). Dada la abundancia de la producción de este polímero, tiene el potencial de ser utilizado para una variedad de aplicaciones. El alto grado de cristalinidad y capacidad de absorción la vuelven un competente ideal para la fabricación de medicamentos e

hidrogeles, con viscosidad regulada, en la industria farmacéutica. Además, puede ser utilizada como excipiente en la fabricación de fármacos (Shokri & Adibkia, 2011; Moral, 2012). En la cosmética, el biopolímero se emplea como gelificante de champús, cremas y lociones. Esto se debe a que la cristalinidad de la celulosa mejora las propiedades de recubrimiento, sedosidad, duración y adherencia a la piel. Una de sus aplicaciones más conocidas es su utilidad en la fabricación de papel, puesto que actúa como una alternativa más favorable al medioambiente en comparación con la extracción, blanqueo y pasteo de lignina (Moral, 2012). Otras aplicaciones mencionadas por Valero-Valdivieso *et al.*, 2013 son: fabricación de membranas y otros medios de separación (con ésteres de celulosa), prendas de vestir y materiales higiénicos desechables (con celulosa regenerada para fibras). Las aplicaciones de la celulosa suelen variar de aquellas de la biomasa de diferentes desechos agrícolas, con que son más específicas, siendo de interés la producción de productos que puedan ser beneficiados por la consistencia de la celulosa.

1.5 Métodos de cuantificación de celulosa

Método de Kurschner y Hoffer

Consiste en pesar 1 g de materia anhidra libre de extractos, se coloca en un matraz, se añade 20 mL de etanol y 5 mL de ácido nítrico concentrado. Se hierve en baño maría a reflujo durante 30 minutos. La solución se pasa por un filtro Gooch de porosidad media y peso conocido. El líquido se desecha y el sólido se somete a una segunda digestión de 30 minutos con 25 mL de etanol-ácido nítrico. Se realiza una decantación como en la etapa anterior y se efectúa una tercera digestión con 100 mL de agua destilada por una hora. La muestra se filtra, se lava con agua destilada caliente y posteriormente con 100 mL de solución saturada de acetato de sodio y por último con 500 mL de agua destilada caliente. El residuo se seca en un horno eléctrico a una temperatura de 105 °C para luego enfriarlo en un desecador de cristal sobre sílica gel y pesarlo.

El porcentaje de celulosa se calcula con la siguiente ecuación:

$$\%Celulosa = \frac{P_{or}}{P_o} * 100\% \quad \text{Ec. 1}$$

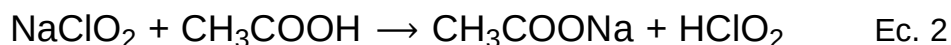
Dónde:

Por: peso seco del residuo (g).

Po: peso anhidro de la muestra (g).

Determinación de holocelulosa

La determinación de la holocelulosa se realiza de acuerdo con el método del clorito (Wise et al., 1946), el cual se basa en la acción del dióxido de cloro cuyos productos de reacción acuosa y caliente hacen que la lignina se separe en forma soluble. El dióxido de cloro se genera in situ utilizando clorito de sodio y ácido acético, las ecuaciones 2 y 3 muestran la síntesis del dióxido de cloro.



1g de la muestra seca y libre de extractivos (M_1) se pesa y se coloca en un recipiente con una solución de 0.3 g de clorito de sodio en 32 mL de agua destilada, a la que previamente se le añade previamente 2 gotas de ácido acético y se pone a reaccionar en un baño de calentamiento a 75°C durante 4 horas. Cada 30 minutos se agitan y cada hora se les añade lentamente 2 gotas de ácido acético y 0.32 g de clorito de sodio.

Una vez enfriados los recipientes a temperatura ambiente, las muestras sometidas a reacción se filtran utilizando papel filtro previamente pesado. Cada una de las muestras se lava con 200 mL de agua caliente (hasta tener color pálido) y

posteriormente con 100 mL de acetona. Con ayuda de unas pinzas se coloca cada papel filtro con muestra dentro de una capsula de aluminio calcinada y previamente pesada (M_2) y se coloca en una estufa a 40°C durante 3 días. Al término del secado, las muestras se colocan en un desecador por 30 minutos y se pesan rápidamente

para evitar la hidratación de la holocelulosa. La ecuación 4 muestra el cálculo para la determinación del porcentaje de holocelulosa.

$$\%Hol = \frac{(M_3 - M_2)}{M_1} * 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

%Hol: Porcentaje de holocelulosa

M₁: Peso de la muestra seca, g.

M₂: Peso de la capsula y del papel filtro.

M₃: Peso de la capsula, papel filtro y muestra después de secado.

Determinación de lignina

La determinación de lignina se realiza de acuerdo con el método ASTM D1106-56 reportado por Colín-Urieta *et al.*, (2007). Para ello se pesa 1 g de muestra seca libre de extractivos (M₁) en un vaso de precipitado de 500 mL, se adicionan 25 mL de ácido sulfúrico al 72 % (v/v) y 2.5 mL de ácido bromhídrico al 40 % (v/v) y se deja reposar por 2 horas agitándola cada 30 minutos.

Posteriormente se le adicionan 100 mL de agua destilada y se hierve durante 5 minutos. La muestra contenida en el vaso de precipitado se filtra con papel filtro previamente pesado, y se lava con agua destilada caliente hasta pH neutro. Con ayuda de pinzas se coloca el papel filtro en una capsula previamente calcinada y pesada (M₂), y se seca a 45 °C durante 24 horas. Al término del secado, las muestras se colocaron en un desecador por 30 minutos. La ecuación 5 presenta el cálculo para la determinación del porcentaje de lignina.

$$\% Lig = \frac{(M_3 - M_2)}{M_1} * 100 \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

% Lig: Porcentaje de lignina.

M₁: Peso de la muestra seca, en g.

M₂: Peso de la capsula y del papel filtro.

M₃: Peso de la capsula, papel filtro y muestra después de secado.

Alfa celulosa

Es un índice que muestra la fracción de celulosa no degradada, de alto peso molecular, en una pasta química blanqueada. Constituye la fracción de la pasta resistente (insoluble) a una disolución de hidróxido de sodio a 17,5% y 9,45% bajo condiciones especificadas.

1.6 Adsorción

La eliminación de color en los efluentes es muy importante para preservar el medio ambiente, ya que incluso una pequeña cantidad de colorante en el agua puede ser tóxico y altamente visible. Dado que la eliminación de tintes en las aguas residuales se ha convertido en un desafío, es necesario tener un proceso que puede eliminarlos de manera eficiente (Mohd et al., 2011). Es por ello por lo que se han desarrollado diferentes técnicas para la remoción de tintes en los efluentes, el color puede ser removido de aguas residuales por métodos fisicoquímicos, adsorción, coagulación, floculación, oxidación, métodos electroquímicos y biológicos (Quintero & Cardona, 2010).

La adsorción es el proceso mediante el cual átomos, iones o moléculas se adhieren a la superficie de un material, formando una película de adsorbato. Es diferente de la absorción, que implica la penetración de un fluido en un líquido o sólido. Hay dos tipos de adsorción: fisisorción y quimisorción. La adsorción se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones industriales como la catálisis, la purificación del agua y el almacenamiento de carbono. Se describen mediante isothermas, que muestran la cantidad de adsorbato en función de la presión o concentración. Hay diferentes modelos de isothermas, como los modelos de Freundlich y Langmuir. Irving Langmuir fue el primero en derivar una isoterma de adsorción en 1918.

La adsorción es uno de los procesos más eficaces de tratamiento de aguas residuales que las industrias emplean para reducir los contaminantes peligrosos inorgánicos/ orgánicos presentes en el efluente (Yagub *et al.*, 2014). Su simplicidad, fácil operación, falta de sensibilidad a contaminantes tóxicos, la no generación de subproductos (Yangang *et al.*, 2014), la obtención de un producto de alta calidad, la economía del proceso, la eliminación casi completa de las impurezas con efectos secundarios insignificantes (Lakshmi *et al.*, 2009) y la posibilidad de operar a concentraciones muy bajas son algunas de sus ventajas (Gómez *et al.*, 2014). La eficiencia de este proceso está relacionada directamente con la selección de un adsorbente adecuado, algunas de las propiedades que estos deben de tener son: volumen de poros accesibles para las moléculas de adsorbato, fácil regeneración, alta superficie específica (Gómez *et al.*, 2014), estabilidad térmica y baja reactividad ácido/base. Estas propiedades dependen del método de preparación, así como el material de partida.

1.6.1 Biosorción

Es un proceso en el que biomoléculas como las proteínas, polisacáridos y otros componentes de los organismos vivos se utilizan para adsorber compuestos químicos, metales pesados o colorantes de soluciones acuosas o gaseosas. Este proceso se ha convertido en una técnica atractiva para el tratamiento de aguas residuales y la remoción de contaminantes del medio ambiente debido a su eficiencia y su carácter respetuoso con el medio ambiente.

La biosorción es un proceso fisicoquímico que incluye los fenómenos de adsorción y absorción de iones y moléculas. La tecnología de biosorción es muy similar a la del carbón activado e intercambio iónico. Esta tecnología principalmente está dirigida a la remoción de metales pesados o metaloides de soluciones diluidas por diferentes materiales de origen biológico (algas, hongos, bacterias, frutos, productos agrícolas y algunos tipos de polímeros) estos materiales se encuentran en gran

abundancia en la naturaleza y su transformación a biosorbentes no es un proceso costoso. La biosorción ocurre cuando los cationes de los metales se unen por interacciones electrostáticas a los sitios aniónicos que se encuentran en la pared celular de los citados materiales biosorbentes. Estos sitios que sirven como centros activos para la biosorción se encuentran ubicados en los grupos carboxilo, hidroxilo, amino, imina, sulfónico, que forman parte de la estructura molecular de la mayoría de los polímeros de origen biológico (Tapia, 2002).

1.6.2 Biosorbentes

Los biosorbentes son materiales derivados de microorganismos, bacterias, hongos, algas marinas, plantas o algunos polímeros naturales. Estos biosorbentes para ser aplicados necesitan ser pretratados químicamente para tener una mejor capacidad de adsorción en los procesos de aplicación como remoción de metales pesados o recuperación de especies metálicas en solución. Los biosorbentes son capaces de adsorber especies iónicas de metales en soluciones acuosas, esta propiedad es bien utilizada en la biorremediación y recuperación de efluentes industriales contaminados con metales pesados.

Para llevar a cabo el proceso de biosorción, el biosorbente es expuesto a la concentración inicial del colorante por un período de tiempo, el estado de equilibrio es el estado predominante para la biosorción del sistema examinado, la concentración final tiene que ser determinada cuando se comparan las concentraciones en el equilibrio (Jeyakumar, 2015).

1.6.3 Mecanismos de remoción

La complejidad que las estructuras biosorbentes presentan, implica que existan diferentes maneras de que los contaminantes sean capturadas. Los mecanismos de biosorción son variados y dependen en cada caso de la sustancia a ser retenida del material sorbente. En muchas ocasiones no son fáciles de explicar los

mecanismos que tienen lugar en un proceso de biosorción. El proceso continua hasta que se alcanza el equilibrio.

El proceso de biosorción, se caracteriza por la retención de las sustancias, en la superficie del biosorbente, esta retención puede darse mediante la interacción de la sustancia a grupos funcionales, que se encuentran en la superficie como carboxilos, hidroxilos, fosfatos, también ocurren procesos de difusión. Son mecanismos de cinética rápida, que no presentan alta dependencia en la temperatura y pueden estudiarse en detalle mediante la utilización de modelos de las isotermas de Langmuir y Freudlich (Jeyakumar, 2015).

Capítulo 2.

Desarrollo Experimental

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las actividades descritas en el diagrama (Figura 2.1) se realizaron en el laboratorio de Instrumental del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco.

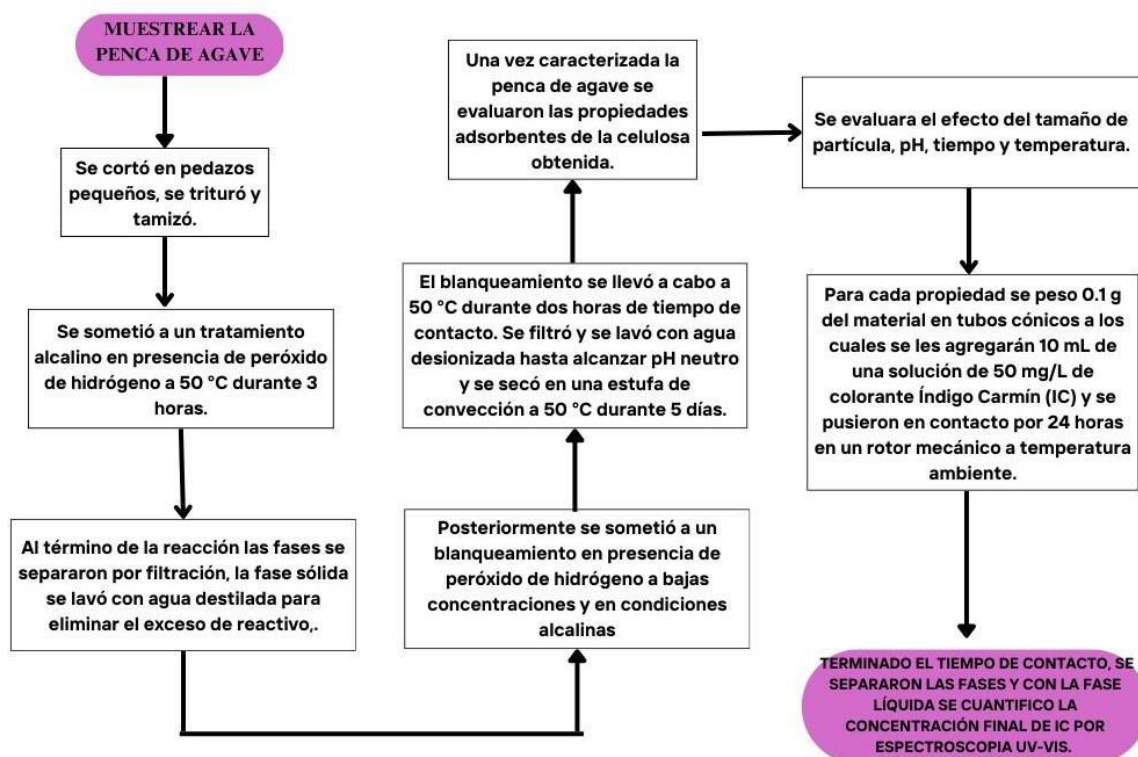


Figura 2.1 Diagrama del procedimiento y descripción de las actividades realizadas para la remoción de IC con celulosa de penca de agave.

2.1 Obtención y acondicionamiento de la penca de agave

La penca de agave se recolecta de una fábrica de mezcal artesanal localizada en el municipio de Tenancingo, Estado de México. Se cortó en pedazos pequeños, los cuales se lavaron con agua destilada, se secaron a temperatura ambiente por dos días y después en un horno de secado a 60 °C por 5 días. Después de molieron y se tamizaron utilizando un tamiz malla 60, 80 y 100.

2.2 Extracción y caracterización de la celulosa obtenida a partir de la penca de agave

La penca de agave se utilizó como materia prima para la producción de un material a base de celulosa, para ello, la penca de agave con corteza y descortezada a diferentes tamaños de partícula (#60, #80 y #100) una vez secas y trituradas se sometieron a un tratamiento alcalino, se mezclaron 20 g de bagazo de agave seco con 400 mL de solución de NaOH 0,375 mol/L y 5 mL de una solución de H_2O_2 8 mol/L. La mezcla se agitó suavemente con la mano para permitir que las fibras de bagazo se hidratarán completamente y luego se colocaron en un baño de agua (LabTech, LSB- 030S) a 50°C durante 3 horas con agitación constante. Al término de la reacción las fases se separaron mediante filtración, el licor se desechó, mientras que la fase sólida se lavó con agua destilada para eliminar el exceso de reactivo y llegar a un pH neutro, posteriormente se secó en una estufa (Terlab, TE-H45D) a 50 °C durante 24 horas. La muestra obtenida se sometió a un blanqueamiento a 50 °C con 50 mL de H_2O_2 2 mol/L y 50 mL de NaOH 0,5 mol/L durante 2 horas de tiempo de contacto. El sólido remanente se recuperó mediante filtración y se lavó con agua desionizada hasta alcanzar pH neutro y se secó en una estufa de convección a 50 °C durante 5 días. Se incluyó una etapa de hidrólisis ácida para aumentar el grado de cristalinidad del material blanqueado y eliminar impurezas inorgánicas. Para esto, se realizó una hidrólisis con la siguiente relación; 1 g de bagazo de agave blanqueado por cada 20 mL de H_2SO_4 (5%v) a 50 °C en un baño maría por 2 horas. Luego, la muestra sólida obtenida se lavó y secó. La penca de agave en su forma natural y con los dos tratamientos recibidos se caracterizó mediante IR-FT y Difracción de rayos-X.

2.2.1 Análisis infrarrojo

Las muestras sólidas bajo estudio se analizaron por infrarrojo. Con el objetivo específico de analizar los grupos funcionales de la penca de agave mezcalero. Los patrones de infrarrojo FTIR varían 640, 16 scans, resolución 4 cm^{-1} .

2.2.2 Análisis de difracción de rayos-X (DRX)

Las muestras solidas bajo estudio se analizaron por difracción de rayos X. Con el objetivo específico de analizar la cristalinidad de la penca de agave mezcalero. Los patrones de difracción de rayos X de los diferentes materiales se obtuvieron con un difractómetro Discovery D8, operado con radiación de cobre $K\alpha$ ($\lambda=1.5418$ Å), 35 KV y tamaño de paso de 0.030.

2.3 Estudio preliminar de los materiales obtenidos

Con los materiales obtenidos se realizó una prueba preliminar de la remoción de índigo carmín, colocando 0.1 g de cada material (penca natural sin corteza, penca natural sin corteza tratamiento 1, penca natural sin corteza tratamiento 2, penca natural con corteza, penca natural con corteza tratamiento 1, penca natural con corteza tratamiento 2) en tubos cónicos de 15 mL, con 10 mL de una solución de 50 mg/L del colorante, los cuales se pusieron en agitación por 24 horas en un rotor mecánico a 40 rpm, después de terminado el tiempo de contacto, las fases se separaron y a la fase líquida se le cuantificó índigo carmín por UV-Vis a una longitud de onda de 610 nm.

2.4 Evaluación de las propiedades adsorbentes de la celulosa de la penca de agave

Los materiales que mostraron la mayor capacidad de adsorción durante los experimentos preliminares se utilizaron para evaluar el efecto de diferentes parámetros sobre la eficiencia de remoción de IC.

2.4.1 Efecto del tamaño de partícula

Los materiales en su forma natural se molieron y tamizaron en tres tamaños de partícula diferentes, malla No. 100, 80 y 60. De cada tamaño de partícula se pesaron por triplicado 0.1 g del material en tubos cónicos de 15 mL, a los cuales se les agregó 10 mL de una solución de 50 mg/L de colorante Índigo Carmín (IC) y se pusieron en contacto por 24 horas en un rotor mecánico a temperatura ambiente, terminado el tiempo de contacto, se separaron las fases y a la fase líquida se le cuantificó la concentración final de IC.

2.4.2 Efecto del pH

Se pesaron 0.1 g celulosa de agave por triplicado con el tamaño de partícula que removi6 mejor al colorante, de acuerdo al apartado anterior, en tubos c6nicos de 15 mL, a los cuales se les agreg6 10 mL de soluciones de 50 mg/L de colorante IC a diferentes pH (2, 4, 6, 7, 8 y 10) y se pusieron en contacto por 24 horas en un rotor mecánico a temperatura ambiente, terminado el tiempo de contacto, se separaron las fases y con la fase líquida se cuantific6 la concentraci6n final de IC por espectroscopia UV-Vis.

2.4.3 Efecto del tiempo

Se pesaron 0.1 g por triplicado de celulosa de agave en tubos c6nicos de 15 mL, a los cuales se les agregaron 10 mL de soluci6n de 50 mg/L de colorante 6ndigo ajustada al mejor pH y se pusieron en contacto a diferentes tiempos (5, 10, 15, 20, 30 min, 1, 3, 5, 8, 12, 24 y 48 horas) en un rotor mecánico a temperatura ambiente, terminado el tiempo de contacto, se separaron las fases y con la fase líquida se cuantific6 la concentraci6n final de IC.

2.4.4 Efecto de la temperatura

Se pesaron en tubos c6nicos de 15 mL, muestras de 0.1 g de celulosa de agave, y se colocaron en contacto con 10 mL de una soluci6n de concentraci6n inicial de 50 mg/L del colorante IC, esto por triplicado, a diferentes temperaturas de 20, 30, 40 y 50 °C en un tanque de calentamiento con control de temperatura por un tiempo de 24 horas. Al t6rmino del tiempo anterior se separaron las fases por filtraci6n y a la fase líquida se le cuantific6 la concentraci6n final del colorante IC.

Capítulo 3.

Resultados y discusión

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Obtención y acondicionamiento de la penca de agave

La penca de agave se recolecta de una fábrica de mezcal artesanal localizada en el municipio de Tenancingo, Estado de México. La penca de agave se cortó como se muestra en la Figura 3.1, después en las instalaciones del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, se cortó en pedazos pequeños para facilitar su molienda mecánica y su posterior tamizado, para continuar con los tratamientos.



Figura 3.1. Recolección de la penca de agave mezcalero.

3.2 Síntesis y caracterización de la celulosa obtenida a partir de la penca de agave

Para evaluar si había alguna diferencia en la obtención de celulosa debido al descortezado de la penca, se realizaron los dos tratamientos (tratamiento alcalino, hidrólisis) utilizando penca con corteza y descortezada, el material que se observa en la Figura 3.2 a (PAGn-CC) se obtuvo después de moler y tamizar la penca con corteza. A partir del material anterior se realizaron los dos tratamientos para obtener la celulosa, estos materiales se observan en las Figuras .2 b y c, los cuales se denominaron PAGn-CCT1 y PAGn-CCT2 respectivamente.



Figura 3.2. a) Penca de agave natural con corteza, b) Penca de agave con corteza-tratamiento 1 (hidrólisis alcalina) y c) Penca de agave con corteza- tratamiento 2 (hidrólisis ácida)

La penca descortezada se cortó en pedazos pequeños para después molerlo y obtener el material que se observa en la Figura 3.3 a (PAGn-SC). A partir del material anterior se realizaron los dos tratamientos para obtener la celulosa, estos materiales se observan en las Figura 3.3 b y c, los cuales se denominaron PAGn-SCT1 y PAGn-SCT2 respectivamente.

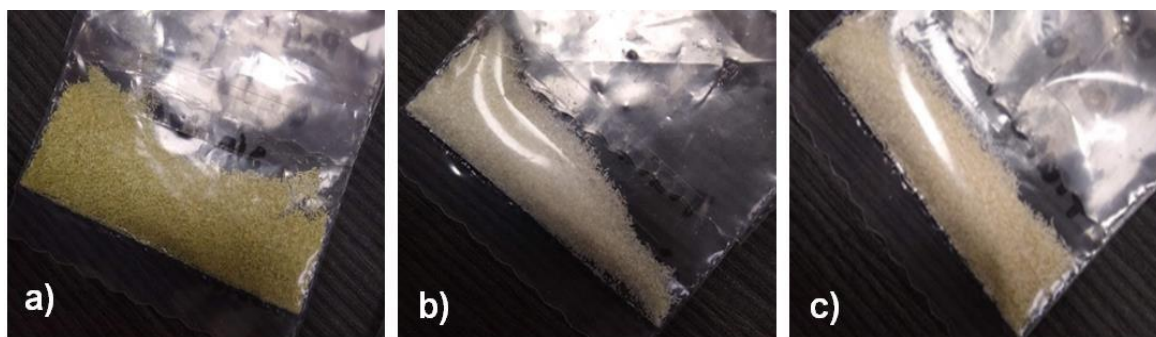


Figura 3.3. a) Penca de agave natural sin corteza, b) Penca de agave sin corteza-tratamiento 1 y c) Penca de agave sin corteza-tratamiento 2.

Los cambios que se observaron en la penca natural con y sin corteza con respecto a los materiales tratados (tratamiento 1 y tratamiento 2) con corteza y sin corteza, fueron que las partículas de los materiales sin corteza tenían un tamaño más grande, en comparación con los materiales con corteza. También se observó un cambio en el color de los materiales, la penca de agave natural sin corteza presenta un color verde claro y la penca de agave con corteza un verde oscuro (Figuras 3.2 a y 3.3 a).

Cuando la penca de agave mezcalero sin y con corteza reciben los dos tratamientos propuestos para obtener la celulosa se observa que la penca de agave sin corteza produce materiales fibrosos de color beige con ambos tratamientos (Figura 3.3 b y c) y la penca de agave con corteza produjo materiales particulados de color verde con ambos tratamientos (Figura 3.2 b y c).

Análisis de espectros infrarrojos de PAG-CC y PAG-SC.

Los espectros de infrarrojo de la penca de agave con y sin corteza modificados con los tratamientos 1 y 2, así como las muestras naturales se analizaron mediante espectroscopia FTIR, dichos espectros se muestran en un rango de valores de longitud de onda de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} , como se muestra en las figuras 3.4 y 3.5.

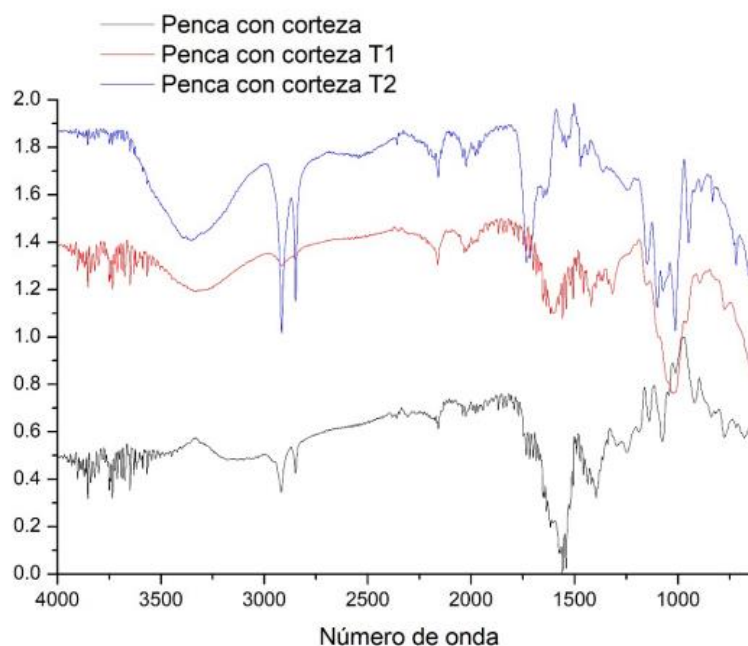


Figura 3.4 Espectro FTIR de PAGn-CC, PAGn-CCT1 y PAGn-CCT2.

El pico de 895 cm^{-1} se atribuye al enlace glucosídico de tipo β presente en la celulosa. El pico que aparece en los espectros de todas las muestras en 1313 cm^{-1} se atribuyó a la vibración de los enlaces C-C y C-O de la parte aromática de la lignina. El pico observado en 1240 cm^{-1} se asociaron al grupo C=O de la hemicelulosa. (Ying Liu, et al, 2018).

El espectro de la muestra PAGn-CCT2 mostró la presencia de una banda de vibración aproximadamente a 1700 cm^{-1} , la cual no se observó en los otros espectros de la penca con corteza.

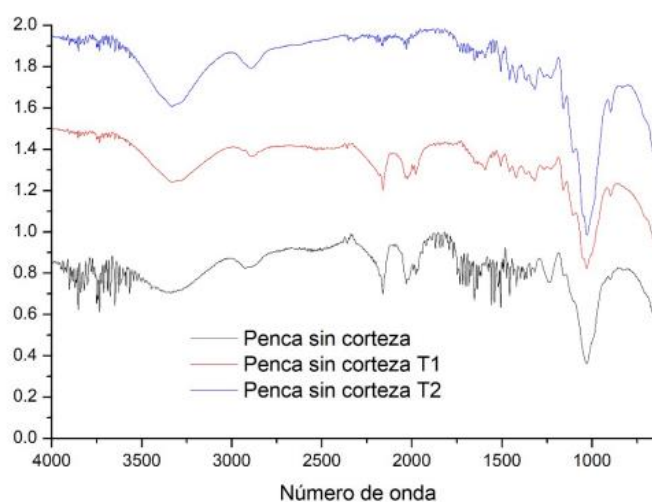


Figura 3.5 Espectro FTIR de PAGn-SC, PAGn-SCT1 y PAGn-SCT2.

El pico de hemicelulosa ubicado en 1240 cm^{-1} mostró mayor intensidad en la muestra PAGn-SC, comparada con los tratamientos, lo cual sugiere que el tratamiento fue eficiente para eliminar la hemicelulosa de las muestras. La zona de 1200 a 1000 mostró una purificación de la celulosa a medida que pasaron los tratamientos.

La tabla 1 contiene los números de onda más representativos con su respectivo grupo funcional y polímero.

Tabla 1. Bandas de absorbancia IR-FT en el estudio de penca de agave mezcalero.

Número de onda (cm^{-1})	Asignación/grupo funcional	Polímero
895	β enlace glucosídico	Celulosa
1068	C – O – C	Celulosa
1240	C = O	Hemicelulosa
1313	C – C C – O	Lignina
1595	Anillo aromático Vibración + C=O estiramiento	Lignina
2922	C – H	Celulosa
3322	O – H	Celulosa

Análisis de difracción de rayos X PAGn-SC y PAGn-SCT2.

Los espectros de XRD de la penca natural sin corteza se muestra en la figura 3.6.

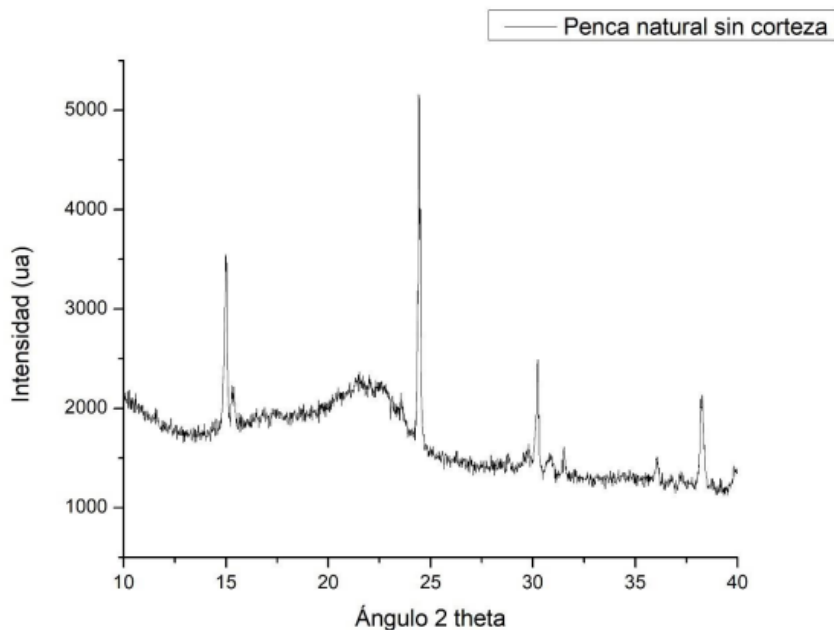


Figura 3.6 Patrones de difracción de rayos X de penca de agave natural sin corteza.

Los espectros de XRD de la penca con el tratamiento 2 sin corteza se muestran en la figura 3.7.

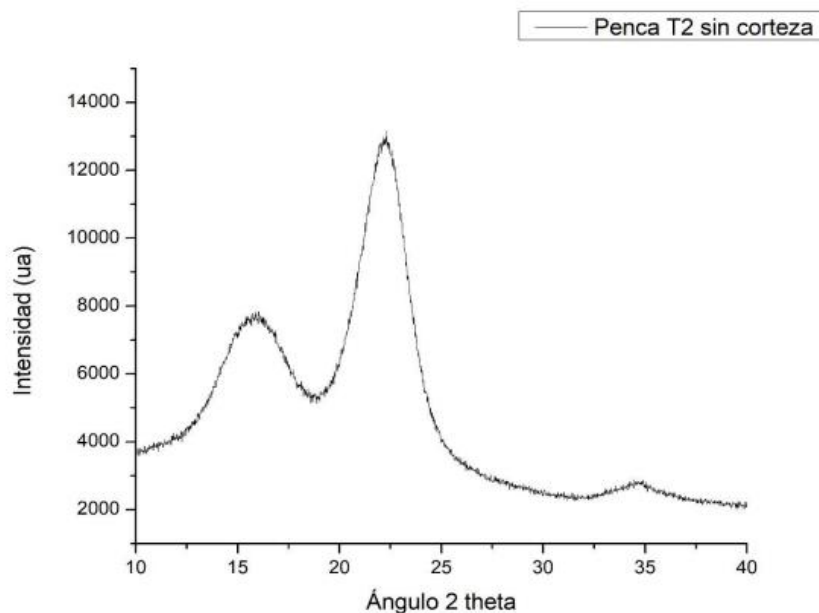


Figura 3.7 Patrones de difracción de rayos X de penca de agave con tratamiento 2 sin corteza.

Los dos tipos de muestras mostraron 3 picos característicos de celulosa a 16.3°, 22.3° y 34.7°. Los resultados indicaron que la estructura de la penca de agave natural tuvo cambios significativos en presencia del hidróxido de sodio, peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico.

En la figura 3.6 se observan 4 picos delgados, los cuales son característicos de los oxalatos de calcio, los cuales desaparecieron al estar en contacto con el ácido sulfúrico. En la figura 3.7 los picos de la celulosa se distinguen con mayor facilidad ya que fueron eliminados oxalatos y alcanzó una cristalinidad más pura.

3.3 Evaluación preliminar de índigo carmín

Las pencas de agave naturales con corteza y sin corteza, y los materiales obtenidos con los dos tratamientos (hidrólisis alcalina, hidrólisis ácida) se evaluaron preliminarmente para remover el colorante índigo carmín de soluciones acuosas y elegir el material que mayor eficiencia tuviera para estudiar a fondo algunas variables del proceso de sorción tales como: tamaño de partícula, pH, tiempo de contacto y temperatura.

De acuerdo con los resultados que se observan en la Figura 3.8, la penca de agave sin corteza (PGn-SC), removi6 30% de colorante índigo carmín a partir de una solución de 50 mg/L, de acuerdo con los tratamientos que se le aplicaron a la penca de agave sin corteza una vez seca y tamizada, al ser sometida a un tratamiento alcalino en presencia de peróxido de hidrógeno modificada con el tratamiento 1 (PGn-SCT1) y modificada con el tratamiento 2 (PGn-SCT2), los resultados indican que el tratamiento no es tan efectivo para remover el colorante IC, debido a que sólo remueve un 20% aproximadamente y el material al cual, se le realizó el segundo tratamiento (hidrólisis ácida) denominado PGn-SCT2, removi6 alrededor de un 35%.

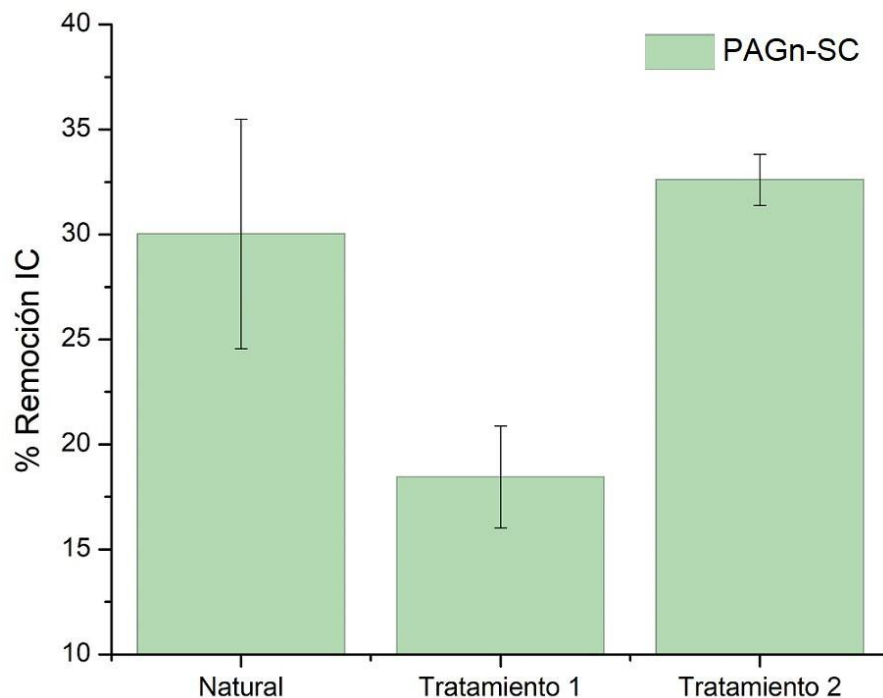


Figura 3.8 Remoción de IC con los materiales de penca de agave sin corteza.

En la Figura 3.9, se muestran los resultados de la remoción preliminar de los materiales de penca agave con corteza (natural, tratamiento 1 y tratamiento 2), y estos muestran una mayor remoción del colorante índigo carmín con respecto a los materiales sin corteza ya que duplicaron el porcentaje de remoción. La penca de agave con corteza natural (PAGn-CC) remueve alrededor del 95%, el material modificado con el tratamiento 1 (PAGn-CCT1) remueve alrededor del 68% y el material modificado con el tratamiento 2 (PAGn-CCT2) remueve alrededor del 80%.

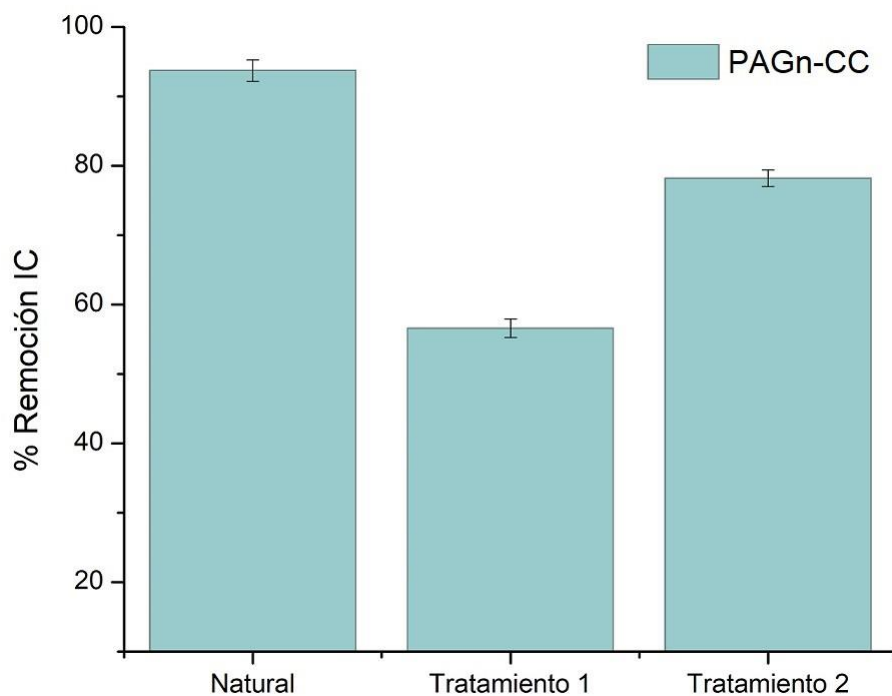


Figura 3.9 Remoción de IC con los materiales de penca de agave con corteza

3.4 Efecto del tamaño de partícula

Se realizó la evaluación del efecto del tamaño de partícula del material en la remoción del colorante índigo carmín. A la penca de agave con corteza, una vez seca y tamizada a diferentes tamaños de malla (100, 80 y 60), se le realizaron los tratamientos 1 y 2, y se observaron cambios físicos con respecto al color del material en su forma natural con respecto a cada material tratado y con diferente tamaño de partícula, como se muestran en la Figura 3.10, pasa de un color verde seco del material natural a un color verde lima de los materiales modificados con el tratamiento 1 y un verde manzana de los materiales modificados con el tratamiento 2.

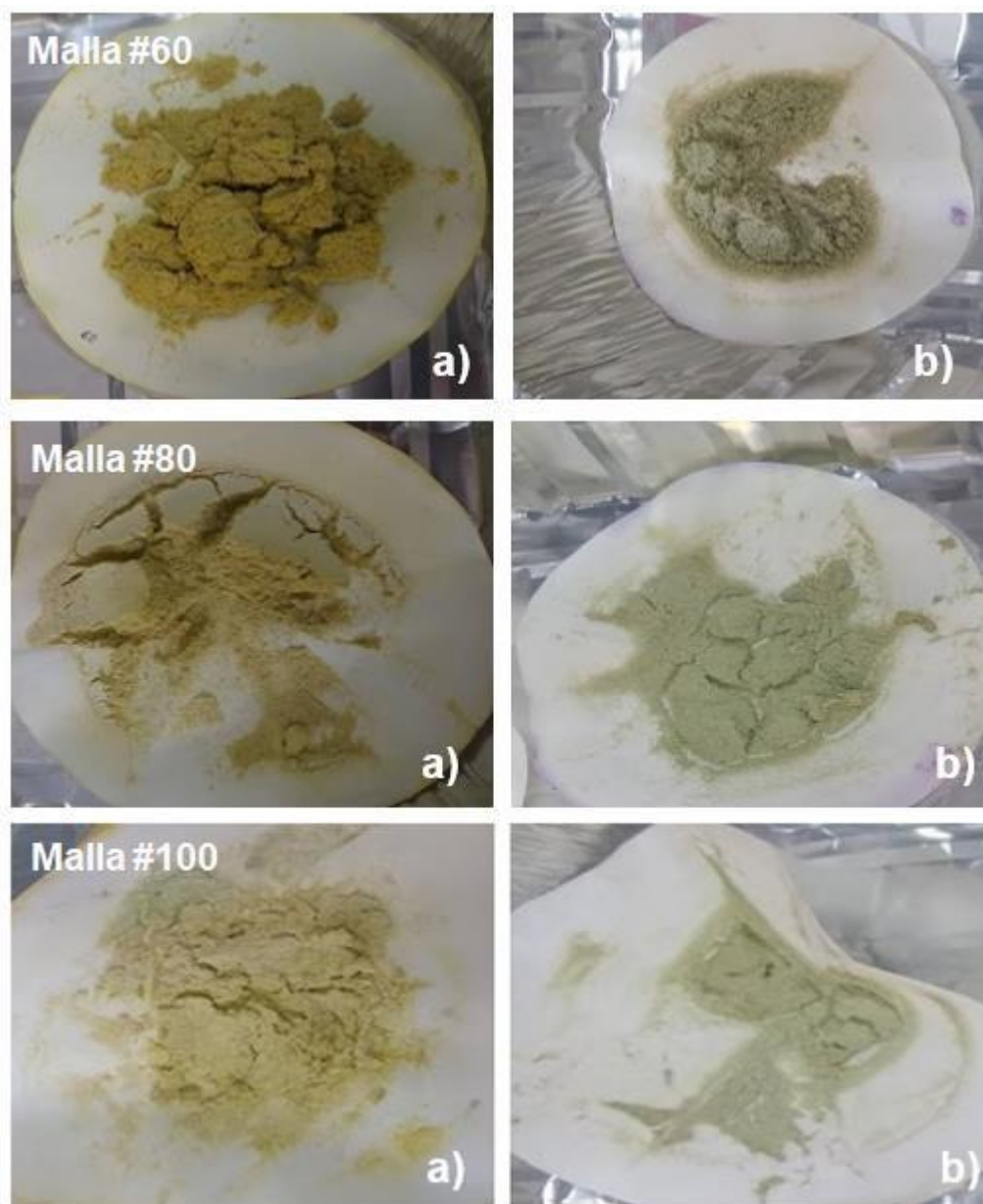


Figura 3.10 a) Penca de agave con corteza, tratamiento 1, malla #60, #80 y #100; b) Penca de agave con corteza, tratamiento 2, malla #60, #80 y #100.

Todos los materiales tratados y con diferente tamaño de partícula, se pusieron en contacto con el colorante índico carmín (IC), para evaluar si el tamaño de partícula tiene algún efecto en la remoción del contaminante en estudio. En la Figura 3.11, se observa que el material PAG-CC en su forma natural remueve aproximadamente un

70% de IC, el material modificado con el tratamiento 1 remueve alrededor del 10% y el material modificado con el tratamiento 2 remueve alrededor del 95%.

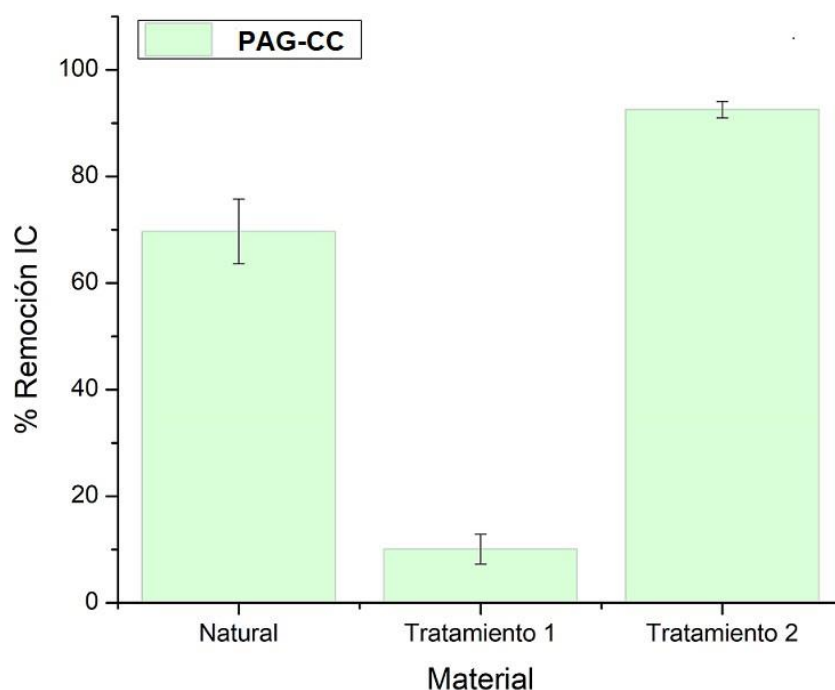


Figura 3.11 Porcentaje de remoción de IC con PAG-CC de tamaño de partícula #60.

En la Figura 3.12 se muestra el porcentaje de remoción de la penca de agave con corteza con tamaño de partícula #80 y se observa que el material natural remueve aproximadamente 60%, el material modificado con el tratamiento 1 remueve alrededor del 35% y el material modificado con el tratamiento 2 remueve alrededor del 96%.

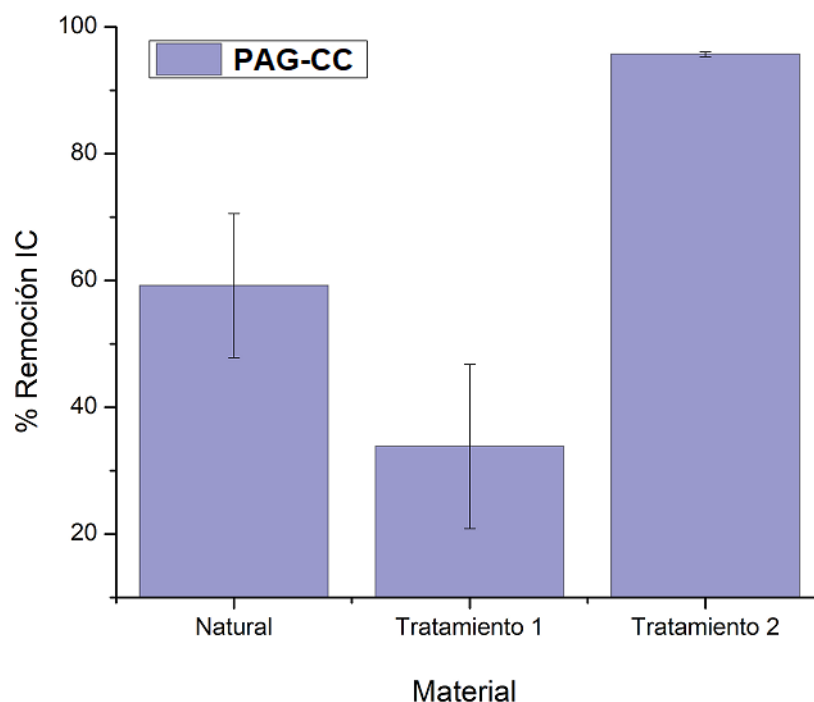


Figura 3.12 Porcentaje de remoción de IC con los materiales de PAG-CC de tamaño de partícula #80.

En la Figura 3.13 se muestra el porcentaje de remoción del IC con la penca de agave con corteza con tamaño de partícula #100, y se observa que el material natural remueve aproximadamente 80%, el material modificado con el tratamiento 1 remueve alrededor del 50% y el material modificado con el tratamiento 2 remueve alrededor del 97%. Por lo tanto, el tamaño de partícula del material si es un factor en la remoción del colorante, para los siguientes experimentos donde se evalúa el efecto de pH, tiempo y temperatura se utilizará la penca de agave con corteza modificada con el tratamiento 2 y tamaño de malla #100, debido a que es el material que presenta una mayor eficiencia en la remoción de colorante en solución acuosa.

Otros autores también estudiaron el efecto del tamaño de partícula de los residuos de la seda del maíz en la remoción de los colorantes azul reactivo 19 (RB19) y rojo reactivo 218 (RR218), el tamaño de partícula que se evaluó fue de 250 a 500 μm y obtuvieron una remoción del 98%, sin embargo, no observaron que este tuviera un efecto significativo en la remoción de los colorantes (Değermenci *et al.*, 2019).

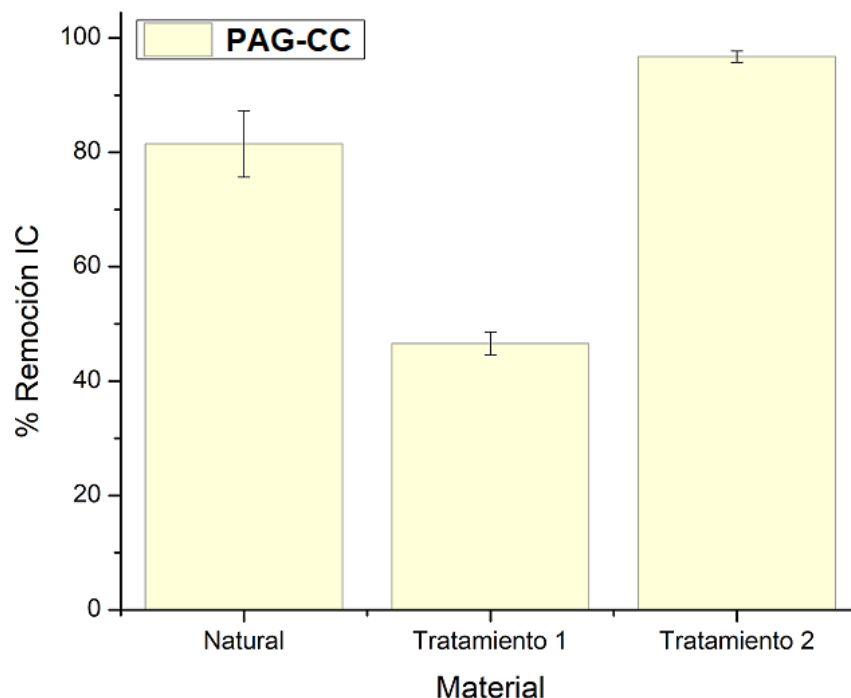


Figura 3.13 Porcentaje de remoción de IC con los materiales de PAG-CC de tamaño de partícula #100.

3.5 Efecto del pH

Se realizaron soluciones del colorante índigo carmín a diferentes pH de 2, 4, 6, 7, 8 y 10, las cuales se adicionaron a la penca de agave natural (PAG-n) y penca de agave con corteza modificada con el tratamiento 2 (hidrolisis ácida) denominado PAG-CCT2, para determinar si el pH tiene un efecto en la remoción del contaminante en estudio.

En la Figura 3.14 se muestra el porcentaje de remoción del colorante índigo carmín con la penca agave natural (PAG-n), se observa que el pH si tiene un efecto en la remoción del contaminante, siendo los pH 4 y 7 donde se tiene una mejor eficiencia con 51% y 36% respectivamente de porcentaje de remoción de índigo carmín.

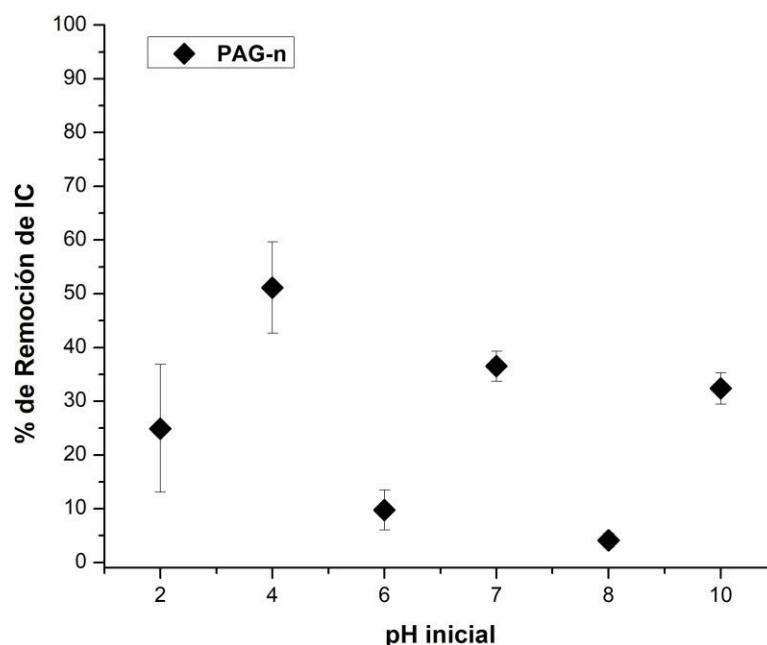


Figura 3.14 Porcentaje de remoción de IC con PAG-n a diferentes pH.

Los resultados del efecto del pH en la remoción de índigo carmín con la penca de agave modificada con el tratamiento 2 (PAG-CCT2), se observan en la Figura 3.15, donde se verifica que este remueve mayor cantidad de índigo carmín que la penca de agave natural, los pH que más se destacan son pH 4 con un 93%, pH 7 con 95% y pH 10 con un 96% de remoción del colorante IC.

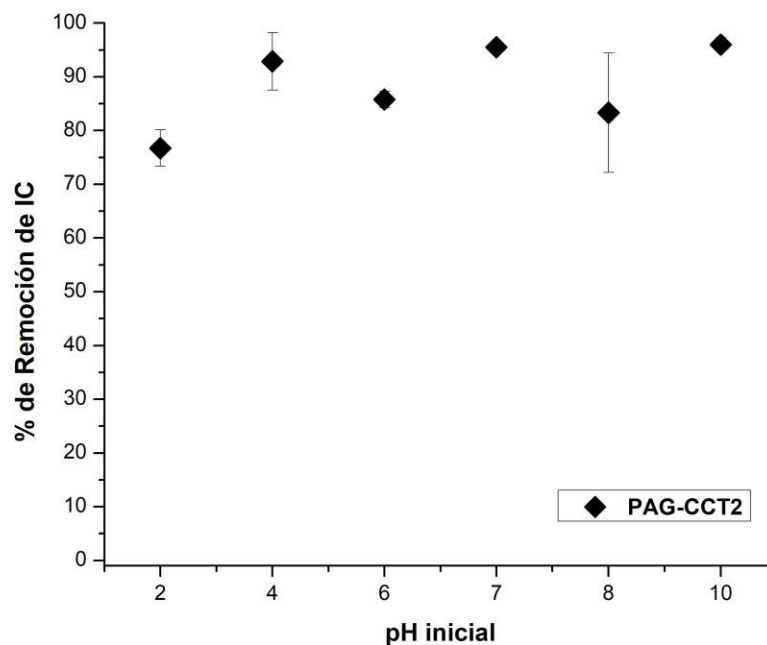


Figura 3.15 Porcentaje de remoción de IC con PAG-CCT2 a diferentes pH.

De acuerdo con los resultados obtenidos del pH inicial en la adsorción del colorante cristal violeta con de cáscara de nuez pecana (PN), cáscara de castaña (PCH), corteza de araucaria (AB) y cactus de palma (PC), los pH óptimos para la remoción de dicho colorante con los materiales fueron los siguientes pH 2 para la cáscara de nuez pecana, pH 4 para la cáscara de castaña, pH 8 para corteza de araucaria y 10 cactus de palma (Pang *et al.*, 2019), resultados que concuerdan con los obtenidos en este trabajo que a pH 4 en donde se tiene mayores porcentajes de remoción.

3.6 Efecto del tiempo

Los materiales de agave con corteza natural (PAG-n) y agave con corteza modificado con el tratamiento 2 (PAG-CCT2) se pusieron en contacto con una solución de índigo carmín a diferentes tiempos de 5, 10, 15, 20, 30 min, 1, 3, 5, 8, 12, 24 y 48 horas, para determinar el tiempo de equilibrio, es decir el tiempo donde el material ya no remueve más contaminante.

En la Figura 3.16 se muestra el comportamiento cinético de la remoción de índigo carmín con la penca de agave con corteza natural, y se observa que a partir de los 5 minutos a una hora la remoción es rápida y después a partir de 3 horas esta comienza a ser lenta hasta observarse que a partir de las 24 horas se ha llegado a un equilibrio.

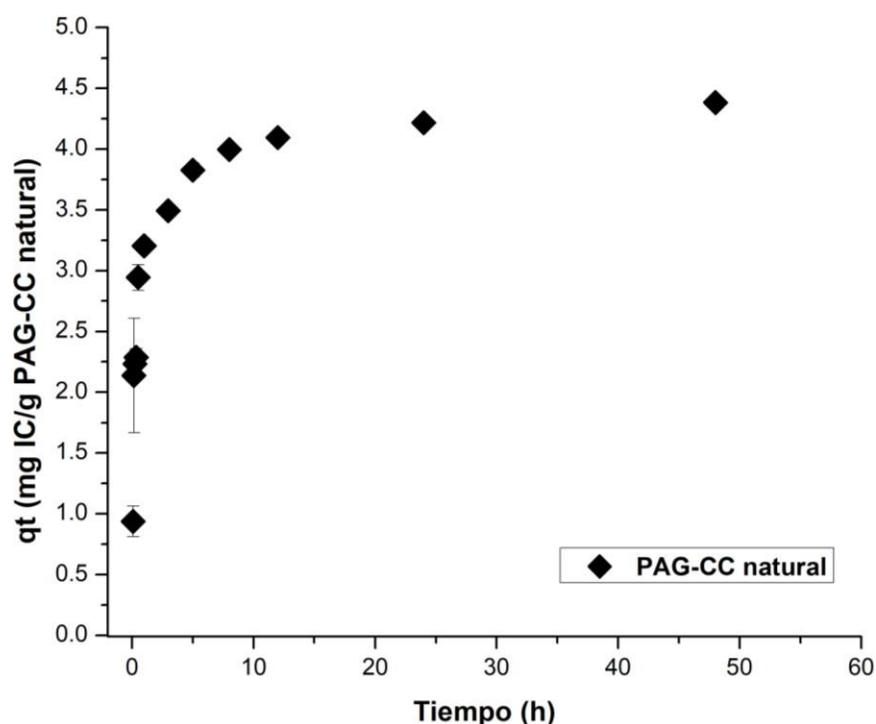


Figura 3.16 Comportamiento cinético de la remoción de IC con PAG-n.

El comportamiento cinético de la penca de agave con corteza y modificada con el tratamiento 2 se observa en la Figura 3.17, se observa también que a partir de los 5 minutos se remueve alrededor de 2.5 mg de índigo carmín por g de PAG-CCT2, removiendo una cantidad mayor que el material PAG-n y a partir de 3 horas la remoción comienza a ser lenta hasta observarse que a partir de las 24 horas se ha llegado a un equilibrio.

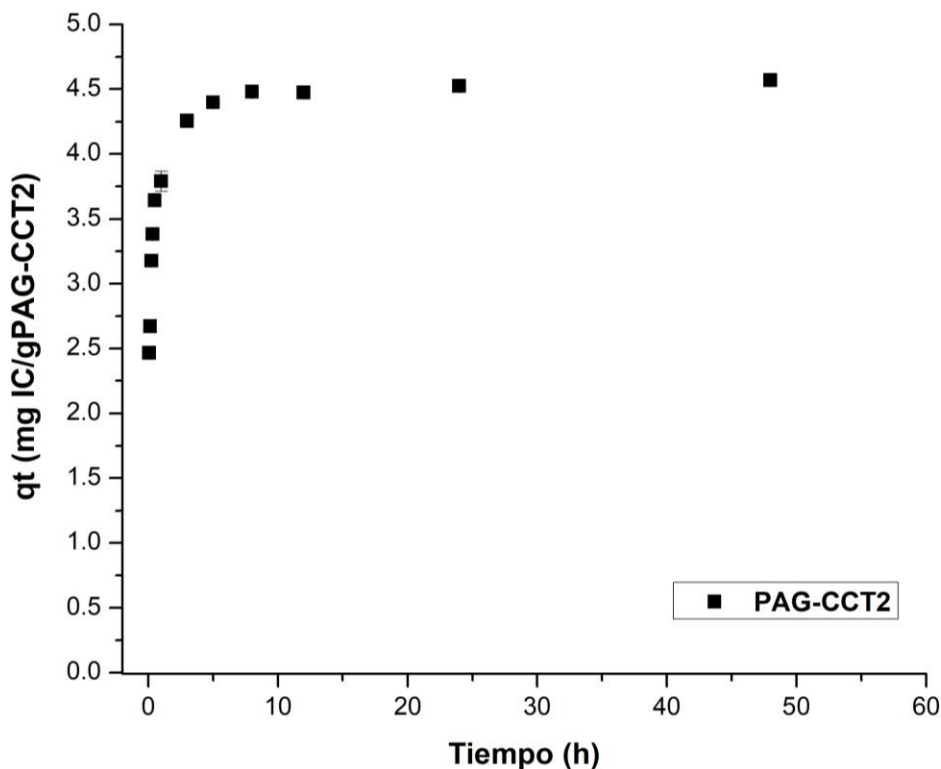


Figura 3.17 Comportamiento cinético de la remoción de IC con PAG-CCT2.

Por lo tanto, el tiempo si tiene un efecto en la remoción de índigo carmín para ambos materiales, a mayor tiempo mayor remoción.

Shanmugarajah y colaboradores (2019), extrajeron nanocelulosa cristalina (NCC) de residuos de biomasa de palma aceitera para remover azul de metileno y también observaron en el estudio cinético una eliminación rápida en los primeros minutos y posteriormente se estabilizó a medida que la disponibilidad de los sitios activos en NCC disminuyó a medida que pasaba el tiempo, alcanzando el equilibrio a los 180 min.

3.7 Efecto de la temperatura

En la Figura 3.18 se muestra el porcentaje de remoción de índigo carmín con la penca de agave con corteza natural a diferentes temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C) en un tanque de calentamiento con control de temperatura por un tiempo de 24

horas, se observa que la temperatura si tiene un efecto en la remoción de IC con a penca natural siendo las temperaturas de 17 y 50 °C donde se muestran los mejores rendimientos 81 y 75 % de remoción respectivamente.

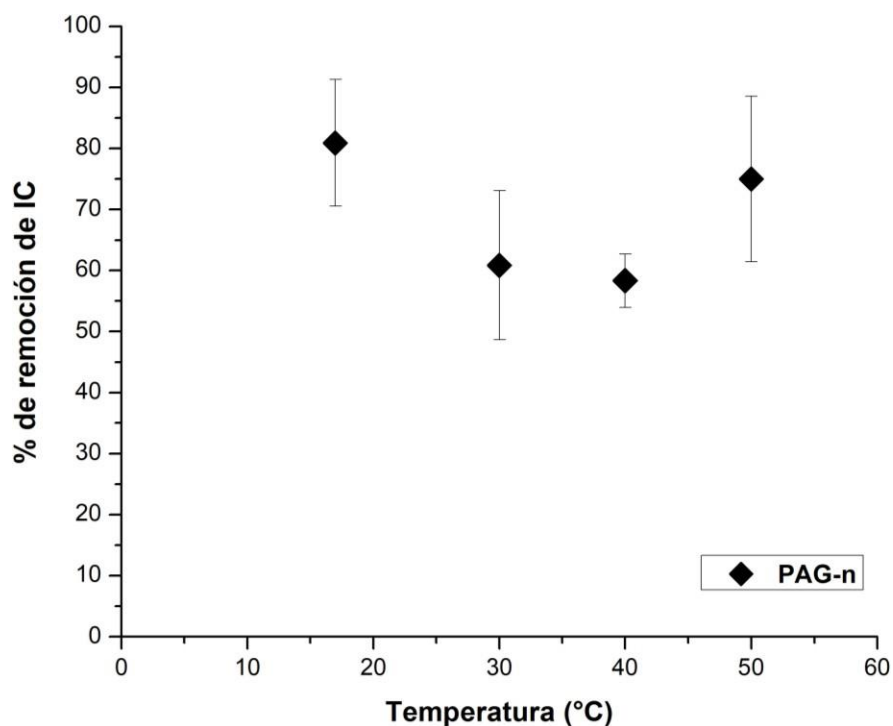


Figura 3.18 Efecto de la temperatura en la remoción de IC con PAG-n.

También se evaluó el efecto de la temperatura para la remoción de índigo carmín con la penca de agave con corteza y modificada con el tratamiento 2, al igual que el material natural se observa que a 17 y 50 °C se tienen los mejores resultados de remoción con 99% de remoción en ambas temperaturas (Figura 3.19).

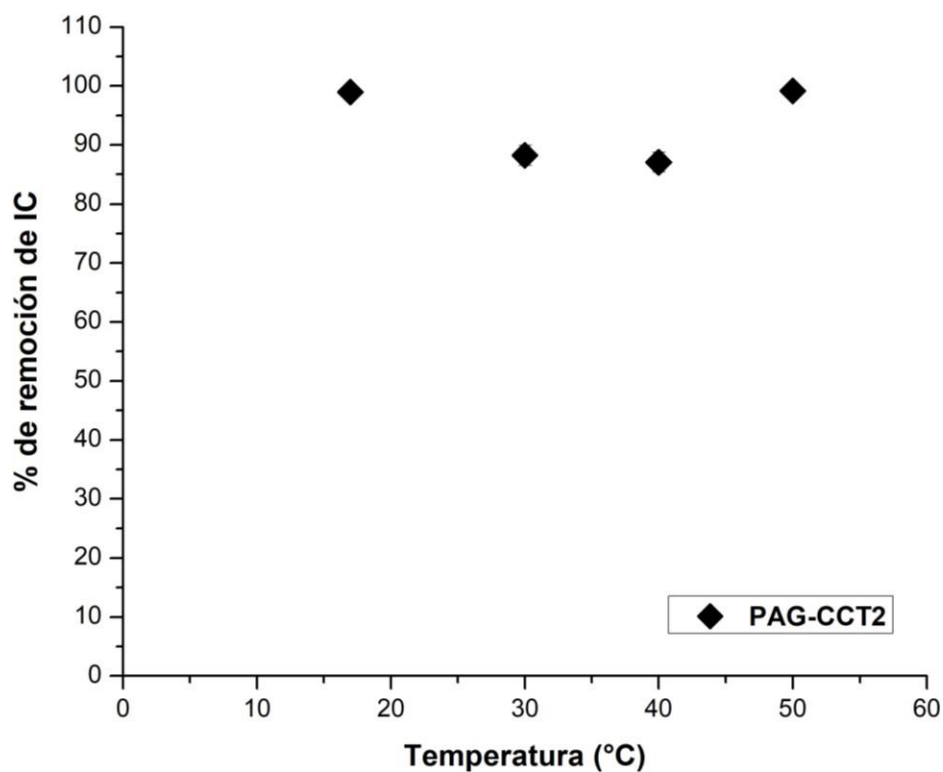


Figura 3.19 Efecto de la temperatura en la remoción de IC con PAG-CCT2.

Comparando los resultados con los resultados obtenidos por Değermenci *et al.*, en 2019, se observa que a medida que la temperatura aumenta de 25 a 55° C la eficiencia de eliminación fue 84.3% y 85.2% para los colorantes azul reactivo 19 (RB19) y rojo reactivo 218 (RR218) respectivamente.

Conclusiones

CONCLUSIONES

- a. Al someter la penca de agave con corteza al tratamiento 2, se observaron cambios en el color del material, así como una mejora en la remoción del IC.
- b. Se comprobó el potencial de la penca de agave con corteza para la remoción del colorante en soluciones acuosas, alcanzando una remoción del 95 % de IC presente en la solución de 50 mg/L, un tiempo de contacto de 24 horas y un tamaño de partícula #100.
- c. Al evaluar los diferentes pH en el proceso de sorción, se concluyó que se observa un efecto significativo en el material natural, en el material modificado, en el cual no se observa un efecto significativo respecto a la remoción del colorante IC.
- d. Para ambos materiales se encontró un tiempo de equilibrio de 24 hora para la remoción del colorante índigo carmín.
- e. La temperatura si tiene un efecto de remoción en ambos materiales, siendo las temperaturas de 17 y 50 °C, donde se tiene una mayor remoción de índigocarmín.
- f. Con base a los porcentajes de remoción obtenidos, se puede considerar la penca de agave con corteza como material lignocelulósico para la producción de celulosa y su aplicación para la eliminación del colorante IC.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

- Durante la extracción de celulosa a partir de la penca de agave es recomendable ajustar bien el pH a 7 después de cada tratamiento, para que no haya diferencias de remoción del colorante.
- Aunque se corroboró la obtención de celulosa en las muestras de estudio, es necesario llevar a cabo otros análisis instrumentales para poder caracterizar la celulosa obtenida. Asimismo, pruebas fisicoquímicas son aconsejables para comprobar el grado de pureza de la celulosa.
- Realizar las pruebas por triplicado para observar que tanto pueden cambiar los resultados por muy mínimos que sean.
- Cambiar el ácido sulfúrico por ácido fosfórico, para realizar la activación en el tratamiento 2.
- Evaluar el efecto de tiempo, concentración y temperatura para la sorción de IC, ya que por falta de tiempo no se pudieron llevar a cabo.

Referencias

REFERENCIAS

Aji P. Mathew, *et al.* 2014. "Extraction of Cellulose and Preparation of Nanocellulose from Various Sources". *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Volumen: 53. Número: 9. Páginas: 3491-3505. DOI: 10.1021/ie4035312

Barbosa de Sousa, *et al.* (2021). Effect of water and alkali on purification bacterial cellulose membrane from Kombucha. *Research, Society and Development*. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23267>

Bolaños R.A. 2010. Propuesta de recuperación del agua residual proveniente de la Industria Textil. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de El Salvador.

Buscio V. 2015. Tratamiento y reutilización de efluentes de la industria textil mediante técnicas de membranas. Departamento de Ingeniería Textil y Papelera. Universitat Politècnica de Catalunya.

Cuaderno Tecnológico Nº 18: Gestión de los Efluentes de la Industria Textil. V. López y M. Crespi, 2015. Instituto de Investigación Textil y Cooperación Industrial de la Universidad Politécnica de Cataluña.

De la Peña, M.E.; Ducci, J.; Viridiana, Z. *Tratamiento de Aguas Residuales en México, Nota Técnica # IDB-TN-521*; Banco Interamericano de Desarrollo: Washington, DC, USA, 2013; p. 42. Available online: <https://webimages.iadb.org/publications/spanish/document/Tratamiento-de-aguas-residuales-en-M%C3%A9xico.pdf> (accessed on 3 June 2021).

Değermenci, G. D., Değermenci, N., Ayvaoğlu, V., Durmaz, E., Çakır, D., & Akan, E. (2019). Adsorption of reactive dyes on lignocellulosic waste; characterization, equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Cleaner Production*, 225, 1220-1229.

Doherty, T. V., Mora-Pale, M., Foley, S. E., Linhardt, R. J., & Dordick, J. S. (2011). Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers. *Industrial Biotechnology*, 7(4), 223-232.

Farhat, W., Venditti, R., Quick, A., Taha, M., Mignard, N., Becquart, F., Ayoub, A., 2017. Hemicellulose extraction and characterization for applications in paper coatings and adhesives. *Ind. Crop. Prod.* 107, 370-377.

García, A., Martínez, J., López, M., & Ramírez, C. (2021). Gestión de residuos y tratamiento de aguas residuales en la producción de mezcal: una perspectiva sostenible. *Revista de Ingeniería y Tecnología Ambiental*. Volumen: 25. Páginas: 87-98

García-Sánchez J.L., M. A. Gómez-Rodríguez y R. G. García-Coronado (2019)."Evaluación de la contaminación ambiental generada por la industria mezcalera en la región de los Altos de Jalisco". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 257-268.

Gatenholm, P., & Tenkanen, M. (2004). Hemicelluloses: Science and Technology. ACS Symposium Series.

Heldt, H.W., Piechulla, B., 2011. Plant biochemistry. Elsevier, Göttingen and Rostock.

Hongzhang Chen. (2015). Lignocellulose Biorefinery Engineering. Woodhead Publishing. Pages 1-17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100135-6.00001-6>.

H. Sixta, Handbook of Pulp. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2006

Jeyakumar, D., & Sathishkumar, M. (2015). Biosorption of heavy metals by *Bacillus thuringiensis*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(2), 225-230.

J. L. Ríos-Corona, E. J. Trejo-Téllez, E. G. Pimienta-Barrios, y M. E. Valdez-Cepeda. (2016). El agave mezcalero en México" - Revista Mexicana de Ciencias

Agrícolas. Disponible en:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000300007&lng=es&tlng=es

Moral, A. 2012. Microalgas para la extracción de celulosa de alta pureza. Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA2012). Recuperado de: <https://studylib.es/doc/6979280/microalgas-para-laextracci%C3%B3n-de-celulosa-de-alta-pureza-...>

M. C. Area and M. E. Vallejos, Biorrefinería a partir de residuos lignocelulosicos. Editorial Academica Española, 2012.

M. T. Oliveira, F. A. Oliveira, J. M. F. Ferreira, and A. E. Rodrigues. Engineering tools for biorefineries: A review of lignocellulosic material utilization. (2021). Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen: 137. Páginas: 110627.

S. C. Joshi, S. K. Sharma, and D. C. Saxena. Lignocellulose treatment for bioethanol production: Advances and perspectives. (2014). Fuente: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volumen: 32. Páginas: 713-724.

S. I. Mussatto, Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery. Elsevier Inc., 2016.

Pang, X., Sellaoui, L., Franco, D., Dotto, G. L., Georgin, J., Bajahzar, A., ... & Li, Z. (2019). Adsorption of crystal violet on biomasses from pecan nutshell, para chestnut husk, araucaria bark and palm cactus: experimental study and theoretical modeling via monolayer and double layer statistical physics models. *Chemical Engineering Journal*, 378, 122101.

Shanmugarajah, B., Chew, I. M., Mubarak, N. M., Choong, T. S., Yoo, C., &

Tan, K. (2019). Valorization of palm oil agro-waste into cellulose biosorbents for

highly effective textile effluent remediation. *Journal of Cleaner Production*, 210, 697-709.

Tapia N. “Adsorción y Biosorción, mecanismo y principales modelos para describir el fenómeno de biosorción”, Proyecto Palma PUCP, 3, 5 y 6 de agosto 2002,35-50.

Univisión Noticias. El costo ambiental de estar a la moda, una industria que afecta gravemente nuestra biodiversidad. 11 de febrero de 2021.

Wahlström, N.; U. Edlund; H. Pavia; G. Toth; A. Jaworski; A. Pell; F. Choong; H. Shirani; K. Nilsson; A. Richter. 2020. Cellulose from the green macroalgae *Ulva lactuca*: isolation, characterization, optotracing, and production of cellulose nanofibrils. *Cellulose*. 27: 3707-3725. DOI: 10.1007/s10570-020-03029-5

Wiedenhoeft, Alex C.; Miller, Regis B. 2005. Structure and function of wood. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Fla., CRC Press, 2005: pages 9-33.

Ying Liu, et al. (2018). Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from pomelo peel. *Interntionl Journl of Bioogical Macromolecules*.

Z. Wang, et al, (2017). *Carbohydr Polym* 157, 945-952.

Anexos

ANEXOS

Análisis de espectros infrarrojos de *PAG-CC* y *PAG-SC*.

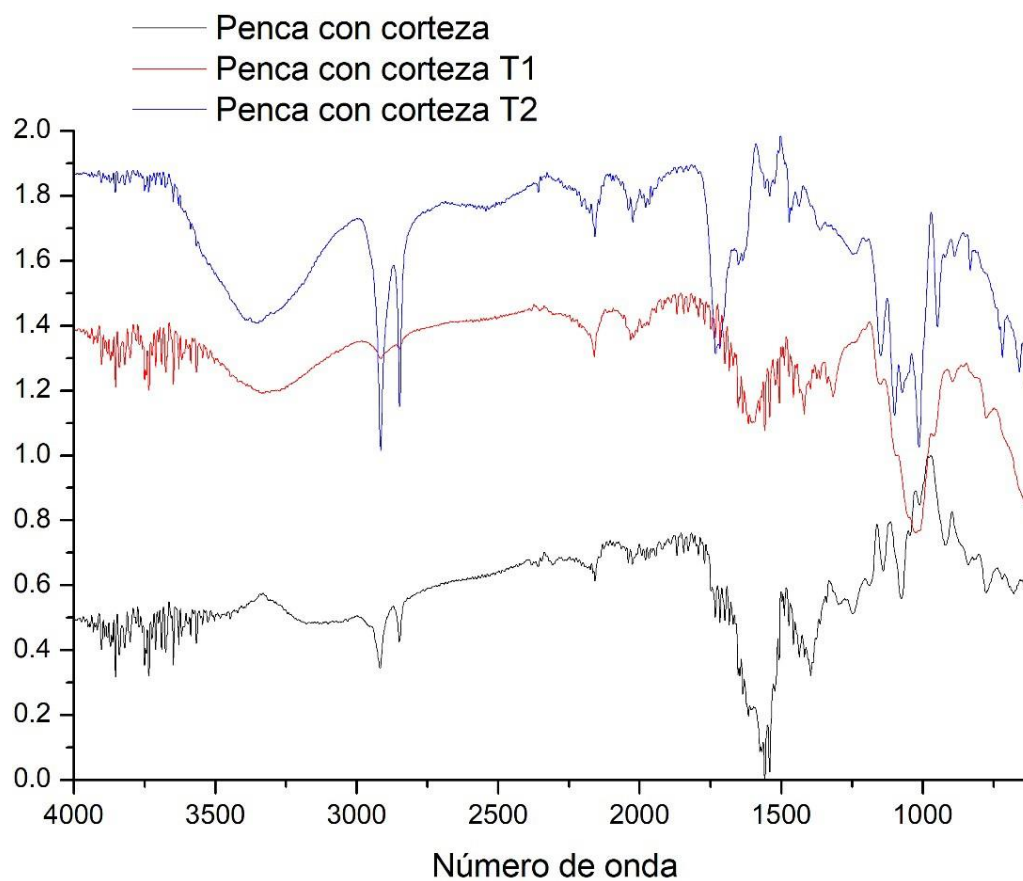


Figura 1. Espectro FTIR de *PAGn-CC*, *PAGn-CCT1* y *PAGn-CCT2*.

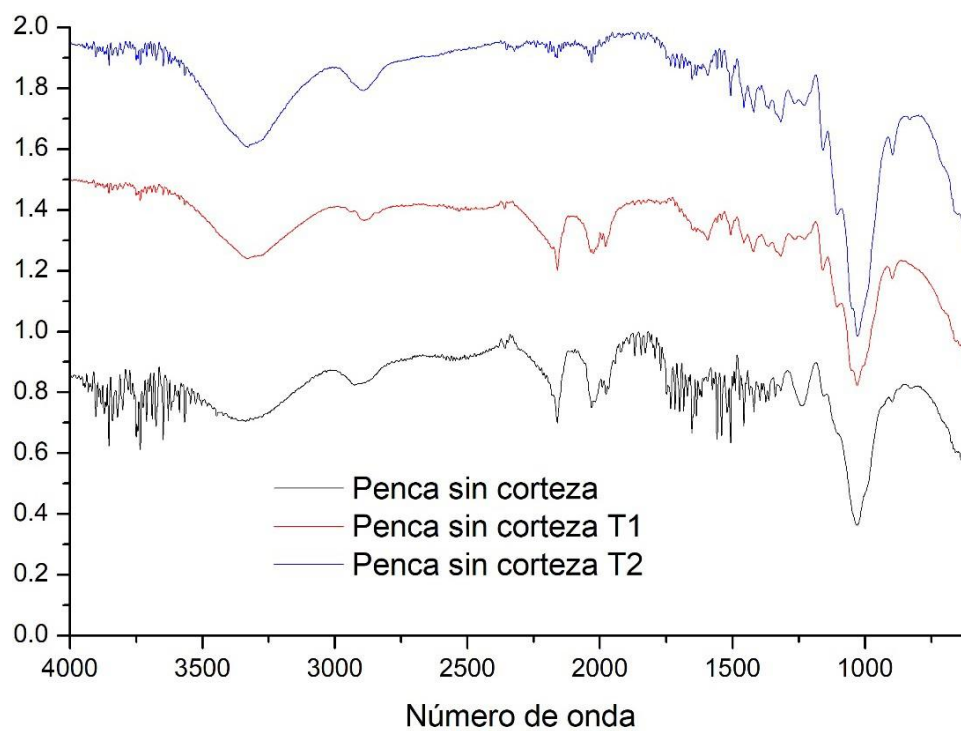


Figura 2. Espectro FTIR de PAGn-SC, PAGn-SCT1 y PAGn-SCT2.

Tabla 1. Bandas de absorbancia FTIR en el estudio de penca de agave mezcalero

Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación/grupo funcional	Polímero
895	β enlace glucosídico	Celulosa
1068	C – O – C	Celulosa
1240	C = O	Hemicelulosa
1313	C – C C – O	Lignina
1595	Anillo aromático Vibración + C=O estiramiento	Lignina
2922	C – H	Celulosa
3322	O – H	Celulosa

Análisis de difracción de rayos X *PAGn-SC* y *PAGn-SCT2*.

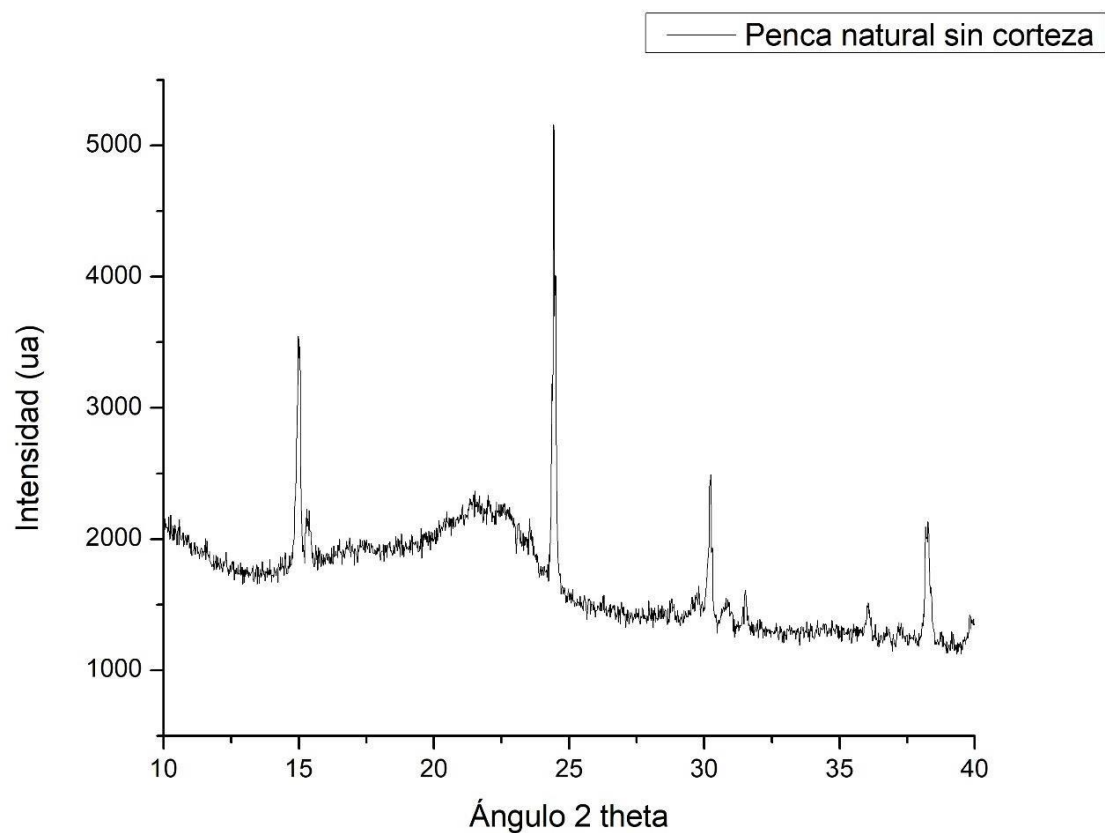


Figura 3. Patrones de difracción de rayos X de penca de agave natural sin corteza.

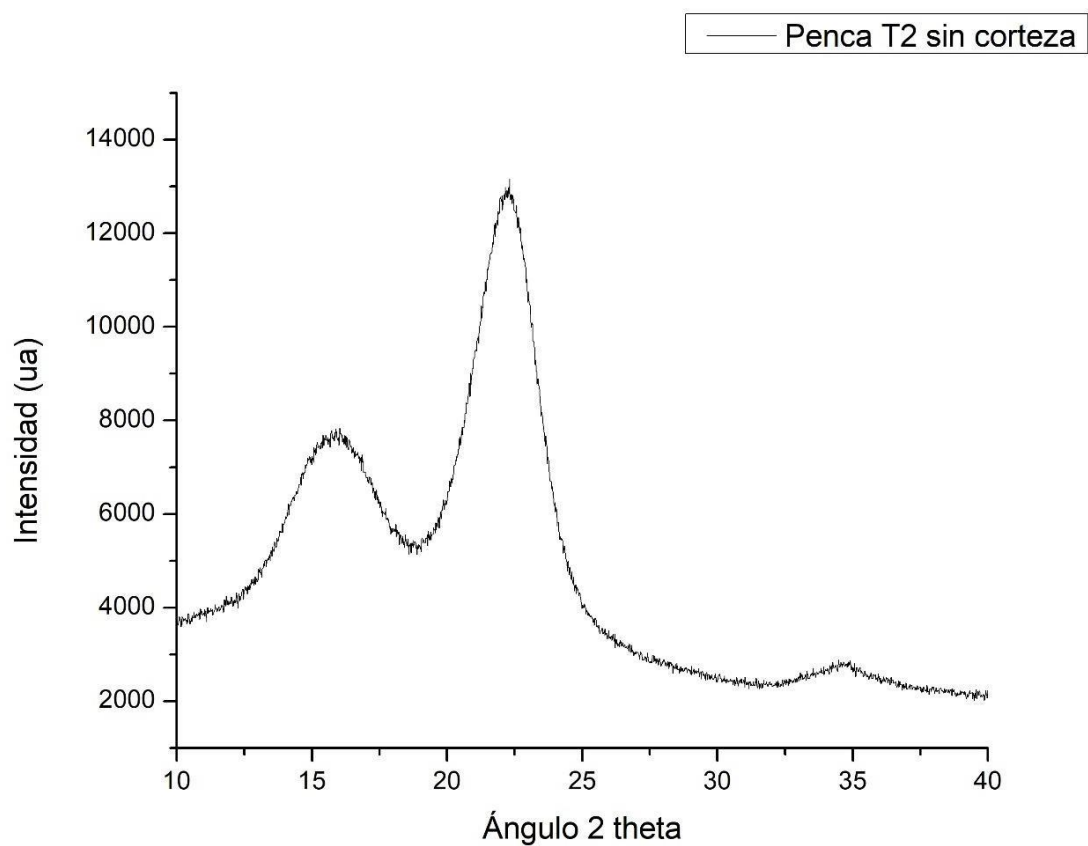


Figura 4. Patrones de difracción de rayos X de penca de agave con tratamiento 2 sin corteza.