



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

**AISLAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA
LIGNOCELULÓSICA DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA
PRODUCCIÓN DE MEZCAL**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

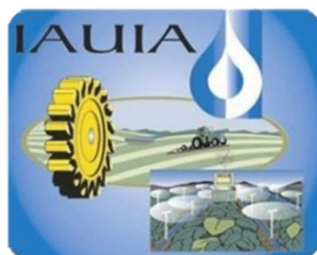
**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

Presenta:

YULINALI VALENTE MORALES

Bajo la supervisión de:

CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA, DR.



Chapingo, Estado de México, octubre de 2025

AISLAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL

Tesis realizada por el C. Yulinali Valente Morales bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

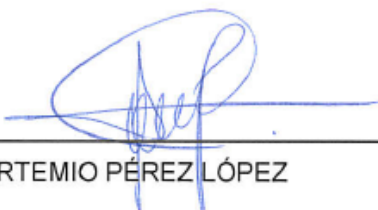
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



DR. CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA

CODIRECTOR:



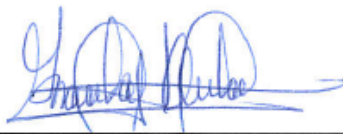
DR. ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ

ASESOR:



DRA. DIANA ITZEL LÓPEZ MONTE RRUBIO

ASESOR:



DRA. GRACIELA AVILA URIBE

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE CUADROS	vii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL.....	xi
GENERAL ABSTRACT	xii
1.INTRODUCCIÓN GENERAL	13
1.1. Objetivo general	14
1.2. Objetivos específicos.....	14
1.3. Organización de la tesis	15
1.4. Literatura citada	16
2.REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
2.1. Residuos de maguey.....	17
2.2. Biomasa lignocelulósicos.....	18
2.3. Composición de la biomasa lignocelulósica	19
2.3.1. Celulosa	19
2.3.2. Hemicelulosa.....	20
2.3.3. Lignina	21
2.3.4. Otros componentes menores.....	22
2.4. Métodos de pretratamiento de biomasa lignocelulósica.....	22
2.4.1. Pretratamientos físicos	22
2.4.2. Pretratamiento químico.....	24
2.4.3. Pretratamiento biológico	25
2.4.4. Pretratamiento combinado.....	25
2.5. Literatura citada	27

3. EXTRACCIÓN DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA A PARTIR DEL BAGAZO DE Maguey y su caracterización	31
3.1. Introducción	32
3.2. Materiales y métodos	33
3.2.1. Materia prima	33
3.2.2. Extracción y aislamiento de celulosa y hemicelulosa asistida por ultrasonido	34
3.2.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	35
3.2.4. Difracción de rayos X.....	36
3.2.5. Medición de tamaño de partícula y potencial Z (ζ)	36
3.2.6. Microscopia óptica	36
3.2.7. Microscopia electrónica de barrido (SEM)	36
3.2.8. Determinación del peso molecular por viscosidad	36
3.2.9. Análisis térmico	38
3.3. Resultados y discusión.....	38
3.3.1. Espectroscopia de infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)....	38
3.3.2. Difracción de rayos X.....	42
3.3.3. Medición de tamaño de partícula y potencial Z (ζ)	43
3.3.4. Microscopía óptica.....	44
3.3.5. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	45
3.3.6. Determinación de peso molecular por viscosidad	46
3.3.7. Análisis térmico	47
3.4. Conclusión.....	49
3.5. Literatura citada	50
4. AISLAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE CELULOSA DE PENCAS DE Maguey mediante tratamiento alcalino con ultrasonido	56
4.1. Introducción	57

4.2. Materiales y métodos	58
4.2.1. Materia prima	58
4.2.2. Extracción de celulosa	59
4.2.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	59
4.2.4. Difracción de rayos X (XRD)	60
4.2.5. Medición de tamaño de partícula y potencial Z.....	60
4.2.6. Microscopia óptica	60
4.2.7. Microscopia electrónica de barrido	60
4.2.7. Peso molecular.....	61
4.2.8. Análisis térmico	61
4.3. Resultados y discusión.....	61
4.3.1. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier	61
4.3.2. Difracción de rayos X.....	63
4.3.3. Medición de tamaño de partícula y potencial Z.....	64
4.3.4. Microscopia óptica	64
4.3.5. Microscopia electrónica de barrido	65
4.3.6. Peso molecular.....	66
4.3.7. Análisis térmico	67
4.4. Conclusión.....	69
4.5. Literatura citada	70
5. CONCLUSIONES GENERALES	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la celulosa	20
Figura 2. Estructura de la hemicelulosa	21
Figura 3. Estructura de los tres componentes básicos de la lignina	21
Figura 4. Esquema de la estructura lignocelulósica después del pretratamiento.	22
Figura 5. Procedimiento de extracción de CB y HB.	34
Figura 6. Espectro FTIR de la celulosa (CB) y hemicelulosa (HB) extraída del residuo de bagazo.....	39
Figura 7. Deconvolución Gaussiana de las bandas FTIR, en la región 3700-3000 cm ⁻¹ , de a) CB y b) HB.	41
Figura 8. Patrones de difracción de rayos X de CB y HB extraídas del bagazo.	43
Figura 9. Microscopia óptica de CB (a,b,c) y HB (d,e,f) obtenidas de bagazo de maguey mediante tratamiento alcalino con ultrasonido.	45
Figura 10. Micrografías SEM de CB (a,b,c) y HB (d,e,f).....	46
Figura 11. Termogramas del análisis térmico simultáneo de a) TGA, b) DTG y c) DSC para la CB y HB.	48
Figura 12. Espectro FTIR de CE y CM extraída del residuo de pencas de maguey.	62
Figura 13. Patrones de difracción de rayos X de CE y CM.	63
Figura 14. Imágenes de microscopia óptica de CE (a,b) y CM (c,d) obtenidas de penca.....	65
Figura 15. Micrografías SEM de CE (a,b) y CM (c,d).....	66
Figura 16. a) curva TGA, b) curva DTG, c) curva DSC de las muestras CE y CM.	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Índice de orden lateral (LOI), índice de cristalinidad total (TCI) e intensidad de enlace de hidrógeno (HBI) de muestra de CB y HB.	40
Cuadro 2. Enlaces de energía y distancias de enlace de hidrógeno.....	42

DEDICATORIA

*A mis padres, Filemon Valente y Delfina Morales, por su apoyo
incondicional*

A mis hermanos por sus consejos y motivación

A Canek Mota, por acompañarme en este camino, con amor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por la oportunidad de continuar con mi formación profesional.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada, que me permitió realizar mis estudios de maestría.

Agradezco a mi comité asesor, al Dr. Carlos A. Villaseñor Perea, mi director de tesis, por su apoyo para el desarrollo de este trabajo. Al Dr. Artemio Pérez López, por su valioso apoyo y guía en el desarrollo de esta investigación. A la Dra. Diana Itzel López Monterrubio, por su paciencia y consejos en todo el proceso, y por su apoyo para realizar el experimental en el laboratorio de alimentos funcionales. A la Dra. Graciela Avila Uribe, por su asesoramiento para mejorar esta investigación.

Agradecimiento especial al Dr. Tomas J. Madera Santana del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD), por su apoyo en esta investigación.

A mis compañeros de maestría y compañeras de laboratorio.

DATOS BIOGRÁFICOS



DATOS PERSONALES

Nombre:	Yulinali Valente Morales
Fecha de nacimiento:	30 de octubre de 1996
Lugar de nacimiento:	Chilpancingo, Guerrero
CURP:	VAMY961030MGRLRL05
Profesión:	Ingeniero Agroindustrial
Cédula profesional:	13648176

DESARROLLO ACADÉMICO

Preparatoria:	Preparatoria Agrícola Chapingo
Licenciatura:	Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

ASLAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA DE RESIDUOS SOLIDOS DE LA PRODUCCIÓN DE MEZCAL

El mezcal es una bebida espirituosa distintiva, derivada del agave, cuya producción abarca una serie de etapas cruciales: cosecha, cocción, molienda, fermentación, destilación y envasado. Durante la fase de cosecha, se genera una cantidad significativa de residuos sólidos, conocidos como "pencas" (hojas de agave), que tradicionalmente se desechan en los campos de cultivo. Posteriormente, en la etapa de destilación, se produce un segundo tipo de residuo, el "bagazo", que constituye la materia fibrosa restante del agave después de la extracción de los jugos fermentados. La gestión adecuada de estos residuos es fundamental para disminuir los problemas de contaminación del aire, suelo y agua de las regiones mezcaleras. En consecuencia, la presente investigación tuvo como objetivo principal dilucidar la composición química de los residuos derivados de la penca y el bagazo del agave. Adicionalmente, se buscó optimizar la extracción de celulosa y hemicelulosa del bagazo, así como la celulosa de las pencas, mediante la aplicación de un tratamiento alcalino potenciado por ultrasonido. El material resultante fue sometido a caracterización mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), lo que corroboró la presencia de grupos funcionales característicos de la celulosa y hemicelulosa. La difracción de rayos X reveló una estructura cristalina en las muestras postratamiento, con un potencial zeta negativo que sugiere una considerable repulsión electrostática intermolecular. El análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM) evidenció una topografía irregular y una superficie rugosa. Asimismo, los análisis termogravimétricos indicaron que las celulosas extraídas poseen una estabilidad térmica superior a la hemicelulosa obtenida del bagazo. En conjunto, estos hallazgos demuestran la factibilidad de revalorizar los residuos sólidos de la producción de mezcal, transformándolos en celulosa y hemicelulosa de bajo costo con propiedades prometedoras, lo que subraya el potencial de valorización de estos subproductos agroindustriales.

Palabras clave: Subproductos del mezcal, Biomasa lignocelulósica, Extracción alcalina, Valorización, Sostenibilidad

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Ing. Yulinali Valente Morales

Director de tesis: Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

GENERAL ABSTRACT

ISOLATION AND CHARACTERIZATION OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS FROM SOLID RESIDUES OF MEZCAL PRODUCTION

Mezcal is a distinctive distilled spirit derived from agave, whose production comprises a series of critical stages: harvesting, cooking, milling, fermentation, distillation and packaging. During the harvesting phase, a significant quantity of solid residues, known as “pencas” (agave leaves), is generated and is traditionally discarded in cultivated fields. Subsequently, during the distillation stage, a second type of residue, “bagasse” is generated, it consists of the fibrous material remaining from the agave after extraction of the fermented juices. Proper management of these residues is essential to reduce air, soil, and water pollution in mezcal-producing regions. Accordingly, the primary objective of the present study was to elucidate the chemical composition of residues derived from the penca and bagasse of agave. Additionally, the study sought to optimize the extraction of cellulose and hemicellulose from bagasse, as well as cellulose from pencas, by applying an ultrasound-assisted alkaline treatment. The resulting material was characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), which corroborated the presence of functional groups characteristic of cellulose and hemicellulose. X-ray diffraction revealed a crystalline structure in the post-treatment samples, with a negative zeta potential indicative of substantial intermolecular electrostatic repulsion. Morphological analysis by scanning electron microscopy (SEM) revealed an irregular topography and a rough surface. Similarly, thermogravimetric analysis indicated that the extracted cellulose exhibits higher thermal stability than the hemicellulose obtained from bagasse. Taken together, these findings demonstrate the feasibility of valorizing the solid residues from mezcal production by converting them into low-cost cellulose and hemicellulose with promising properties, thereby underscoring the valorization potential of these agroindustrial by-products.

Keywords: Mezcal by-products, Lignocellulosic biomass, Alkaline extraction, Valorization, Sustainability

Master’s Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural Engineering and Integrated Water Use, Chapingo Autonomous University.

Author: Ing. Yulinali Valente Morales

Thesis Director: Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El mezcal es una bebida alcohólica mexicana elaborada 100% con agave cosechado en regiones establecidas y obtenida por destilación de jugos fermentados con microorganismos espontáneos o cultivados extraídos de cabezas de agave cocidas (Ruiz-Camou et al., 2023). En el proceso de elaboración de esta bebida, se realiza la cocción del maguey, molienda, fermentación y destilación. En este proceso se generan residuos que actualmente son poco importantes en la agroindustria, pero que tienen un amplio impacto ambiental. El primero son las hojas, seguido del bagazo y la vinaza. El bagazo de agave es el residuo fibroso que queda después de picar, cocer, enjuagar y exprimir las cabezas (tallos, corazón o piña) de agave para extraer los azúcares fermentables y obtener los mostos que se utilizarán en la producción de mezcal (Flores-Ríos et al., 2020). Las hojas de la planta, conocidas localmente como "pencas", es otro de los residuos que se generan, se cortan para concentrar los azúcares en el corazón de la planta (base de la hoja) (Álvarez-Chávez et al., 2025).

Estos residuos son subutilizados, vertido a ríos, arroyos o amontonado fuera de palenques y parcelas, ocasionando un serio problema al ambiente por los grandes volúmenes generados y sus características morfológicas, además de ser residuos lignocelulósicos de lenta degradación (Flores-Ríos et al., 2020). El aprovechamiento de residuos agroindustriales para realizar productos innovadores ha tenido un crecimiento significativo, el surgimiento de tecnologías innovadoras ha permitido generar valor a lo que antes solo era un desecho (Singh et al., 2023).

La biomasa lignocelulósica a partir de residuos agrícolas ha sido el principal foco de atención, ya que es una de las materias primas más abundantes disponibles, compuesta principalmente de celulosa, lignina y hemicelulosa (Ong et al., 2021). En este contexto, ha crecido el interés por la tecnología ultrasónica por su alta eficiencia, bajo consumo de energía y su bajo impacto ambiental. Esta técnica utiliza ondas ultrasónicas que generan vibraciones de alta frecuencia, que producen efectos de cavitación acústica entre el soluto y el solvente, lo que hace que pequeñas burbujas en la solución exploten repentinamente, destruyendo así la estructura de la pared celular y luego separando los componentes (Lu et al., 2021). Además, estudios recientes han demostrado que la combinación de ultrasonido con tratamientos químicos, como soluciones alcalinas, mejora significativamente el rendimiento en la extracción de polisacáridos como la celulosa y la hemicelulosa, la combinación de los métodos permite optimizar los procesos de valorización de residuos agroindustriales (Ahmima et al., 2024; Mohan et al., 2024).

Este estudio investiga la extracción de celulosa y hemicelulosa a partir de residuos de la producción de mezcal mediante un tratamiento combinado de solución alcalina y ultrasonido. Los materiales utilizados en este estudio incluyen pencas de maguey de dos variedades, *Agave agustifolia* Haw (maguey espadín) y *Agave karwinskii* (maguey madrecoishe), así como bagazo de maguey.

1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del tratamiento alcalino asistido por ultrasonido para la extracción de celulosa y hemicelulosa de pencas y bagazo de maguey en las propiedades fisicoquímicas, estructurales y térmicas.

1.2. Objetivos específicos

- Obtener celulosa por el método de alcalino con ultrasonido en pencas de la variedad espadín (*Agave agustifolia* Haw) y madrecoishe (*Agave karwinskii*).

- Obtener celulosa y hemicelulosa con el método combinado en el bagazo de maguey.
- Analizar el efecto del tratamiento mediante las características morfológicas y estructurales de las celulosas y hemicelulosas mediante microscopia electrónica de barrido (SEM), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X, tamaño de partícula y potencial zeta.
- Analizar las propiedades térmicas y peso molecular de la celulosas y hemicelulosas obtenidos mediante el tratamiento combinado.

1.3. Organización de la tesis

El presente trabajo está estructurado en los siguientes capítulos: I) introducción general, II) revisión de literatura, y el III), IV) son los artículos científicos.

El capítulo II incluye la revisión de literatura, proporciona una descripción sobre los residuos de maguey que se utilizaron para la obtención de polímeros. Además, se menciona las características sobre los compuestos lignocelulósicos, así como los distintos métodos de extracción de estos compuestos.

En el capítulo III y IV se muestra el escrito correspondiente al trabajo de investigación. Se describe el proceso de aislamiento de los polímeros de celulosa y hemicelulosa a partir de residuos de pencas y bagazo de maguey. Asimismo, se presentan y explican las diversas metodologías para caracterizar estos polímeros obtenidos. En los resultados se detallan cada una de las pruebas de caracterización aplicadas.

1.4. Literatura citada

- Ahmima, S., Naar, N., Jędrzejczak, P., Kłapiszewska, I., Kłapiszewski, Ł., & Jesionowski, T. (2024). Isolation and Characterization of Novel Cellulose Micro/Nanofibers from *Lygeum spartum* Through a Chemo-Mechanical Process. *Polymers*, 16(21), 3001. <https://doi.org/10.3390/polym16213001>
- Álvarez-Chávez, J., Dufoo-Hurtado, E., Santos-Zea, L., & Ramírez-Jiménez, A. K. (2025). Looking into New Sources of Bioactives: Seasonal Variation in Bioactive Compounds and Dietary Fiber of Agave Bagasse from Mezcal Production. *Foods*, 14(9), 1632. <https://doi.org/10.3390/foods14091632>
- Flores-Ríos, P. A., Celerino, R., Castañeda-Hidalgo, E., Flores-Ríos, P. A., Celerino, R., & Castañeda-Hidalgo, E. (2020). Generation and basic characterization of bagasse from the mezcal agribusiness in Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1437–1445. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2615>
- Lu, Y., He, Q., Fan, G., Cheng, Q., & Song, G. (2021). Extraction and modification of hemicellulose from lignocellulosic biomass: A review. *Green Processing and Synthesis*, 10(1), 779–804. <https://doi.org/10.1515/gps-2021-0065>
- Mohan, P., Mohd Yusof, N. S., Thomas, S., & Abd Rahman, N. M. M. (2024). Ultrasound-alkali-assisted isolation of cellulose from coconut shells. *BioResources*, 19(4), 7870–7885.
- Ong, V. Z., Wu, T. Y., Chu, K. K. L., Sun, W. Y., & Shak, K. P. Y. (2021). A combined pretreatment with ultrasound-assisted alkaline solution and aqueous deep eutectic solvent for enhancing delignification and enzymatic hydrolysis from oil palm fronds. *Industrial Crops and Products*, 160, 112974. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112974>
- Ruiz-Camou, C., Núñez, J., & Musule, R. (2023). Evaluating the environmental performance of mezcal production in Michoacán, México: A life cycle assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(12), 1658–1671. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02237-y>
- Singh, A., Dikshit, R., & Singh, N. (2023). Valorization of Agro-Industrial Wastes for Biorefinery Products. En A. S. Mathuriya, S. Pandit, & N. K. Singh (Eds.), *Green Technologies for Industrial Waste Remediation* (pp. 101–123). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46858-2_6

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Residuos de maguey

Los agaves son plantas comúnmente conocidas como “magueyes”, tienen una fuerte relación con la cultura e historia mexicana (Pérez Zavala et al., 2020), es uno de los productos agrícolas más abundantes en México, donde se produce bebidas alcohólicas a partir de ella (Robles et al., 2018). Esta planta se ha utilizado para múltiples propósitos desde la antigüedad, como fuente de alimento, medicina, bebida, material de construcción, fibras, vinagre, adornos, entre otros, y lo que se conserva principalmente en la actualidad, para la elaboración de bebidas destiladas o no destiladas (Arellano-Plaza et al., 2022). El mezcal es una bebida alcohólica mexicana destilada del jugo fermentado de plantas de maguey maduras y cocidas (tallo o piña). Sin embargo, la alta demanda de este producto ha generado diversos residuos agrícolas que contaminan y pueden ser peligrosos para el medio ambiente (Bermúdez-Bazán et al., 2021; Nolasco-Cancino et al., 2018).

El bagazo es el residuo que queda después de que la piña de maguey se cuece, se desmenuza y se muele, siendo así un subproducto infravalorado con una alta cantidad de material lignocelulósico (Robles et al., 2018). Este residuo representa aproximadamente el 40 % del material de maguey procesado, se estima que y por cada litro de bebida alcohólica producida, se generan 1.4 kg de bagazo húmedo (Gómez-Navarro et al., 2023), se compone de carbohidratos, donde predomina, en mayor proporción de celulosa (31–43%), hemicelulosa (10–22%) y lignina (10–20%) (Weber et al., 2020). Una desventaja importante del bagazo de agave es su considerable resistencia a la degradación natural, lo que

puede resultar en su persistencia en el medio ambiente durante años sin reintegrarse al suelo. Las soluciones a este problema suelen centrarse en su uso como composta o biocombustible, empleando tecnologías de transformación química o utilizando grandes cantidades de agua, como la hidrólisis alcalina o ácida. Sin embargo, existen tecnologías emergentes, como el calentamiento óhmico, el ultrasonido y la extrusión, que tienen potencial para aplicarse a los residuos de agave (Álvarez-Chávez et al., 2025).

Las hojas o también llamado “pencas” pueden representar hasta un 36% de la planta y, en general, se dejan en el campo después de ser cortadas; este recorte se realiza anualmente para mejorar el crecimiento de la piña de maguey, mientras que la mayoría de las pencas se cortan durante la cosecha del corazón (Robles et al., 2018). Las pencas desechadas se utilizan como forraje de subsistencia para el ganado. El desperdicio de casi la mitad del peso de la planta de maguey ejerce una gran presión sobre el ecosistema donde se desarrolla y se utiliza de forma forestal (Michel-Cuello et al., 2021).

2.2. Biomasa lignocelulósicos

En las últimas décadas, el uso de combustibles fósiles ha provocado efectos secundarios en el medio ambiente, como la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ha provocado el calentamiento global (Mujtaba et al., 2023). El uso de materias primas renovables puede contribuir a frenar el cambio climático al liberar menos gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles cuando se utilizan para obtener energía (Blasi et al., 2023). La creciente demanda energética ha reavivado el interés en la búsqueda de alternativas renovables como biocombustibles, bioquímicos y biomateriales. Por otro lado, la biomasa lignocelulósica es fácil de conseguir y ha demostrado ser una buena fuente para generar combustibles, productos químicos y materiales ecológicos, se sabe que la biomasa puede ayudar a reducir los impactos ambientales negativos causados por el uso de combustibles fósiles y sus derivados (Okolie et al., 2021).

La biomasa lignocelulósica se refiere a materiales vegetales, y se ha considerado uno de los recursos más disponibles, estos materiales son los más accesibles y de bajo costo son los desechos agrícolas o subproductos agrícolas, incluidos los tallos y la paja de los cultivos, las ramas y las hojas producidas durante la poda de las plantas, las cáscaras de frutas y los desechos vegetales, *etc.*, que pueden ser generados por varios sectores como la industria, agricultura, silvicultura (Cheng & Whang, 2022), estos materiales se componen principalmente de tres polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina, junto con cantidades menores de pectina, proteínas, extractos y cenizas, la composición de estos constituyentes puede variar de una especie vegetal a otra (Bajpai, 2016), los polímeros que son los componentes principales de los materiales lignocelulósicos se caracterizan por su abundancia, renovabilidad, biodegradabilidad y biocompatibilidad, lo que las hace muy valiosas en diversas aplicaciones y creación de productos químicos, combustibles sostenibles, y tiene el potencial de sustituir plásticos y otros materiales poliméricos petroquímicos (Blasi et al., 2023; Okolie et al., 2021).

2.3. Composición de la biomasa lignocelulósica

Los materiales lignocelulósicos se producen de manera masiva cada año a través de diferentes sectores de las industrias. La eliminación de estos residuos es el principal desafío debido al almacenamiento inadecuado y gran parte del material es de desecho de origen vegetal (Bilal et al., 2020), la composición de estos materiales es muy compleja, que puede variar según factores ambientales o características de las plantas, pero está formada mayoritariamente por celulosa y cantidades menores de hemicelulosa y lignina (Camargo et al., 2023).

2.3.1. Celulosa

La celulosa es considerada como el recurso orgánico renovable más abundante disponible en la tierra, está ampliamente distribuida en plantas terrestres, algas marinas y bacterias. La celulosa es un polímero de glucosa compuesto por numerosas subunidades D-glucosa unidas por enlaces β -1,4 (Figura 1), unidas entre sí por enlaces glucosídicos, fuerzas de Van der Waals y enlaces de hidrógeno (Okolie et al., 2021).

La celulosa se encuentra principalmente en la pared celular de la biomasa vegetal, donde sus cadenas se organizan en microfibrillas mediante enlaces de hidrógeno (Ravindran & Jaiswal, 2016). Las cadenas de celulosa en microfibrillas pueden estar más o menos ordenadas, lo que da lugar a porciones cristalinas (ordenadas) y amorfas (no ordenadas) de celulosa. Estas dos formas muestran diferencias en rigidez y reactividad química: la celulosa amorfa es menos rígida en comparación con la celulosa cristalina (Cazier et al., 2024).

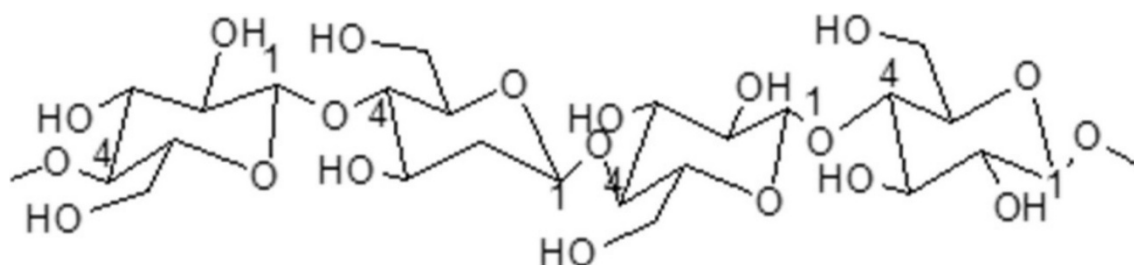


Figura 1. Estructura de la celulosa (Kumari & Singh, 2018).

2.3.2. Hemicelulosa

La hemicelulosa, el segundo componente más abundante de la estructura lignocelulósica, difiere de la celulosa en su conformación y composición, ya que es amorfa y heterogénea (Camargo et al., 2023), se puede degradar fácilmente en el medio acuoso ácido o caliente debido a su menor grado de polimerización (50-200) (Okolie et al., 2021), y se componen de diversos tipos de monómeros sacáridos, como hexosas (glucosa, manosa o galactosa), pentosas (arabinosa o xilosa), derivados metilados (ramnosa o fucosa) y ácidos urónicos (ácido glucurónico) (Figura 2) (Cazier et al., 2024). Uno de los azúcares hemicelulósicos predominantemente encontrados, es la xilosa ($C_5H_{10}O_5$). En este contexto, uno de los polisacáridos más abundantes de las hemicelulosas son los xilanos, con cadenas poliméricas compuestas por unidades de β -d-xilosa con enlaces 1,4, la composición del xilano varía según su origen (Okolie et al., 2021).

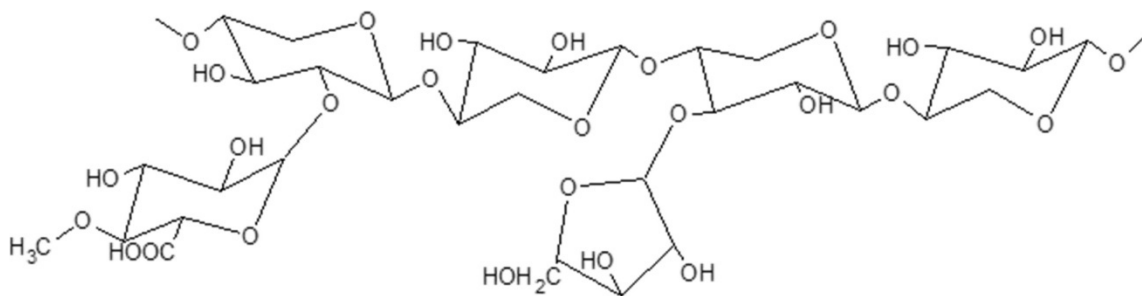


Figura 2. Estructura de la hemicelulosa (Kumari & Singh, 2018).

2.3.3. Lignina

La lignina es el componente más abundante en la biomasa vegetal, presenta una naturaleza aromática y amorfa, y su estructura varía según la especie vegetal de la que deriva. La lignina es un polímero de unidades monoméricas de fenilpropano que difieren únicamente en la sustitución de grupos metoxilo en los anillos aromáticos (Ravindran & Jaiswal, 2016), las unidades monoméricas están unidas aleatoriamente y de forma no lineal por enlaces éster. También se pueden encontrar algunos enlaces éster en las unidades terminales de los monómeros dentro de las unidades de ácido ferúlico y p-cumárico. La resistencia y rigidez son proporcionadas a las plantas por la reticulación de las moléculas de lignina con polímeros de celulosa y hemicelulosa. Los tres principales monómeros de fenilpropano en la lignina son el alcohol p-cumarílico (alcohol 4-hidroxicinamílico), el alcohol coniferílico (alcohol 3-metoxi-4-hidroxicinamílico) y el alcohol sinapílico (alcohol 3,5-dimetoxi-4-hidroxicinamílico) (Figura 3) (Okolie et al., 2021).

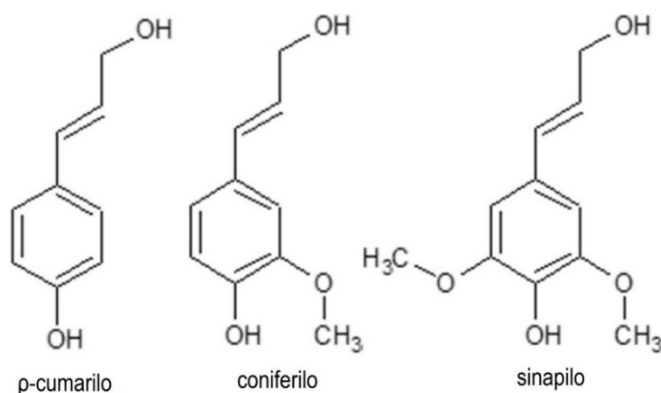


Figura 3. Estructura de los tres componentes básicos de la lignina (Kumari & Singh, 2018).

2.3.4. Otros componentes menores

A parte de los componentes principales como celulosa, hemicelulosa y lignina, la biomasa lignocelulósica también comprende otros constituyentes menores, como extractivos/volátiles, minerales, proteínas, lípidos y cenizas (Periyasamy et al., 2022).

2.4. Métodos de pretratamiento de biomasa lignocelulósica

El pretratamiento de la biomasa lignocelulósica es el proceso en el que la lignocelulosa compleja se convierte en componentes simples como celulosa, hemicelulosa y lignina (Kumari & Singh, 2018), pueden clasificarse en diferentes grupos, como físicos, químicos y biológicos, cada método de pretratamiento funciona de forma diferente, lo que resulta en distintos rendimientos y productos, pueden aplicarse solos o combinados, y deben elegirse en función de la materia prima y los productos finales deseados (Ghimire et al., 2021). En la Figura 4 se muestra la representación de residuos orgánicos.

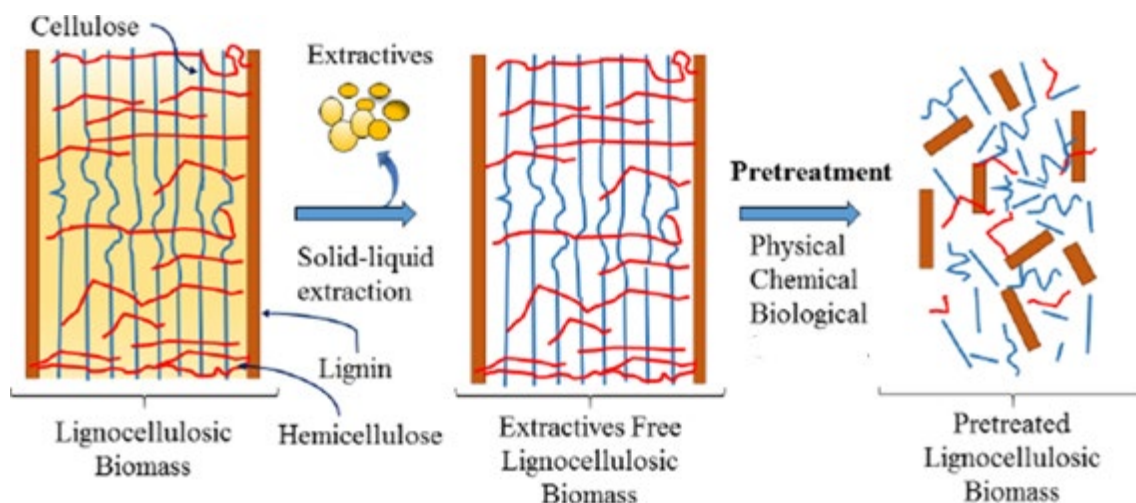


Figura 4. Esquema de la estructura lignocelulósica después del pretratamiento (Periyasamy et al., 2022).

2.4.1. Pretratamientos físicos

Los tratamientos físicos son aquellos en los que no se necesitan reactivos químicos ni microorganismos para promover la hidrólisis de la estructura

lignocelulósica (Camargo et al., 2023) y tiene como objetivo aumentar la accesibilidad superficial de la biomasa lignocelulósica a las enzimas, reduciendo el tamaño de los materiales o destruyendo la estructura de la pared celular (Zhang et al., 2020). Los tratamientos físicos más aplicados son la molienda, trituración, extrusión, y la irradiación (ultrasonidos y microondas) (Sheraz et al., 2025).

La molienda o trituración es una técnica frecuentemente utilizada para reducir el tamaño de partícula de biomasa y se aplica en la mayoría de las ocasiones antes de otros métodos de pretratamiento para mejorar la manipulación y el tratamiento de la materia prima. La reducción del tamaño de partícula de la biomasa puede alterar la ultraestructura inherente de la biomasa lignocelulósica, aumentar la superficie accesible, sin embargo, el tamaño final de las partículas depende del tipo de método empleado (Mankar et al., 2021; Zheng et al., 2014).

La extrusión utiliza la rotación de uno o dos tornillos dentro de un cilindro con regulación térmica. El proceso se lleva a cabo a altas temperaturas, lo que provoca la alteración física de la biomasa mediante la mezcla y la fuerza de cizallamiento sobre la muestra. La biomasa se puede mezclar con diferentes productos químicos como hidróxido de sodio, urea o tiourea para aumentar la severidad del proceso de pretratamiento (Sheraz et al., 2025).

La irradiación por microondas es una interacción de ondas electromagnéticas con moléculas polares y iones. Las microondas causan efectos térmicos, como reacciones de hidrólisis, y efectos no térmicos, como la rotación de grupos polares. Este método es efectivo ya que genera calor dentro de la muestra (debido a la rotación dipolar y conducción iónica) y no a través de su superficie (Cazier et al., 2024). La irradiación por ultrasonido produce vibraciones energéticas y penetra los cristales de la estructura lignocelulósica, lo que conduce a la descomposición de la biomasa (Riseh et al., 2024). El ultrasonido es una energía acústica que viaja como ondas con frecuencias sobre el rango auditivo (>20 kHz). La propagación de ondas ultrasónicas en cualquier medio es responsable de la generación de cavitación acústica que a su vez inicia la

formación espontánea de microburbujas. Cuando estas microburbujas colapsan, se crean ondas de choque/puntos calientes locales que liberan alta temperatura y presión. La estructura cristalina de las partículas sólidas presentes en el medio se desintegra al encontrar las ondas de choque/puntos calientes a alta temperatura y presión (Mankar et al., 2021).

2.4.2. Pretratamiento químico

El pretratamiento químico se refiere al uso de sustancias químicas, como ácidos, álcalis y líquidos iónicos, para modificar las características físicas y químicas de la biomasa. La materia prima se expone a las sustancias químicas y se deja disolver, convirtiéndose así la biomasa en su forma más utilizada (Periyasamy et al., 2022).

El pretratamiento ácido en la biomasa lignocelulósica rompe preferentemente los enlaces glucosídicos entre la hemicelulosa y la celulosa. La presencia de iones hidronio, generados por catalizadores ácidos, promueve la hidrólisis de las cadenas de hemicelulosa y celulosa en monómeros de azúcar simples (Sheraz et al., 2025). Los ácidos utilizados más comúnmente para el pretratamiento son ácido sulfúrico, ácido acético, ácido fosfórico. El pretratamiento con ácidos se puede realizar de dos maneras diferentes: pretratamiento con ácido diluido (0,1 %) a temperaturas más altas (>200 °C) y pretratamiento con ácido concentrado (30-70 %) a temperaturas relativamente más bajas (<50 °C) (Mankar et al., 2021).

El pretratamiento alcalino es eficiente para eliminar la lignina, la hidrólisis de la hemicelulosa y la disminución de la cristalinidad de la celulosa. Las soluciones alcalinas más utilizadas son KOH, NaOH, Ca(OH)_2 , NH_3 y NH_4OH (Periyasamy et al., 2022). Este método altera la pared celular de la biomasa lignocelulósica al solubilizar polisacáridos como celulosa, lignina, hemicelulosa y sílice por hidrólisis enzimática. También se produce hinchamiento químico de la celulosa fibrosa que incluye reacciones de solvatación y saponificación que favorecen la disrupción de los enlaces cruzados entre hemicelulosas y algunos otros componentes, lo que resulta en un aumento en la porosidad de la biomasa (Kumari & Singh, 2018).

Los líquidos iónicos son solventes orgánicos con alta estabilidad térmica capaces de disolver compuestos orgánicos, inorgánicos y poliméricos, tanto polares como apolares y con baja presión de vapor. También presentan baja volatilidad, no son inflamables y pueden reciclarse. Los líquidos iónicos son sales con una estructura heterogénea compuesta por cationes orgánicos y aniones inorgánicos, algunos utilizados para tratar la lignocelulosa son cloruros, formiatos, acetatos o alquilofofonatos aniónicos; fracciones que pueden formar fuertes enlaces de hidrógeno con la celulosa y otros carbohidratos (Prasad et al., 2023; Ravindran & Jaiswal, 2016).

2.4.3. Pretratamiento biológico

El pretratamiento biológico utiliza bacterias aeróbicas, enzimas u hongos para descomponer la lignina. Este método no libera sustancias tóxicas al medio ambiente, consume poca energía y produce pocos compuestos inhibidores (Riseh et al., 2024). En muchas investigaciones, se utilizan diversos microorganismos para descomponer materiales orgánicos, incluyendo bacterias: *Bacillus* y *Actinomyces* y varios hongos bien conocidos. Las bacterias celulolíticas de los géneros *Bacillus*, *Aspergillus*, *Candida* y *Streptomyces* indican una degradación biológica de amplio espectro en un consorcio microbiano (Periyasamy et al., 2022).

2.4.4. Pretratamiento combinado

Para lograr una alta eficiencia de los pretratamientos, se suelen combinar diferentes pretratamientos, debido que la biodegradabilidad de la biomasa está limitada por diversos factores, como la cristalinidad de la celulosa, el contenido de lignina y las interrelaciones entre la hemicelulosa y la lignina, un único método de pretratamiento no ofrece resultados eficientes debido a su limitado modo de funcionamiento específico. Por lo tanto, ningún método de pretratamiento (físico, químico o biológico) puede considerarse el ganador. También es común el pretratamiento combinado que incorpora dos o más técnicas de la misma o diferente categoría (Zhang et al., 2020). Uno de los pretratamientos combinados es álcali con ultrasonido, ya que el ultrasonido se puede utilizar para reducir el

tiempo del pretratamiento ya que interrumpe la capa de cera hidrofóbica en algunos tipos de biomasa lignocelulósica. Esto aumenta la superficie de contacto entre la biomasa y la solución alcalina, mejora el acceso a la celulosa y hemicelulosa y permite trabajar a menores temperaturas. Por su parte, el tratamiento alcalino solubiliza la lignina y la hemicelulosa, reduce la cristalinidad de la celulosa y se caracteriza por un bajo costo de inversión (Cazier et al., 2024). Este enfoque ya se ha aplicado con éxito en la extracción de celulosa de la cascara de coco, donde facilitó la fragmentación de las partículas y la liberación de la celulosa (Mohan et al., 2024), así como en la planta de *Lygeum spartum*, en la que el ultrasonido demostró ser eficaz para debilitar las interacciones entre las fibras y favorecer la extracción (Ahmima et al., 2024).

2.5. Literatura citada

- Ahmima, S., Naar, N., Jędrzejczak, P., Kłapiszewska, I., Kłapiszewski, Ł., & Jesionowski, T. (2024). Isolation and Characterization of Novel Cellulose Micro/Nanofibers from *Lygeum spartum* Through a Chemo-Mechanical Process. *Polymers*, 16(21), 3001. <https://doi.org/10.3390/polym16213001>
- Álvarez-Chávez, J., Castrejon, A., Gaytán-Martínez, M., & Ramírez-Jiménez, A. K. (2025). Effect of Ohmic heating, ultrasound and extrusion on the bioactive composition and nutritional value of Agave bagasse from Mezcal production. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 100, 103897. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103897>
- Arellano-Plaza, M., Paez-Lerma, J. B., Soto-Cruz, N. O., Kirchmayr, M. R., & Gschaedler Mathis, A. (2022). Mezcal Production in Mexico: Between Tradition and Commercial Exploitation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.832532>
- Bajpai, P. (2016). Structure of Lignocellulosic Biomass. En P. Bajpai (Ed.), *Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production* (pp. 7–12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6_2
- Bermúdez-Bazán, M., Castillo-Herrera, G. A., Urias-Silvas, J. E., Escobedo-Reyes, A., & Estarrón-Espinosa, M. (2021). Hunting Bioactive Molecules from the Agave Genus: An Update on Extraction and Biological Potential. *Molecules*, 26(22), 6789. <https://doi.org/10.3390/molecules26226789>
- Bilal, M., Wang, Z., Cui, J., Ferreira, L. F. R., Bharagava, R. N., & Iqbal, H. M. N. (2020). Environmental impact of lignocellulosic wastes and their effective exploitation as smart carriers – A drive towards greener and eco-friendlier biocatalytic systems. *Science of The Total Environment*, 722, 137903. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137903>
- Blasi, A., Verardi, A., Lopresto, C. G., Siciliano, S., & Sangiorgio, P. (2023). Lignocellulosic Agricultural Waste Valorization to Obtain Valuable Products: An Overview. *Recycling*, 8(4), 61. <https://doi.org/10.3390/recycling8040061>
- Camargo, F. P., Rabelo, C. A. B. S., Duarte, I. C. S., Silva, E. L., & Varesche, M. B. A. (2023). Biogas from lignocellulosic feedstock: A review on the main pretreatments, inocula and operational variables involved in anaerobic reactor efficiency. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(54), 20613–20632. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.073>
- Cazier, E. A., Pham, T.-N., Cossus, L., Abila, M., Ilc, T., & Lawrence, P. (2024). Exploring industrial lignocellulosic waste: Sources, types, and potential as

- high-value molecules. *Waste Management*, 188, 11–38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.07.029>
- Cheng, H.-H., & Whang, L.-M. (2022). Resource recovery from lignocellulosic wastes via biological technologies: Advancements and prospects. *Bioresource Technology*, 343, 126097. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126097>
- Ghimire, N., Bakke, R., & Bergland, W. H. (2021). Liquefaction of lignocellulosic biomass for methane production: A review. *Bioresource Technology*, 332, 125068. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125068>
- Gómez-Navarro, C. S., Warren-Vega, W. M., Serna-Carrizales, J. C., Zárate-Guzmán, A. I., Ocampo-Pérez, R., Carrasco-Marín, F., Collins-Martínez, V. H., Niembro-García, J., & Romero-Cano, L. A. (2023). Evaluation of the Environmental Performance of Adsorbent Materials Prepared from Agave Bagasse for Water Remediation: Solid Waste Management Proposal of the Tequila Industry. *Materials*, 16(1), 8. <https://doi.org/10.3390/ma16010008>
- Kumari, D., & Singh, R. (2018). Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 877–891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., & Pant, K. K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334, 125235. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>
- Michel-Cuello, C., Aguilar-Rivera, N., López-Palacios, C., & Cárdenas-González, J. F. (2021). Fermentable carbohydrate metabolism in maguey mezcalero potosino (Agave salmiana): HPLC characterization and evaluation. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(1), 12154–12154. <https://doi.org/10.15835/nbha49112154>
- Mohan, P., Mohd Yusof, N. S., Thomas, S., & Abd Rahman, N. M. M. (2024). Ultrasound-alkali-assisted isolation of cellulose from coconut shells. *BioResources*, 19(4), 7870–7885. <https://doi.org/10.15376/biores.19.4.7870-7885>
- Mujtaba, M., Fernandes Fraceto, L., Fazeli, M., Mukherjee, S., Savassa, S. M., Araujo de Medeiros, G., do Espírito Santo Pereira, A., Mancini, S. D., Lipponen, J., & Vilaplana, F. (2023). Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: A review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136815. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815>

- Nolasco-Cancino, H., Santiago-Urbina, J. A., Wachter, C., & Ruíz-Terán, F. (2018). Predominant Yeasts During Artisanal Mezcal Fermentation and Their Capacity to Ferment Maguey Juice. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02900>
- Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2021). Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 12(5), 2145–2169. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0>
- Pérez Zavala, M. L., Hernández-Arzaba, J. C., Bideshi, D. K., & Barboza Corona, J. E. (2020). Agave: A natural renewable resource with multiple applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15), 5324–5333. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10586>
- Periyasamy, S., Karthik, V., Senthil Kumar, P., Isabel, J. B., Temesgen, T., Hunegnaw, B. M., Melese, B. B., Mohamed, B. A., & Vo, D.-V. N. (2022). Chemical, physical and biological methods to convert lignocellulosic waste into value-added products. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(2), 1129–1152. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01374-w>
- Prasad, B. R., Padhi, R. K., & Ghosh, G. (2023). A review on key pretreatment approaches for lignocellulosic biomass to produce biofuel and value-added products. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6), 6929–6944. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04252-2>
- Ravindran, R., & Jaiswal, A. K. (2016). A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 199, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.106>
- Riseh, R. S., Vazvani, M. G., Hassanisaadi, M., & Thakur, V. K. (2024). Agricultural wastes: A practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries. *Industrial Crops and Products*, 208, 117904. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117904>
- Robles, E., Fernández-Rodríguez, J., Barbosa, A. M., Gordobil, O., Carreño, N. L. V., & Labidi, J. (2018). Production of cellulose nanoparticles from blue agave waste treated with environmentally friendly processes. *Carbohydrate Polymers*, 183, 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.015>
- Sheraz, M., Cao, L., Zhao, S., Gao, H., Dansawad, P., Xue, C., Li, Y., & Li, W. (2025). Lignocellulosic Biomass Pretreatment Methods and Application of

Extracted Fractions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(6), 3717–3736. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09930-6>

- Weber, B., Sandoval-Moctezuma, A. C., Estrada-Maya, A., Martínez-Cienfuegos, I. G., & Durán-García, Ma. D. (2020). Agave bagasse response to steam explosion and anaerobic treatment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(4), 1279–1289. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00619-y>
- Zhang, J., Zhou, H., Liu, D., & Zhao, X. (2020). Chapter 2—Pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient enzymatic saccharification of cellulose. En A. Yousuf, D. Pirozzi, & F. Sannino (Eds.), *Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels* (pp. 17–65). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815936-1.00002-2>
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>

3. EXTRACCIÓN DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA A PARTIR DEL BAGAZO DE Maguey Y SU CARACTERIZACIÓN

Resumen

El bagazo de maguey es un residuo agroindustrial que se genera en la producción del mezcal, crea problemas ambientales debido a que se produce en grandes cantidades. Este tipo de residuo es abundante en componentes lignocelulósicos, lo que lo convierte en una fuente sostenible para generar materiales de alto valor. En esta investigación se exploró el aislamiento de celulosa y hemicelulosa a partir del residuo de bagazo de maguey, mediante un tratamiento físico y químico, usando una solución alcalina de KOH asistida con ultrasonido. Se implementaron varios análisis para determinar las características del material aislado. El análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) confirmó la presencia de los grupos funcionales característicos de ambas muestras. La difracción de rayos X mostró la microestructura de las muestras causada por el tratamiento aplicado, el análisis de potencial Z (ζ) sugirió una estabilidad moderada de la suspensión de celulosa y mayor tendencia a la aglomeración en la hemicelulosa. El análisis morfológico utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopia óptica mostró superficies rugosas y porosas en la celulosa y en la hemicelulosa se mostraron fibras individuales y aisladas. El análisis de peso molecular indicó que con la extracción con ultrasonido hubo una mayor degradación de las muestras. El análisis térmico se realizó mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), mostró que la celulosa tuvo mayor estabilidad térmica. Los hallazgos demuestran que el tratamiento es prometedor para separar hemicelulosa y celulosa de las fibras de bagazo. Por lo tanto, podrían utilizarse en distintas aplicaciones tecnológicas, como rellenos que refuercen matrices poliméricas para el desarrollo de materiales biocompuestos.

Palabras clave: hemicelulosa; celulosa; ultrasonido; bagazo; tratamiento alcalino

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Ing. Yulinali Valente Morales

Director de tesis: Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

3.1. Introducción

El bagazo de maguey es un residuo fibroso que se genera después de que las cabezas de maguey se utilizan para la elaboración de bebidas alcohólicas como el mezcal o tequila. Las cabezas de maguey son cocidas, troceadas y molidas para obtener el jugo para su posterior fermentación y destilación. El material restante conocido como bagazo fibroso representa el 40% del peso original de la cabeza de maguey (Márquez-Rangel et al., 2023). Se estima que por litro de mezcal producido a partir de maguey espadín (*Agave angustifolia* Haw) se genera en promedio 5.63 kg de bagazo (base húmeda) (Avendaño-Rito et al., 2024). Este residuo lignocelulósico contiene entre 31 a 43% de celulosa, 11 a 22% de hemicelulosa y 11 a 20% lignina (Lazaro-Romero et al., 2024). En la industria del mezcal, este residuo no tiene ningún uso. En el mejor de los casos se emplea como combustible en los hornos de calentamiento de la olla de destilación, pero en la mayoría de las veces se depositan sobre el suelo al aire libre hasta su descomposición. Incluso, como no es aprovechado, provoca vertidos ilegales o aplicaciones inadecuadas en tierras agrícolas, junto con contaminación por lixiviados, generación de olores y hábitat para plagas y enfermedades (Alemán-Nava et al., 2018), otra práctica común es la quema abierta del bagazo que genera contaminación principalmente a través de las emisiones de gas y partículas finas (Ruiz-Camou et al., 2023).

Los residuos lignocelulósicos en los últimos años han ganado interés por sus características renovables, reciclables y sostenibles, el interés por su uso en nuevas aplicaciones, así como, la innovación en métodos para su extracción aumentando rápidamente (Blasi et al., 2023). El tratamiento alcalino asistido por ultrasonido ha demostrado ser un método eficaz para la obtención de celulosa y hemicelulosa (Mohan et al., 2024; Y. Xie et al., 2020). El método de extracción alcalina es muy utilizado por ser una opción de bajo costo y alto potencial de recuperación y reutilización del material de extracción (Kundu et al., 2021). Así mismo, la tecnología ultrasónica ha atraído la atención debido a su importante contribución a la sostenibilidad medioambiental y su aplicación durante el aislamiento de materiales vegetales, mejorando significativamente el rendimiento

de extracción de polisacáridos (Martinez-Solano et al., 2021). Las ondas ultrasónicas generan vibraciones de alta frecuencia que producen efectos de cavitación acústica entre el soluto y el disolvente, provocando la ruptura repentina de pequeñas burbujas en la solución, destruyendo así la estructura de la pared celular y separando los componentes (Lu et al., 2021; Martinez-Solano et al., 2021). El aislamiento asistido por ultrasonido reduce la necesidad de productos químicos agresivos y mejora el rendimiento y la calidad del material lignocelulósico aislado convirtiéndolo en un método más ecológico y energéticamente eficiente (Mohan et al., 2024).

En estudios previos (Mohan et al., 2024; Y. Xie et al., 2020; Wang et al., 2018) se ha reportado el uso de la solución alcalina y tratamiento ultrasónico para la extracción de celulosa y hemicelulosa en bagazo de caña, bambú, cascara de coco. Sin embargo, no existen reportes de las propiedades de estos materiales lignocelulósicos extraídos de bagazo de maguey utilizando el mismo tratamiento. En esta investigación se tuvo como objetivo convertir el residuo de la fibra de bagazo de maguey que se genera durante la producción de mezcal en celulosa (CB) y hemicelulosa (HB) utilizando el tratamiento alcalino asistido por ultrasonido, se evaluó mediante FTIR, difracción de rayos X, tamaño de partícula, potencial Z, microscopia óptica, SEM, peso molecular y análisis térmico, para caracterizar el material aislado y analizar sus propiedades.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materia prima

El bagazo se recolectó en el Palenque Serpiente de Fuego ubicado en el sitio de Xitlapehua, municipio de Miahuatlán, Oaxaca (16°21'09.1"N y 96°32'42.2"O, 1574 msnm). Al momento de la recolección, el material se encontraba seco y expuesto a la intemperie. Posteriormente la muestra se secó en una estufa (HCF-62, RIOSSA, México) a 70 °C por 24 h, se molió y el material en polvo se tamizó en una malla 60. La muestra se almacenó en bolsas de polipropileno herméticas hasta el día de su uso.

3.2.2. Extracción y aislamiento de celulosa y hemicelulosa asistida por ultrasonido

La muestra seca se desengrasa en un equipo Soxhlet durante 6 h, utilizando una solución de tolueno-etanol (2:1 v/v) como solvente, posteriormente se dejó secar a 105 °C durante 12 h (Figura 1). La muestra desengrasada (5 g) se deslignificó con clorito de sodio al 3 % a pH 4.0 $\pm$ 0.01 a 75 °C por 2 h. Después del tratamiento, la holocelulosa se filtró, se lavó con agua desionizada y se secó a 50 °C por 16 h. Posteriormente se agregó KOH al 6 % con una relación solido-liquido 1:25 (g mL⁻¹) y se aplicó ultrasonido con un procesador ultrasónico (modelo VCX 130 PB 500/750 W) acoplado a una sonda de acero inoxidable (Sonics and Materials, Inc, Newtown, CT, USA) durante 30 min y una amplitud de 40 %. Posteriormente la mezcla se trató con la solución restante de KOH al 6% bajo agitación continua a 55 °C durante un tiempo de 2 h. En seguida se filtró y el residuo se lavó con agua desionizada. Las muestras se secaron a 60 °C por 24 h para la obtención de celulosa (CB). Por otra parte, los filtrados obtenidos se ajustaron a pH 5.5 $\pm$ 0.01 con HCl. Las hemicelulosas solubles en álcali se recolectaron por precipitación de los filtrados concentrados con 3 volúmenes de etanol al 95 % y se dejó reposar por 12 h. Las hemicelulosas (HB) precipitadas se filtraron y se lavaron con etanol al 70 % y se secaron a 60 °C por 24 h (Fig.5).

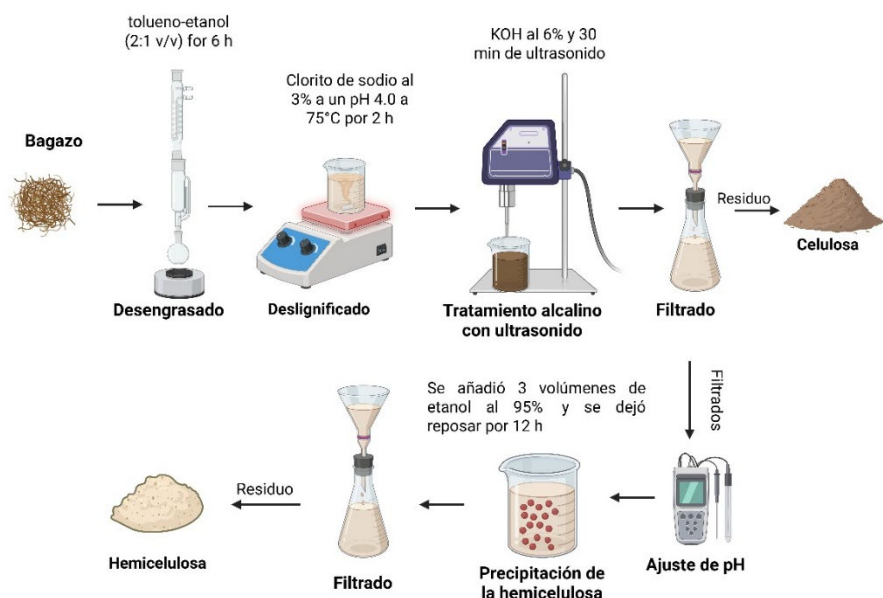


Figura 5. Procedimiento de extracción de CB y HB.

3.2.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Se realizaron las mediciones de las muestras en un espectrómetro de infrarrojo. FTIR Alpha II (Bruker Optics GmbH & Co. KG, Ettlingen, Alemania) acoplado a un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR). Los espectros se generaron en el rango de 4000 - 450 cm⁻¹. El índice de cristalinidad empírico o índice de orden lateral (LOI), se calculó utilizando la ecuación 1:

$$LOI = I_{1437}/I_{899} \quad (1)$$

Donde I es la intensidad de la banda de absorción a 1437 y 899 cm⁻¹.

El índice de cristalinidad total (TCI) se calculó utilizando la ecuación 2:

$$TCI = I_{1378}/I_{2900} \quad (2)$$

Donde I es la intensidad de la banda de absorción a 1378 y 2900 cm⁻¹.

La intensidad del enlace de hidrógeno (HBI) se determinó mediante la ecuación 3:

$$HBI = I_{3339}/I_{1320} \quad (3)$$

Donde I es la intensidad de la banda de absorción a 3339 y 1320 cm⁻¹.

Aunado a esto, se realizó la deconvolución de la región 3700-3000 cm⁻¹ mediante una función gaussiana utilizando el software OriginLab Pro-9.0 (USA). A partir de la banda deconvolucionada se calculó la energía de los enlaces de hidrógeno (EH) y las distancias de enlaces de hidrógeno (RH) utilizando las ecuaciones 4 y 5, respectivamente:

$$E_H = \frac{1}{k} \frac{v_0 - v}{v} \quad [kJ] \quad (4)$$

$$R_H = 2.84 - \frac{v_0 - v}{4430} \quad [\text{\AA}] \quad (5)$$

Donde v_0 es el número de onda de grupos OH libres (3600 cm⁻¹), v es el número de onda -OH enlazados [cm⁻¹] y k es una constante ($\frac{1}{k} = 262.5$ kJ).

3.2.4. Difracción de rayos X

Los patrones de difracción de rayos x de las muestras se obtuvieron utilizando un difractómetro D8 ADVANCE ECO (Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Alemania), con radiación Cu-K α ($\lambda = 1.540 \text{ \AA}$), se midió en un rango de 2θ de 10° a 70° . El tamaño medio de cristal se calculó mediante la ecuación (6):

$$D = \frac{K \lambda}{\beta \cos \theta} \quad [\text{nm}] \quad (6)$$

Donde D es el tamaño medio, K es la constante de Scherrer (0.91), λ es la longitud de onda del rayo X incidente ($\lambda = 1.540 \text{ \AA}$), β representa el ancho completo en la mitad del máximo de la reflexión en la dirección radial (banda de difracción), y θ es el ángulo correspondiente al pico cristalino (ángulo de Bragg).

3.2.5. Medición de tamaño de partícula y potencial Z (ζ)

El tamaño de partícula y la potencial zeta de las muestras se midieron utilizando Zetasizer Nano ZS90 (Malvern Instruments, Worcestershire, Reino Unido). Las muestras se disolvieron en agua desionizada a una concentración de 0.05 % w/w a un pH 7.00 ± 0.01 a 25°C .

3.2.6. Microscopia óptica

Las muestras se observaron con un microscopio óptico (Olympus BX53, Olympus Optical Co., Tokio, Japón) acoplado a una cámara AxioCam ERc 5 s (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Oberkochen, Alemania) con un aumento de 100x.

3.2.7. Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Para observar la morfología de las muestras se utilizó un microscopio electrónico de barrido (JSM6360, JEOL, Tokio, Japón), la captura de las imágenes se realizó a un voltaje de 13kV. Previo a la observación, las muestras se recubrieron con oro para evitar la acumulación de carga superficial.

3.2.8. Determinación del peso molecular por viscosidad

Las mediciones de viscosidad se realizaron en un viscosímetro capilar micro Oswald con un diámetro capilar de 0,65 mm y un volumen de 2 mL, a una

temperatura de 25°C. Para la preparación del disolvente fue 10 mL de hidróxido de bis-(etilendiamina)-cobre(II) (CUEN) y 10 mL de agua Mili-Q (CUEN*H₂O). Es importante señalar que no fue necesario realizar correcciones de Hagenbach. Las muestras extraídas se disolvieron con CUEN*H₂O, y se mantuvo en agitación constante durante al menos 10 min. Posteriormente, se realizaron diluciones tomando volúmenes de 0,5; 1,0 y 1,5 mL, diluyendo hasta 2 mL con disolvente. A continuación, se añadieron 25 mL de CUEN (1 mol/L en agua) y se agitó de manera continua por 15 min. Las soluciones de las muestras no se filtraron antes de las mediciones de viscosidad.

A partir de los tiempos de flujo obtenidos, se calculó la viscosidad de cada solución (η) y la del disolvente (η_0). La viscosidad reducida (η_{red}) se calculó según la ecuación de Huggins:

$$\eta_{red} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 c} \quad (7)$$

donde η es la viscosidad de la solución de las muestras, η_0 la viscosidad del disolvente Cuen-agua Mili-Q y c la concentración de la solución.

La viscosidad reducida (η_{red}) se extrapola a dilución infinita, obteniendo así la viscosidad intrínseca $[\eta]$, de acuerdo con la siguiente ecuación (8):

$$\text{Viscosidad intrínseca } [\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \left(\frac{\eta_{red}}{c} \right) \quad (8)$$

El valor de $[\eta]$ se utilizó para calcular el peso molecular (M) mediante la ecuación de Mark-Houwink-Sakurada:

$$[\eta] = K M^a \quad (9)$$

Donde los parámetros K y a son constantes específicas de las muestras y disolventes a 25°C, los valores fueron obtenidos de Eckelt et al. (2011) de acuerdo con las condiciones experimentales. La ecuación fue transformada a su forma logarítmica, para la determinación del peso molecular (M):

$$\log([\eta]) = \log K + a \log M \quad (10)$$

3.2.9. Análisis térmico

Se realizó un análisis térmico de las muestras utilizando análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) en un analizador térmico simultáneo (STA6000, Perkin Elmer, Waltham, MA, USA) bajo una atmósfera de nitrógeno y un rango de calentamiento de 30 °C a 600 °C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

Las muestras fueron analizadas mediante la técnica de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), esta técnica permite identificar y cuantificar grupos funcionales específicos, proporcionando información sobre la composición química de los materiales lignocelulósicos (Mtibe et al., 2022). En las muestras de CB y HB extraídas del bagazo de maguey, se identificaron bandas similares (Figura 6), con ligeros desplazamientos entre ellas, se encontraron bandas para la celulosa a 3329 cm^{-1} , 2916 cm^{-1} , 1610 cm^{-1} , 1315 cm^{-1} y 888 cm^{-1} y para la hemicelulosa a 3308 cm^{-1} , 2919 cm^{-1} , 1615 cm^{-1} , 1318 cm^{-1} y 898 cm^{-1} . La banda de absorción observada en la región de 3700 a 3000 cm^{-1} corresponde a vibraciones de estiramiento del grupo OH (Rotaru et al., 2024). La banda alrededor de 2916 cm^{-1} se atribuye a la vibración de estiramiento en los grupos CH (Garyntseva et al., 2023). Asimismo, se observó una banda de alta intensidad aproximadamente a 1610 cm^{-1} que corresponde a vibraciones de estiramiento C=C en la lignina (Beroual et al., 2021; Shrestha et al., 2021), mientras que la banda alrededor de 1315 cm^{-1} se asocia con el movimiento de CH en la región cristalina de la celulosa y hemicelulosa (Cárdenas-Zapata et al., 2022). La banda alrededor de 898 cm^{-1} se atribuye a la deformación glicosídica del grupo CH, con contribuciones de vibración de anillo y flexión OH, esto indica la presencia de enlaces β -glicosídicos entre unidades de glucosa ambas muestras (Beroual et al., 2021).

Por otro lado, el espectro CB presentó una banda a 2855 cm^{-1} correspondiente a la vibración de estiramiento asimétrico y simétrico del grupo CH_2 (Beroual et al.,

2021). La banda a 1455 cm^{-1} se relaciona a la deformación asimétrica de CH (Cárdenas-Zapata et al., 2022). La banda alrededor de 1384 cm^{-1} se debe a la flexión de CH y el estiramiento de CH en CH_3 , mientras que la banda en la región a 1149 cm^{-1} generalmente se atribuye a vibraciones COC en celulosa (Caputo et al., 2021). Por su parte, la banda a 1017 cm^{-1} corresponde al estiramiento de CO y COC del enlace glucosídico, relacionados con la vibración esquelética del anillo de piranosa COC de la celulosa, lo que sugiere un aumento en la cristalinidad de la celulosa (Jin et al., 2009; Mohan et al., 2024).

En la HB, se identificó una banda a 1405 cm^{-1} atribuida al estiramiento de CH (Xie et al., 2020) y una banda a 1034 cm^{-1} correspondiente al estiramiento COC de los enlaces glucosídicos, representativos de los xilanos (Sun et al., 2013).

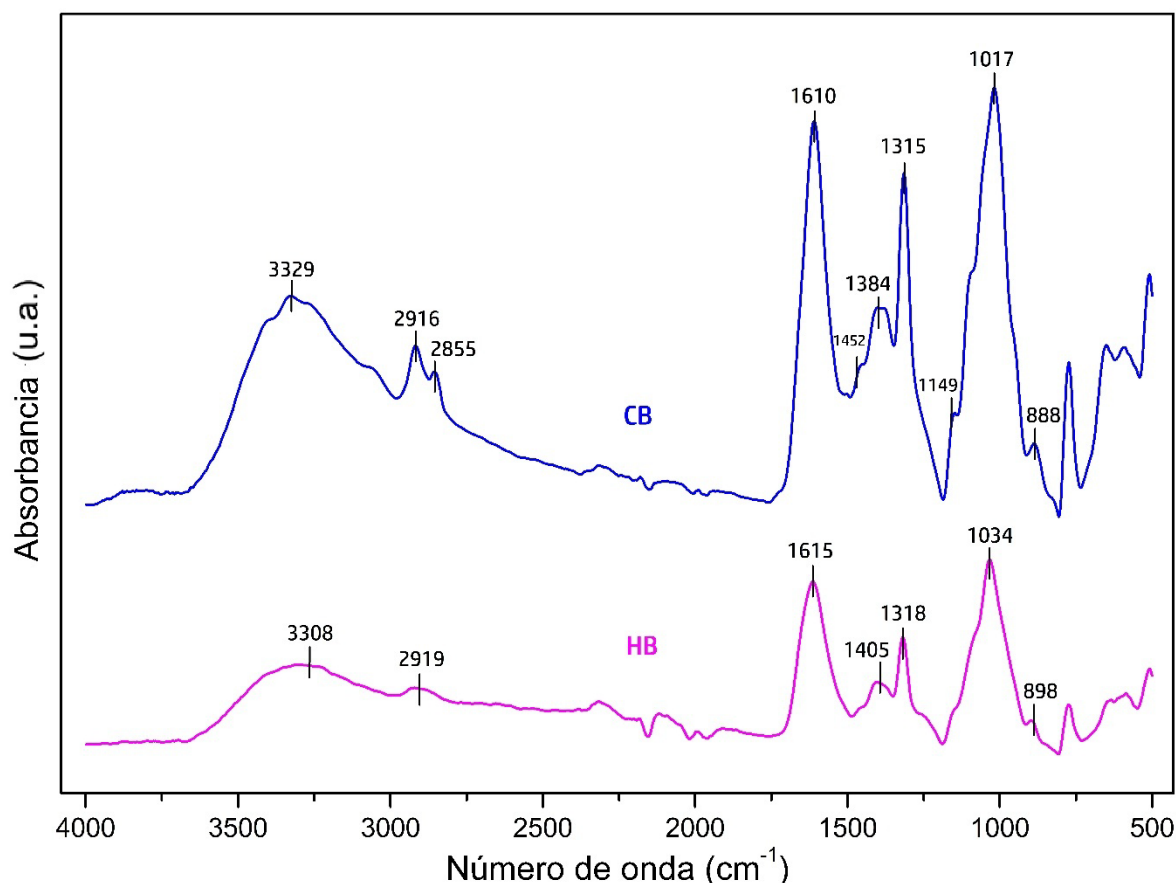


Figura 6. Espectro FTIR de la celulosa (CB) y hemicelulosa (HB) extraída del residuo de bagazo.

Algunas de las bandas espectrales características fueron bastante sensibles a la estructura cristalina de las muestras. Así, las bandas ubicadas a 2919, 1455,

1384 cm^{-1} corresponden a dominios cristalinos y la banda a 898 cm^{-1} a dominios amorfos (Rotaru et al., 2024). El índice de orden lateral (LOI) e índice de cristalinidad total (TCI) se utilizaron para evaluar la razón de cristalinidad y la intensidad de los puentes de hidrógeno (HBI), esta razón está estrechamente relacionada con el sistema cristalino y el grado de regularidad intermolecular, es decir, la cristalinidad, así como la cantidad de agua unida (Rafidison et al., 2020). Los resultados de estos parámetros se muestran en el cuadro 1. La CB mostro valores más altos de LOI y TCI lo que indica que presenta una alta cristalinidad y una estructura más ordenada (Spiridon et al., 2010). En contraste, los valores bajos de la HB pueden indicar que está compuesta por más dominios amorfos en comparación con la celulosa (Poletto et al., 2014). La intensidad de puente de hidrógeno (HBI) de la HB presento un valor de HBI casi dos veces superior al valor de la CB, esto nos indica que hay una mayor cantidad de interacción de puentes de hidrógeno en la CB, esto sugiere que es más propensa a la absorción de agua.

Cuadro 1. Índice de orden lateral (LOI), índice de cristalinidad total (TCI) e intensidad de enlace de hidrógeno (HBI) de muestra de CB y HB.

Muestras	LOI (1437 cm^{-1}/899 cm^{-1})	TCI (1378cm^{-1}/2900cm^{-1})	HBI (3339 cm^{-1}/1320 cm^{-1})
CB	1.612 $\pm$ 0.12	1.275 $\pm$ 0.10	1.644 $\pm$ 0.39
HB	1.146 $\pm$ 0.10	0.640 $\pm$ 0.28	4.344 $\pm$ 0.47

$\pm$ Los valores representan la media desviación estándar

La deconvolución del espectro en FTIR se utiliza para separar bandas de absorción superpuestas, permitiendo la identificación y cuantificación de grupos funcionales individuales dentro de una muestra. La deconvolución del espectro FTIR mejora la resolución de los datos espectrales, facilitando una comprensión más clara de la composición molecular y las interacciones presentes (Tang & Zhang, 2025). Debido a que la identificación específica de estos puentes de hidrógeno es difícil a partir de los espectros originales, la aplicación de métodos matemáticos como la deconvolución resulta esencial. En la Figura 7 se presenta el espectro deconvolucionado en la región 3700–3000 cm^{-1} utilizando curvas de función gaussiana. En negro se muestra la curva experimental y en azul la curva teórica obtenida de la suma de todas las curvas deconvolucionadas. Se

detectaron dos bandas resultantes, la primera se atribuye a las interacciones intramoleculares O(2)HO(6), y se absorben a 3399 cm^{-1} y 3414 cm^{-1} para la CB y HB, respectivamente. Mientras que la segunda se atribuye a puentes de hidrógeno intermoleculares O(6)HO(3), con una absorción a números de onda de alrededor de 3233 cm^{-1} para ambas muestras.

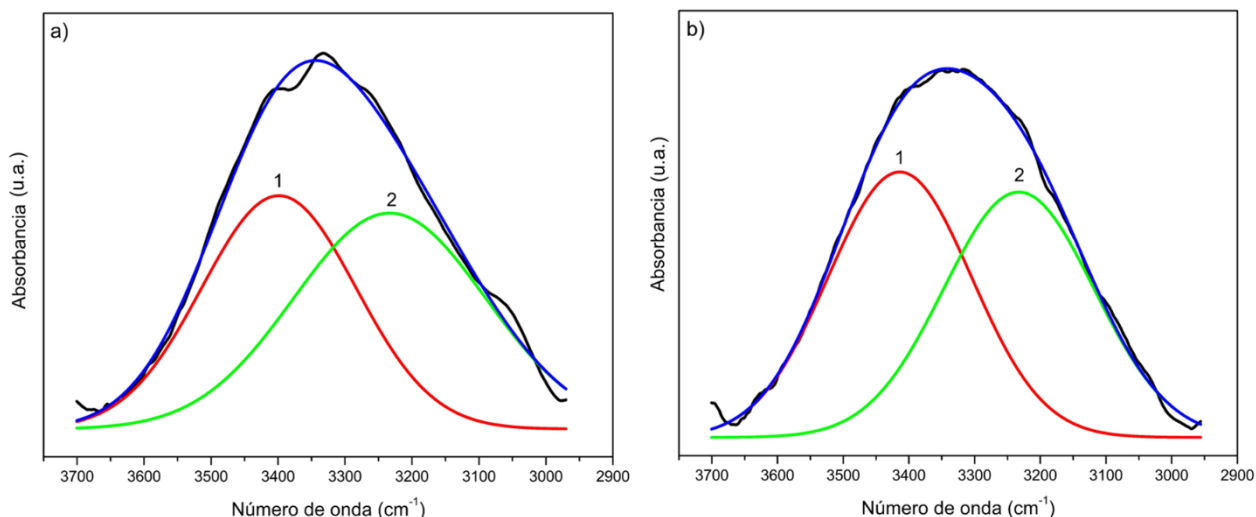


Figura 7. Deconvolución Gaussiana de las bandas FTIR, en la región $3700\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$, de a) CB y b) HB.

En el cuadro 2 se muestra la energía calculada y distancias de los puentes de hidrógeno, se puede observar que la energía del enlace de hidrógeno intermolecular O(6)HO(3) es mayor en ambas muestras (27.820 kJ y 26.872 kJ) y su distancia es menor (2.744 Å). En los enlaces de hidrógeno intramolecular O(2)HO(6) hay una disminución en la energía (14.609 kJ y 12.077 kJ) y un aumento en las distancias de los puentes de hidrógeno (2.789 Å y 2.798 Å), esto indica una disposición de empaquetamiento menos ordenado de los segmentos macromoleculares (Cichosz & Masek, 2020).

Las distancias reducidas para el puente de hidrógeno intermolecular O(6)HO(3) proporciona evidencia que la disposición de empaquetamiento es ordenada y son generalmente más fuertes, teniendo cambios en la estructura cristalina, es decir, un aumento en el grado de la cristalinidad (Rotaru et al., 2024).

Cuadro 2. Enlaces de energía y distancias de enlace de hidrógeno.

Muestra	Tipo de enlace de hidrógeno	EH [kJ]	R [Å]
CB	O(2)HO(6) intramolecular	E3399 : 14.609 ± 0.99	R3399 : 2.789 ± 0.005
	O(6)HO(3) intermolecular	E3233 : 27.820 ± 1.92	R3233 : 2.744 ± 0.01
HB	O(2)HO(6) intramolecular	E3414 : 12.077 ± 1.93	R3414 : 2.798 ± 0.0003
	O(6)HO(3) intermolecular	E3233 : 26.873 ± 2.54	R3233 : 2.748 ± 0.007

± Los valores representan la media desviación estándar

3.3.2. Difracción de rayos X

El patrón de XRD de la CB presento bandas características alrededor de 14.95°, 22.23°, 35.96° (Figura 8), lo que indica que el tratamiento permitió conservar la estructura típica de la celulosa I (celulosa nativa), donde los patrones combinan dos formas polimórficas: monoclinica y triclinica (Ahmima et al., 2024). Estas bandas se observan generalmente para fuentes lignocelulósicas naturales y sus derivados celulósicos (Bahloul et al., 2021). Las señales asociadas a la celulosa estuvieron presentes, pero con diferente intensidad y ensanchamiento debido a la cantidad de celulosa cristalina presente, las señales ensanchadas se asociaron a la presencia de partículas no cristalinas (Gallardo-Sanchez et al., 2019). Para la muestra de HB se observaron en el espectro de difracción bandas agudos que indicaron cristalinidad en la muestra. Se obtuvieron tamaños de cristal de 38.30 nm y 60.40 nm, para CB y HB respectivamente.

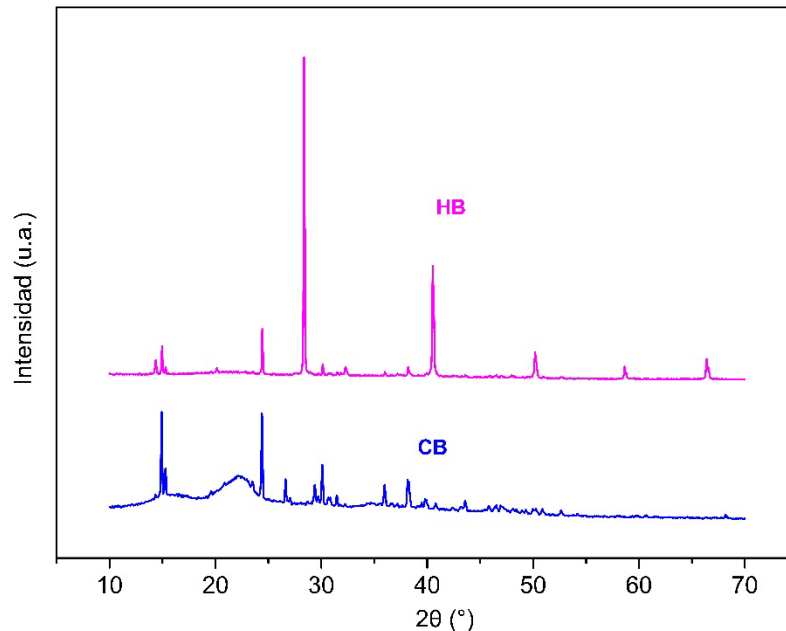


Figura 8. Patrones de difracción de rayos X de CB y HB extraídas del bagazo.

3.3.3. Medición de tamaño de partícula y potencial Z (ζ)

La estabilidad de la CB y HB en suspensión se determinó mediante la medición de potencial zeta, los valores de las muestras fueron de $-20.15 \text{ mV} \pm 1.03$ y $-15.15 \pm 0.48 \text{ mV}$, respectivamente. El valor negativo indica la presencia de grupos OH en la superficie de las muestras y están cargadas negativamente (Souza et al., 2019; Yang et al., 2017). Por lo general, un valor en el rango -15 a 15 mV representa el inicio de la aglomeración (Mohaiyiddin et al., 2016), lo que indica que las partículas de HB no tienen suficiente carga para repelerse entre sí, por lo que se forma la aglomeración. Una suspensión estable debe tener un valor menor que -30 mV y mayor que 30 mV (Mohaiyiddin et al., 2016). La muestra de CB presentó un valor de -20.15 mV lo que podría indicar que es moderadamente estable, pero con cierta tendencia a aglomerarse en suspensión. Este valor de la CB concuerda con otros estudios, como el de (Saha & Ghosh, 2019) quienes reportaron valores de -20.97 mV y -18.3 mV para celulosa nanocristalina extraída del bagazo de caña de azúcar. Por otro lado, Tonoli et al. (2012), reportaron un valor de $-19.1 \pm 0.4 \text{ mV}$ para micro/nanofibrillas de celulosa obtenidas de pulpa

kraft de *Eucalyptus urograndis* mediante ultrasonido. La diferencia en los valores obtenidos para CB y HB podría atribuirse a la posibilidad de entrelazamiento y la presencia de lignina residual en las muestras; esto último concuerda con análisis por FTIR discutido en la sección 3.1, lo que probablemente afecta los resultados (Souza et al., 2019).

El tamaño promedio de las partículas de CB en suspensión fue de 1039.6 ± 45.32 nm, mientras que el de HB fue de 1332.6 ± 24.11 nm, lo que indica que las partículas de CB tienen un tamaño menor en comparación con las de HB. Este mayor tamaño en las partículas de HB permite aumentar su tendencia a agregarse, debido a su menor carga superficial. Los tamaños de partícula obtenidos en este trabajo son diferentes a los reportados en otros estudios para nanocelulosa y celulosa nanocristalina. Para la nanocelulosa se han reportado valores entre 305.2 a 838.3 nm (Rozenberga et al., 2016), así como inferiores a 100 nm (Mohaiyiddin et al., 2016) y para celulosa nanocristalina se han reportado valores desde valores de 9 a 29 nm (Harahap et al., 2018) hasta valores altos entre 1383.67 a 4000 nm (Soon et al., 2023). Esta variabilidad puede atribuirse a los diferentes métodos de extracción y al tipo de fuente utilizada. El tratamiento mecánico que se realizó en este estudio puede debilitar los enlaces de hidrógeno entre las fibras; las cuales se destruyen en presencia de una potencia de oscilación mecánica suficientemente fuerte producida por ondas ultrasónicas (Hidayatullah et al., 2024).

3.3.4. Microscopía óptica

En la Figura 9 se muestra la imagen de fibras obtenidas tras el tratamiento químico con ultrasonido. La longitud de las fibras celulósicas se rompió en pedazos pequeños y con tendencia a agregarse, esto último se puede corroborar con los datos obtenidos de potencial zeta. Se aprecia en ambas muestras fragmentos de fibras pequeñas y grandes, lo que sugiere el efecto agresivo del tratamiento sobre el material fibroso, en donde el ultrasonido debilitó las uniones fibrilares y el alcalino eliminó fracciones desfibriladas (Freitas et al., 2022).

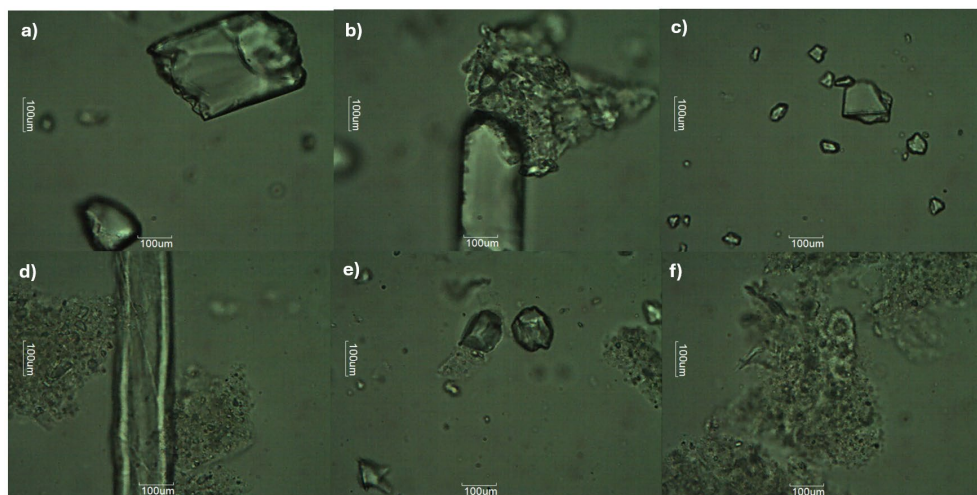


Figura 9. Microscopía óptica de CB (a,b,c) y HB (d,e,f) obtenidas de bagazo de maguey mediante tratamiento alcalino con ultrasonido.

3.3.5. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Los cambios morfológicos de las muestras de CB y HB se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido. En las muestras se observaron fibrillas de forma y tamaños irregulares. El tratamiento con ultrasonido puede romper las interfaces relativamente débiles entre las fibras, que están unidas entre sí por enlaces de hidrógeno, permitiendo desintegrar las fibras de mayor tamaño en otras mucho más pequeñas (Yasim-Anuar et al., 2018), debido al efecto de cavitación que forma microburbujas que reducen la cohesión entre las microfibrillas, promoviendo su separación (Chowdhury & Hamid, 2016). Las fibrillas presentaron una superficie rugosa debido a la presencia de material no celulósico (Syafri et al., 2022). En CB se aprecia formación de poros (Figura 10c) debido al hinchamiento de las partículas de celulosa en la solución alcalina, que podrían haber sufrido simultáneamente desintegración y rotura superficial, debido al tratamiento combinado. Para el caso de la muestra HB, el tratamiento alcalino con ultrasonido provocó que los haces de fibras se separaran en fibras individuales y aisladas.

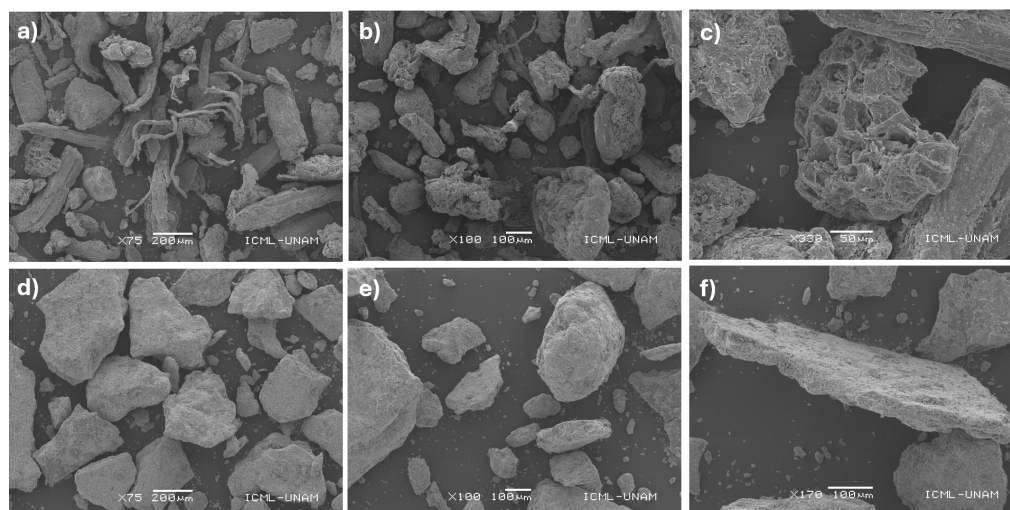


Figura 10. Micrográficas SEM de CB (a,b,c) y HB (d,e,f).

3.3.6. Determinación de peso molecular por viscosidad

El peso molecular determinado de HB (19.153 kDa) fue menor a la obtenida de CB (53.324 kDa), esto se debe a que las hemicelulosas son un polímero que suelen tener un peso molecular relativamente inferior en comparación con la celulosa (Farhat et al., 2017), a que las cadenas poliméricas tienen ramificaciones cortas y su morfología es amorfa; también a que son parcialmente solubles en agua (Hu et al., 2020). Así mismo, Xie et al. (2020) encontraron que el peso molecular de las hemicelulosas disminuyó después del tratamiento con ultrasonido, obteniendo valores de 29.923 kDa para hemicelulosas solubles en agua y 74.872 kDa para hemicelulosas solubles en álcali, extraídas de la medula del bagazo de caña, lo que puede deberse al hecho de que el ultrasonido rompe fácilmente los enlaces glucosídicos, lo que derivó en la degradación de las hemicelulosas. Por otra parte, se presentó la misma situación en la celulosa. Abdullah et al. (2016) observaron que la celulosa extraída de fibras de racimos vacíos de frutos de palma aceitera sometida a tratamiento con ultrasonido tuvo un peso molecular menor en comparación al tratamiento con autoclave. El peso molecular puede variar dependiendo de la biomasa y del método de extracción. Cuando un peso molecular es bajo, se presenta escaso entrelazamiento intermolecular, lo que resulta en nanofibras de un diámetro menor y en mayor

número. Por el contrario, a medida que el peso molecular es mayor, las cadenas moleculares tienden a entrelazarse, por lo que las nanofibras son más grandes en diámetro y menor en cantidad, y con mejores propiedades mecánicas (Xie et al., 2021).

3.3.7. Análisis térmico

Las propiedades térmicas de CB y HB se evaluaron, mediante análisis termogravimétrico (ATG) y la primera derivada (DTG); así como por calorimetría diferencial de barrido (DSC). Los termogramas de ATG indican cambios en el peso durante el calentamiento, por su parte los termogramas de DTG presentan las temperaturas máximas de descomposición, correspondientes a las etapas de pérdida de peso en el ATG (Lam et al., 2017). Los termogramas de ATG (Figura 11), indican cuatro etapas de pérdida de peso. En la primera etapa, de 30 °C a 200 °C, esto puede atribuirse a la evaporación de agua (Evans et al., 2019). La muestra de CB tuvo mayor pérdida de peso (9.55 %), mientras que la HB tiene una pérdida de alrededor 7.92 %. Esta pérdida también se puede observar en los máximos de DTG: a 66 °C para CB y 65 °C para HB, identificando las temperaturas máximas de evaporación.

La segunda etapa se presentó en el rango de 200 °C a 320 °C, lo cual se asocia con el inicio de la degradación térmica de los materiales celulósicos (Melesse et al., 2022), en ella, la pérdida de peso puede atribuirse a la fase de pirólisis. La pérdida de peso de la CB fue de 32.04%, esto puede deberse a que las cadenas de celulosa y los enlaces químicos (CC, CO y CH) se escinden, lo que lleva a la descomposición y degradación de la estructura química de la celulosa (Ahmima et al., 2024). En el caso de la HB presentó una pérdida de peso de 22.40%, que puede relacionarse a la despolimerización y degradación estructural de la hemicelulosa amorfa en sus hidrocarburos correspondientes (CH_3COOH , CH_4 , CO y CO_2) (Ghosh et al., 2021). En DTG se muestra la degradación térmica máxima a 290 °C para CB, mientras que HB mostró dos picos simultáneos a 247 °C y 291 °C, lo que indica un proceso de degradación en dos temperaturas.

La tercera etapa de degradación térmica ocurrió en el intervalo de 320 °C a 470 °C. En este rango, la pérdida de masa fue de 14.32 % para CB y de 9.80 % para HB. Las curvas DTG mostraron un pico máximo de degradación a 471 °C en CB y a 421 °C en HB, lo que indica que CB posee una mayor estabilidad térmica. La etapa final de degradación, observada alrededor de los 590 °C, corresponde a la descomposición completa de las muestras, dando lugar a la formación del residuo carbonizado.

El termograma DSC de la muestra CB mostró dos pequeños eventos endotérmicos a 75 °C y 163 °C, asociados con procesos de absorción de calor. Además, se registró un pico endotérmico menor a 388 °C, atribuido a la despolimerización de la celulosa y la ruptura de enlaces glucosídicos (Ahmima et al., 2024). En el caso de la muestra HB, se observó un único pico endotérmico a 246 °C, correspondiente a la descomposición de la hemicelulosa.

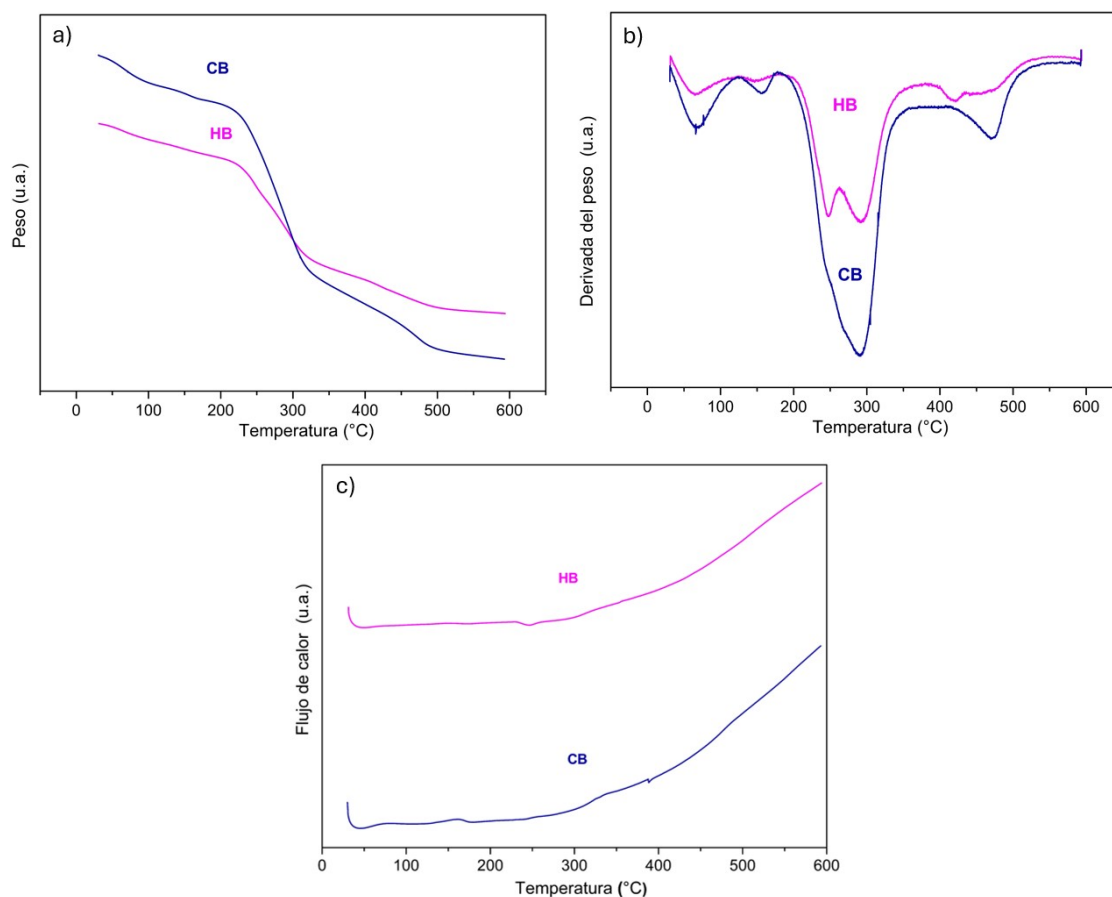


Figura 11. Termogramas del análisis térmico simultáneo de a) TGA, b) DTG y c) DSC para la CB y HB.

3.4. Conclusión

El tratamiento alcalino con ultrasonido mostro ser un método prometedor para obtener celulosa y hemicelulosa del bagazo de maguey. Si bien las fibras de bagazo son duras, este tratamiento permitió el aislamiento de esta biomasa lignocelulósica. A pesar de que se logró obtener partículas pequeñas, al compararlas con material extraído de otras fuentes vegetales y métodos diferentes, eran partículas grandes.

El tratamiento de ultrasonido realizó una función importante que fue destruir la pared celular del bagazo, permitiendo la separación de los compuestos, esto fue debido a que el método genera un efecto de cavitación acústica que genera una explosión de las microburbujas en la materia prima, permitiendo la fragmentación del material. Aunque esto afectó la estructura, ya que en el análisis de difracción de rayos X se observó que CB tiene una estructura cristalina, típica de la celulosa tipo I y un mayor ordenamiento en HB. El análisis termogravimétrico mostro que CB presentó una mayor estabilidad térmica en comparación con HB, lo que permitiría que sea un buen material de refuerzo para su aplicación en compuestos poliméricos debido a que permitiría su procesamiento a mayor temperatura. La celulosa y hemicelulosa obtenidas del bagazo de maguey muestran potencial para su uso en el desarrollo de aplicaciones tecnológicas como hidrogeles, recubrimientos, materiales compuestos, que se debe explorar en futuras investigaciones.

3.5. Literatura citada

- Abdullah, M. A., Nazir, M. S., Raza, M. R., Wahjoedi, B. A., & Yussof, A. W. (2016). Autoclave and ultra-sonication treatments of oil palm empty fruit bunch fibers for cellulose extraction and its polypropylene composite properties. *Journal of Cleaner Production*, 126, 686–697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.107>
- Ahmima, S., Naar, N., Jędrzejczak, P., Kłapiszewska, I., Kłapiszewski, Ł., & Jesionowski, T. (2024). Isolation and Characterization of Novel Cellulose Micro/Nanofibers from *Lygeum spartum* Through a Chemo-Mechanical Process. *Polymers*, 16(21), 3001. <https://doi.org/10.3390/polym16213001>
- Alemán-Nava, G. S., Gatti, I. A., Parra-Saldivar, R., Dallemand, J.-F., Rittmann, B. E., & Iqbal, H. M. N. (2018). Biotechnological revalorization of Tequila waste and by-product streams for cleaner production – A review from bio-refinery perspective. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3713–3720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.134>
- Avendaño-Rito, M. del C., Aquino-González, L. V., Ríos, P. A. F., Martínez-Vargas, A., & Sarubbi-Baltazar, F. A. (2024). Use of Agave *Angustifolia* Haw Bagasse Pulp as An Additive Powder For Baking Flour. *Revista de Gestão - RGSA*, 18(8), e07057–e07057. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n8-109>
- Bahloul, A., Kassab, Z., El Bouchti, M., Hannache, H., Qaiss, A. E. K., Oumam, M., & El Achaby, M. (2021). Micro- and nano-structures of cellulose from eggplant plant (*Solanum melongena* L) agricultural residue. *Carbohydrate Polymers*, 253, 117311. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117311>
- Beroual, M., Boumaza, L., Mehelli, O., Trache, D., Tarchoun, A. F., & Khimeche, K. (2021). Physicochemical Properties and Thermal Stability of Microcrystalline Cellulose Isolated from Esparto Grass Using Different Delignification Approaches. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(1), 130–142. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01858-w>
- Blasi, A., Verardi, A., Lopresto, C. G., Siciliano, S., & Sangiorgio, P. (2023). Lignocellulosic Agricultural Waste Valorization to Obtain Valuable Products: An Overview. *Recycling*, 8(4), 61. <https://doi.org/10.3390/recycling8040061>
- Caputo, D., Fusco, C., Nacci, A., Palazzo, G., Murgia, S., D'Accolti, L., & Gentile, L. (2021). A selective cellulose/hemicellulose green solvents extraction from buckwheat chaff. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100094>

- Cárdenas-Zapata, R., Palma-Ramírez, D., Flores-Vela, A. I., Romero-Partida, J. N., Paredes-Rojas, J. C., Márquez-Rocha, F. J., & Bravo-Díaz, B. (2022). Structural and thermal study of hemicellulose and lignin removal from two types of sawdust to isolate cellulose. *MRS Advances*, 7(4), 49–55. <https://doi.org/10.1557/s43580-022-00225-2>
- Chowdhury, Z. Z., & Hamid, S. B. A. (2016). Preparation and characterization of nanocrystalline cellulose using ultrasonication combined with a microwave-assisted pretreatment process. *BioResources*, 11(2), 3397–3415.
- Cichosz, S., & Masek, A. (2020). IR Study on Cellulose with the Varied Moisture Contents: Insight into the Supramolecular Structure. *Materials*, 13(20), 4573. <https://doi.org/10.3390/ma13204573>
- Evans, S. K., Wesley, O. N., Nathan, O., & Moloto, M. J. (2019). Chemically purified cellulose and its nanocrystals from sugarcane baggase: Isolation and characterization. *Heliyon*, 5(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02635>
- 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. *Industrial Crops and Products*, 107, 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.055>
- Freitas, P. A. V., González-Martínez, C., & Chiralt, A. (2022). Applying ultrasound-assisted processing to obtain cellulose fibres from rice straw to be used as reinforcing agents. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76, 102932. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102932>
- Gallardo-Sanchez, M. A., Anzaldo Hernández, J., Ramirez Casillas, R., Escalante Vazquez, J. I., Escobar Hernández, D., Soltero Martínez, J. F. A., García Enríquez, S., & Macias Balleza, E. R. (2019). Obtaining soluble-grade cellulose pulp from Agave tequilana Weber var. Azul bagasse. *BioResources*, 14(4), 9867–9881.
- Garyntseva, N. V., Levdansky, V. A., Kondrasenko, A. A., Skripnikov, A. M., & Kuznetsov, B. N. (2023). Isolation and Characterization of the Hemicelluloses Polysaccharides of Scots Pine (*Pinus Sylvestris*) Wood. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 49(7), 1596–1606. <https://doi.org/10.1134/S1068162023070683>
- Ghosh, D., Tanner, T., Lavoie, J. M., Garnier, G., & Patti, A. F. (2021). *An integrated approach for hemicellulose extraction from forest residue*. 16(2), 524–2547.

- Harahap, H., Nawansyah, R., Nasution, H., Taslim, T., & Iriany, I. (2018). Isolation and Characterization of Nanocrystal from Corn cob Waste Using H₂SO₄ Hydrolysis Method. *International Journal of Engineering*, 31(4), 533–537.
- Hidayatullah, K., Rahayu, S., Wirawan, R., Masrurroh, Sudirman, & Ali, M. (2024). CHARACTERIZATION OF BIOPOLYMER NANOCELLULOSE FIBER FROM CORN COB WASTE (ZEA MAYS L) USING CHEMICAL-MECHANICAL TREATMENTS. *RASAYAN Journal of Chemistry*, 17(03), 897–904. <https://doi.org/10.31788/RJC.2024.1738814>
- Hu, L., Fang, X., Du, M., Luo, F., & Guo, S. (2020). Hemicellulose-Based Polymers Processing and Application. *American Journal of Plant Sciences*, 11(12), 2066–2079. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1112146>
- Jin, A. X., Ren, J. L., Peng, F., Xu, F., Zhou, G. Y., Sun, R. C., & Kennedy, J. F. (2009). Comparative characterization of degraded and non-degradative hemicelluloses from barley straw and maize stems: Composition, structure, and thermal properties. *Carbohydrate Polymers*, 78(3), 609–619. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.05.024>
- Kundu, P., Kansal, S. K., & Elumalai, S. (2021). Synergistic Action of Alkalies Improve the Quality Hemicellulose Extraction from Sugarcane Bagasse for the Production of Xylooligosaccharides. *Waste and Biomass Valorization*, 12(6), 3147–3159. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01235-7>
- Lam, N. T., Chollakup, R., Smitthipong, W., Nimchua, T., & Sukyai, P. (2017). Characterization of Cellulose Nanocrystals Extracted from Sugarcane Bagasse for Potential Biomedical Materials. *Sugar Tech*, 19(5), 539–552. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0507-1>
- Lazaro-Romero, A., Contreras-Ramos, S. M., Dehonor-Gómez, M., Rojas-García, J. M., & Amaya-Delgado, L. (2024). Optimizing cellulose fraction for enhanced utility: Comparative pre-treatment of Agave tequilana Weber var. blue bagasse fiber for sustainable applications. *Heliyon*, 10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29149>
- Lu, Y., He, Q., Fan, G., Cheng, Q., & Song, G. (2021). Extraction and modification of hemicellulose from lignocellulosic biomass: A review. *Green Processing and Synthesis*, 10(1), 779–804. <https://doi.org/10.1515/gps-2021-0065>
- Márquez-Rangel, I., Cruz, M., Ruiz, H. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Laredo, A., & Belmares, R. (2023). Agave waste as a source of prebiotic polymers: Technological applications in food and their beneficial health effect. *Food Bioscience*, 56, 103102. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103102>

- Martinez-Solano, K. C., Garcia-Carrera, N. A., Tejada-Ortigoza, V., García-Cayuela, T., & Garcia-Amezquita, L. E. (2021). Ultrasound Application for the Extraction and Modification of Fiber-Rich By-Products. *Food Engineering Reviews*, 13(3), 524–543. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09269-2>
- Melesse, G. T., Hone, F. G., & Mekonnen, M. A. (2022). Extraction of Cellulose from Sugarcane Bagasse Optimization and Characterization. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 1712207. <https://doi.org/10.1155/2022/1712207>
- Mohaiyiddin, M. S., Lin, O. H., Owi, W. T., Chan, C. H., Chia, C. H., Zakaria, S., Villagracia, A. R., & Akil, H. M. (2016). Characterization of nanocellulose recovery from *Elaeis guineensis* frond for sustainable development. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(8), 2503–2512. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1191-2>
- Mohan, P., Mohd Yusof, N. S., Thomas, S., & Abd Rahman, N. M. M. (2024). Ultrasound-alkali-assisted isolation of cellulose from coconut shells. *BioResources*, 19(4), 7870–7885.
- Mtibe, A., John, M. J., Andrew, J. E., & Mokhena, T. C. (2022). Sequential extraction of carbohydrates and lignin from agricultural waste and their structural characterization. *Biomaterials and Polymers Horizon*, 1(2). <https://doi.org/10.37819/bph.001.02.0216>
- Poletto, M., Ornaghi, H. L., & Zattera, A. J. (2014). Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties. *Materials*, 7(9), 6105–6119. <https://doi.org/10.3390/ma7096105>
- Rafidison, B. H., Ramasawmy, H., Chummun, J., & Florens, F. B. V. (2020). Using infrared spectrum analyses to predict tensile strength of fibres in a group of closely related plant species: Case of Mascarenes *Pandanus* spp. *SN Applied Sciences*, 2(11), 1922. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03667-1>
- Rotaru, R., Fortună, M. E., Ungureanu, E., & Brezuleanu, C. O. (2024). Effects of Ultrasonication in Water and Isopropyl Alcohol on High-Crystalline Cellulose: A Fourier Transform Infrared Spectrometry and X-ray Diffraction Investigation. *Polymers*, 16(16), 2363. <https://doi.org/10.3390/polym16162363>
- Rozenberga, L., Vikele, L., Vecbiskena, L., Sable, I., Laka, M., & Grinfelds, U. (2016). Preparation of Nanocellulose Using Ammonium Persulfate and Method's Comparison with other Techniques. *Key Engineering Materials*, 674, 21–25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.674.21>

- Ruiz-Camou, C., Núñez, J., & Musule, R. (2023). Evaluating the environmental performance of mezcal production in Michoacán, México: A life cycle assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(12), 1658–1671. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02237-y>
- Saha, S., & Ghosh, R. (2019). Cellulose Nanocrystals from lignocellulosic agro-waste: A comparative study on Conventional and Ultrasonic Assisted Preparation Methods. *Materials Today: Proceedings*, 11, 628–636. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.020>
- Shrestha, P., Sadiq, M. B., & Anal, A. K. (2021). Development of antibacterial biocomposites reinforced with cellulose nanocrystals derived from banana pseudostem. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100112>
- Soon, C. Y., Lim, C. S. S., Hariyanto, Y., Talib, R. A., Abdan, K., Wong, C. W., & Chan, E. W. C. (2023). Optimization of nanocrystalline cellulose particle size using one-factor-at-a-time method under different acid hydrolysis parameters. *Science, Engineering and Health Studies*, 17, 23030001–23030001. <https://doi.org/10.69598/sehs.17.23030001>
- Souza, A. G. de, Rocha, D. B., Kano, F. S., & Rosa, D. dos S. (2019). Valorization of industrial paper waste by isolating cellulose nanostructures with different pretreatment methods. *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.031>
- Spiridon, I., Teacă, C.-A., & Bodîrlău, R. (2010). Structural changes evidenced by FTIR spectroscopy in cellulosic materials after pre-treatment with ionic liquid and enzymatic hydrolysis. *BioResources*, 6(1), 400–413. <https://doi.org/10.15376/biores.6.1.400-413>
- Sun, S.-L., Wen, J.-L., Ma, M.-G., & Sun, R.-C. (2013). Successive alkali extraction and structural characterization of hemicelluloses from sweet sorghum stem. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 2224–2231. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.098>
- Syafri, E., Jamaluddin, Sari, N. H., Mahardika, M., Amanda, P., & Ilyas, R. A. (2022). Isolation and characterization of cellulose nanofibers from *Agave gigantea* by chemical-mechanical treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 200, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.111>
- Tang, B., & Zhang, F. (2025). Fourier Transform Infrared Spectroscopy. In *Energy Storage Materials Characterization* (pp. 419–446). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9783527834679.ch17>

- Tonoli, G. H. D., Teixeira, E. M., Corrêa, A. C., Marconcini, J. M., Caixeta, L. A., Pereira-da-Silva, M. A., & Mattoso, L. H. C. (2012). Cellulose micro/nanofibres from *Eucalyptus* kraft pulp: Preparation and properties. *Carbohydrate Polymers*, 89(1), 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.02.052>
- Wang, C., Tallian, C., Su, J., Vielnascher, R., Silva, C., Cavaco-Paulo, A., Guebitz, G. M., & Fu, J. (2018). Ultrasound-assisted extraction of hemicellulose and phenolic compounds from bamboo bast fiber powder. *PLOS ONE*, 13(6), e0197537. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197537>
- Xie, K., Tu, H., Dou, Z., Liu, D., Wu, K., Liu, Y., Chen, F., Zhang, L., & Fu, Q. (2021). The effect of cellulose molecular weight on internal structure and properties of regenerated cellulose fibers as spun from the alkali/urea aqueous system. *Polymer*, 215, 123379. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123379>
- Xie, Y., Guo, X., Ma, Z., Gong, J., Wang, H., & Lv, Y. (2020). Efficient Extraction and Structural Characterization of Hemicellulose from Sugarcane Bagasse Pith. *Polymers*, 12(3), 608. <https://doi.org/10.3390/polym12030608>
- Yang, X., Han, F., Xu, C., Jiang, S., Huang, L., Liu, L., & Xia, Z. (2017). Effects of preparation methods on the morphology and properties of nanocellulose (NC) extracted from corn husk. *Industrial Crops and Products*, 109, 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.032>
- Yasim-Anuar, T. A. T., Ariffin, H., & Hassan, M. A. (2018). Characterization of cellulose nanofiber from oil palm mesocarp fiber produced by ultrasonication. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 368(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/368/1/012033>

4. AISLAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE CELULOSA DE PENCAS DE MAGUEY MEDIANTE TRATAMIENTO ALCALINO CON ULTRASONIDO

Resumen

Las pencas de maguey es un residuo agrícola con componentes lignocelulósicos abundantes. Este estudio investiga las propiedades térmicas, estructurales, morfología de la celulosa aislada por tratamiento químico con ultrasonido. La caracterización se realizó mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (XRD), potencial z, microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía óptica, peso molecular y térmica mediante TGA, DTG y DCS. Los resultados de FTIR mostraron que los grupos funcionales característicos de la celulosa y mostrando que tiene una estructura cristalina. La XRD mostró que las celulosas mantenían la estructura de celulosa tipo I. La caracterización morfológica reveló una superficie rugosa y porosa, con fibrillas desordenadas de forma irregular debido al tratamiento con ultrasonido. El análisis térmico mostró que CM presentó una mejor estabilidad térmica en comparación a CE. Los resultados indicaron que se conservaron las principales propiedades de las celulosas y mostró que la extracción asistida por ultrasonido es un tratamiento prometedor para aislar celulosa a partir de pencas de maguey.

Palabras clave: Extracción de celulosa; ultrasonido; pencas de mague; tratamiento químico

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua,
Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Ing. Yulinali Valente Morales

Director de tesis: Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

4.1. Introducción

El *Agave karwinskii*, también conocido como maguey “madrecuishe”, es una especie que tiene una distribución restringida en el valle de Tehuacán (Puebla) y en los Valles Centrales y Sierra Sur de Oaxaca, ha sido aprovechado en los últimos años debido al auge en la producción del mezcal (Vázquez-Pérez et al., 2020). El *Agave angustifolia* Haw, también conocido como maguey “espadín”, es una de las especies más ampliamente distribuida y cultivada en todo México (Cabrera-Toledo et al., 2022). El estado de Oaxaca es el principal productor de mezcal, aportando el 90.70% de la producción nacional en el año 2024 (COMERCAM, 2025). Debido a las grandes cantidades de producción de esta bebida se generan grandes cantidades de residuos agrícolas como el bagazo y las hojas o “pencas”, las pencas frescas representan entre el 25% y el 50% de la planta (Álvarez-Chávez et al., 2021), y comúnmente se dejan en la superficie del suelo y no se aprovechan, lo que causa un peligro ambiental, al ser un potencial reservorio de microbios patógenos y parásitos (Pérez Zavala et al., 2020). Las hojas son un material lignocelulósico compuesto principalmente de fibras fuertes y gruesas, la composición puede variar dependiendo de la especie, celulosa 72-20.7%, hemicelulosa 24-3.7% y de lignina de 26.1-2.7% (Álvarez-Chávez et al., 2021).

La celulosa es un compuesto orgánico perteneciente a los polisacáridos y se encuentra abundantemente en las paredes celulares de las plantas. Este compuesto desempeña un papel importante en la estructura y la resistencia de las plantas (Riseh et al., 2024). En la era moderna, los problemas ambientales se han convertido en preocupaciones importantes, y las aplicaciones innovadoras que utilizan fibras naturales pueden brindar una solución. La celulosa ha demostrado potencial para usarse como material básico en diversas aplicaciones e invenciones, como envases, papel, aplicaciones biomédicas (Motaung, 2021). Hay varios métodos para aislar la celulosa, como extracción alcalina, hidrólisis ácida, ultrasonido, entre otros métodos (Domingues et al., 2016; Hidayatullah et al., 2024). En los últimos años la extracción por ultrasonido ha adquirido una gran relevancia, debido a que reduce la necesidad de productos químicos agresivos y

mejora el rendimiento, lo convierte en un método más ecológico y eficiente energéticamente, los efectos mecánicos del ultrasonido en solución acuosa pueden producir alta presión, temperatura y fuerza de corte extrema debido al efecto de la cavitación, mejoran la transferencia de masa y aceleran la descomposición de la matriz lignocelulósica, algo menos probable con las técnicas convencionales (Mohan et al., 2024; Singh et al., 2020a). El pretratamiento alcalino es un método que utiliza principalmente álcalis no contaminantes y no corrosivo, es altamente eficiente en la eliminación de lignina, a pesar de que el pretratamiento alcalino es eficaz, requiere un alto consumo de productos químicos y es un proceso muy extenso, un método combinado mecánico-químico es adecuado para intensificar las reacciones del pretratamiento alcalino para disminuir el consumo de álcali y reducir el tiempo del tratamiento (Singh et al., 2020a; Wu et al., 2017).

En este estudio se propone el aprovechamiento de las pencas de *Agave angustifolia* y *Agave karwinskii* que son residuos agrícolas que se genera en la producción del mezcal, y utilizarlos como materia prima para extraer celulosa mediante tratamiento alcalino (KOH) asistido por ultrasonido. Por lo que el objetivo de este estudio es evaluar el efecto del tratamiento combinado en las propiedades fisicoquímicas, morfológicas y térmicas de las celulosas, para ello, se realizaron diferentes pruebas de caracterización, entre las que se incluyen espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (XRD), microscopia óptica, microscopia electrónica de barrido (SEM), tamaño de partícula, potencial zeta, peso molecular y análisis térmico.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Materia prima

La recolección de pencas de maguey espadín (*Agave agustifolia* Haw) y de madrechishe (*Agave karwinskii*) se realizó del productor de mezcal “Serpiente de Fuego” ubicado en el sitio de Xitlapehua, municipio de Miahuatlán, estado de Oaxaca (16°21'09.1"N y 96°32'42.2"O, 1574 msnm). La recolección se realizó

después del corte de pencas de la piña del maguey. Las pencas se limpiaron y se cortaron en trozos pequeños, posteriormente se secaron en una estufa (HCF-62, RIOSSA, México) a 70 °C por 24 h. La muestra seca se molió en un molino (BI-DTOOL 1000gram Electric Grain Mills, BI-DTOOL) y se tamizó utilizando una malla 60. La muestra molida se guardó en una bolsa de polipropileno herméticas a temperatura ambiente.

4.2.2. Extracción de celulosa

La celulosa de las pencas se extrajo, primeramente, desengrasándolas con una solución de tolueno-etanol (2:1 v/v) como solvente en un equipo Soxhlet durante 6 h, y se secó a 105 °C durante 12 h. Posteriormente se realizó la deslignificación de la muestra desengrasada (5 g) con clorito de sodio al 3 % a pH 4.0 ± 0.01 a 75 °C por 2 h. Después se filtró y se lavó con agua desionizada para obtener holocelulosa, se secó a 50 °C por 16 h. Posteriormente la holocelulosa se trató con una solución alcalina de KOH al 6 % con una relación solido-liquido 1:25 (g mL⁻¹) y se aplicó ultrasonido con un procesador ultrasónico (modelo VCX 130 PB 500/750 W) acoplado a una sonda de acero inoxidable (Sonics and Materials, Inc, Newtown, CT, USA) durante 30 min y una amplitud de 40 %. Después de la ultrasonificación, la mezcla se agitó de manera continua durante 2 h a 55 °C. Posteriormente se filtró y el residuo se lavó con agua desionizada. La celulosa aislada se secó a 60 °C por 24 h. Las muestras resultantes se denominaron CE para la celulosa extraída de pencas de maguey espadín y CM para maguey madrequishe.

4.2.3. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros de las muestras de celulosa se obtuvieron utilizando un espectrómetro de infrarrojo cercano FTIR Alpha II (Bruker Optics GmbH & Co. KG, Ettlingen, Alemania) acoplado a un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) en el rango de 4000 - 450 cm⁻¹.

4.2.4. Difracción de rayos X (XRD)

La difracción de rayos X de las muestras se realizó con un difractómetro D8 ADVANCE ECO (Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Alemania), con radiación Cu-K α ($\lambda = 1.540 \text{ \AA}$), se utilizó un rango de 10° a 70° para un ángulo de difracción 2θ . Se utilizó la ecuación de Scherrer para calcular el tamaño medio de cristal (11):

$$D = \frac{K \lambda}{\beta \cos \theta} \quad [\text{nm}] \quad (11)$$

Donde K es la constante de Scherrer (0.91), λ es la longitud de onda del rayo X incidente ($\lambda = 1.540 \text{ \AA}$), β representa el ancho completo en la mitad del máximo de la reflexión en la dirección radial (banda de difracción), y θ es el ángulo correspondiente al pico cristalino (ángulo de Bragg).

4.2.5. Medición de tamaño de partícula y potencial Z

Se preparó una suspensión de muestras de celulosa a una concentración de 0.05 % w/w con agua desionizada a pH 7.00 ± 0.01 a temperatura ambiente. El tamaño de partícula y la potencial zeta se determinó utilizando Zetasizer Nano ZS90 (Malvern Instruments, Worcestershire, Reino Unido).

4.2.6. Microscopia óptica

Las observaciones se realizaron en un microscopio óptico (Olympus BX53, Olympus Optical Co., Tokio, Japón) acoplado a una cámara AxioCam ERc 5 s (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Oberkochen, Alemania) con un aumento de 100x. Cada muestra se suspendió en agua destilada antes de las observaciones.

4.2.7. Microscopia electrónica de barrido

La morfología superficial de las muestras se observó mediante un microscopio electrónico de barrido (JSM6360, JEOL, Tokio, Japón). Las muestras en polvo se colocaron de manera uniforme sobre la superficie de soportes de aluminio con cinta conductora recubierta de carbono y se recubrieron con oro. Se capturaron imágenes de las muestras a un voltaje de 13kV.

4.2.7. Peso molecular

Para determinar el peso molecular de las celulosas extraídas, se utilizó el método de viscosimetría. Para determinar la viscosidad intrínseca se utilizó un viscosímetro capilar tipo Oswald a 25°C, utilizando la solución CUEN*H₂O MQ. La temperatura se mantuvo mediante un termostato. Para calcular el peso molecular se utilizó la ecuación de Mark-Houwink-Sakurada, donde los parámetros K y a son constantes específicas de las muestras y disolventes:

$$[\eta] = K M^a \quad (12)$$

Solución CUEN*H₂O MQ: se prepararon 10 mL de hidróxido de bis-(etilendiamina)-cobre(II) y 10 mL de agua Mili-Q. Las muestras de celulosa se disolvieron y se agitaron por 10 min.

4.2.8. Análisis térmico

El estudio térmico de las muestras de celulosa se realizó mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) en un analizador térmico simultáneo (STA6000, Perkin Elmer, Waltham, MA, USA), desde una temperatura de 30°C hasta 600°C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en atmósfera de nitrógeno.

4.3. Resultados y discusión

4.3.1. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

El análisis de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) se realizó para identificar los grupos funcionales de la celulosa extraída de pencas de agave. En los espectros de FTIR, que se muestra en la Figura 12, se observa que CE y CM tienen bandas similares. La amplia banda de absorción alrededor de 3329 cm⁻¹ corresponde a la vibración de los grupos OH (Liu et al., 2023). La banda a 2915 cm⁻¹ está asociada con la vibración de estiramiento asimétrico de CH (Shrestha et al., 2021). Alrededor de 2851 cm⁻¹, la banda está relacionado con la vibración asimétrica y simétrica del grupo CH (Freitas et al., 2022). La presencia de la banda alrededor de 1602 cm⁻¹ corresponde a la vibración

esquelética aromática de la lignina (Morán et al., 2008). La banda a 1315 cm^{-1} está asociado con la vibración oscilante de CH en el grupo alcohol de celulosa (Dube et al., 2023), que muestra la disposición direccional preferencial de las α -celulosas, se considera una banda cristalina (Gallardo-Sanchez et al., 2019). Alrededor de 1411 cm^{-1} se asigna a la deformación CH en la lignina, lo que indica la presencia de lignina residual en las muestras (Mtibe et al., 2022). La banda a 1151 cm^{-1} está relacionado a la vibración de estiramiento COC del anillo de piranosa presente en polisacáridos (Pradhan et al., 2024). La banda de absorción a 1020 cm^{-1} se atribuye al estiramiento dentro del anillo de piranosa COC, lo que sugiere un aumento en el valor cristalino de las muestras de celulosa (Anggoro et al., 2024). La absorción alrededor de 894 cm^{-1} se considera una banda amorfa, corresponde a la vibración de estiramiento COC del enlace β -glicosídico (Liu et al., 2023).

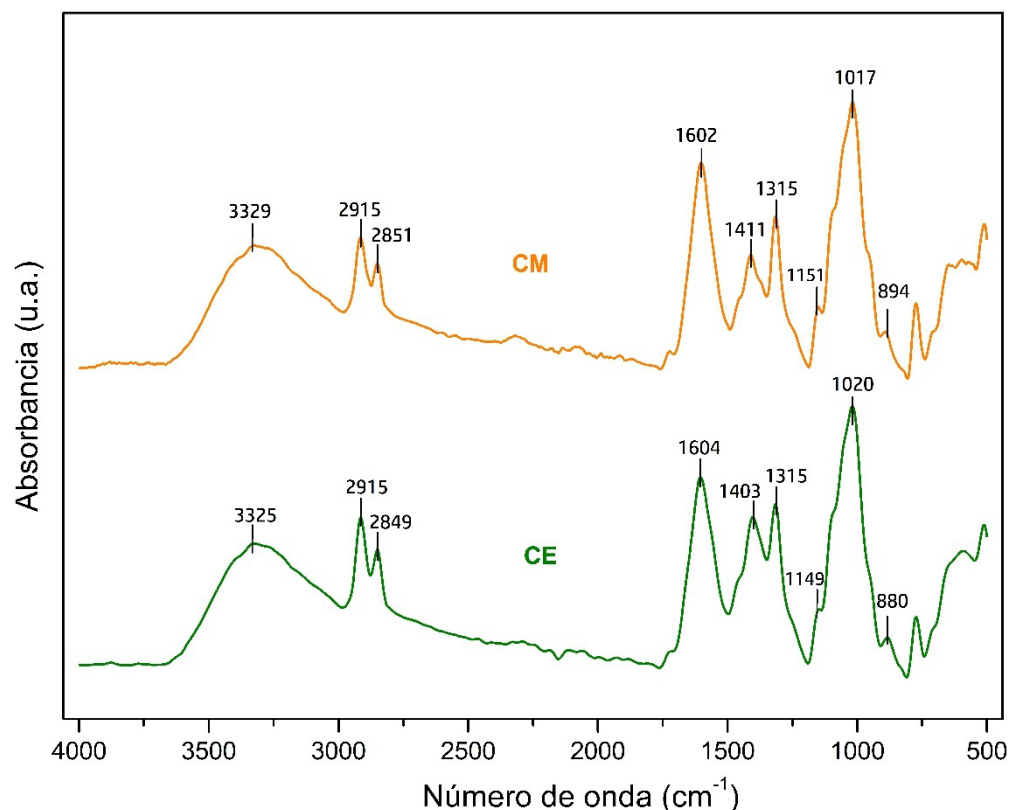


Figura 12. Espectro FTIR de CE y CM extraída del residuo de pencas de maguey.

4.3.2. Difracción de rayos X

El análisis de difracción de rayos X evaluó la cristalinidad de las celulosas obtenida de las pencas de agave sometidas a tratamiento ultrasonido, los patrones de XRD de las muestras se observan en la Figura 13. Las señales ensanchadas se asocian a la presencia de partículas no cristalinas, esto se puede observar en ambas muestras, en las bandas en ángulos de 2θ alrededor de 16.33° y 22.40° que fueron más anchas, esto se relaciona con celulosa amorfa (Gallardo-Sanchez et al., 2019). En ambas muestras se observaron bandas de difracción a $2\theta = 4.89^\circ$, 15.27° , 16.33° , 22.40° y 35.85° se observan típicamente en la estructura celulosa tipo I (Chen et al., 2023; Freitas et al., 2022). Los resultados indicaron que el tratamiento químico y el ultrasonido no cambiaron el tipo de cristal de la celulosa (Zhao et al., 2021). El tamaño promedio de cristales se calculó utilizando la ecuación de Scherrer, ambas muestras reportaron un tamaño de cristal similar, para CE fue de 15.38 nm y CM de 15.49 nm, esto puede deberse a que el tratamiento de ultrasonido puede alterar las dimensiones de los cristales (Singh et al., 2020b).

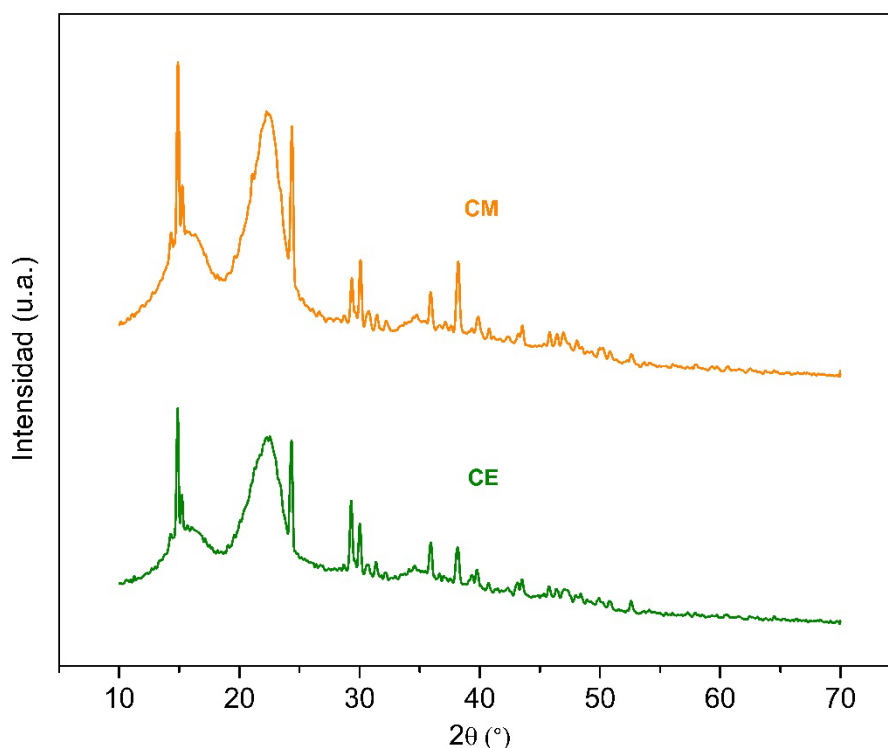


Figura 13. Patrones de difracción de rayos X de CE y CM.

4.3.3. Medición de tamaño de partícula y potencial Z

El potencial zeta representa la carga efectiva de las partículas cargadas dispersas en un medio en fase líquida, un valor absoluto más alto del potencial significa una repulsión mutua más fuerte entre partículas y una mejor estabilidad del sistema disperso (Wang et al., 2023). Un valor entre 15 a -15 mV indica el inicio del proceso de aglomeración y floculación de la celulosa. Por otra parte, valores superiores o inferiores a ± 30 mV se asocian comúnmente con una repulsión electrostática suficiente para mantener la estabilidad de la suspensión coloidal (Hamid et al., 2016). Las muestras presentaron cargas superficiales negativas, el potencial zeta de CE fue de -19.3 ± 0.80 mV y de CM de -19.6 ± 1.30 mV, ambas muestras presentaron valores similares, lo que sugiere que tienen una estabilidad moderada, pero con cierta tendencia a aglomerarse en suspensión.

Por otra parte, el tamaño promedio de partícula de las celulosas fue de 1140.3 ± 43.62 nm para CE y para CM fue de 4519.6 ± 33.17 nm, lo que indica que CM tiene un tamaño de partícula mayor en comparación que CE, es importante resaltar que las celulosas fueron extraídas de pencas de plantas de agave de diferentes variedades. El método mecánico, de ultrasonido, interrumpe físicamente la estructura de la celulosa, cuando se combina con el tratamiento químico de NaOH, efectivamente descompone las fibras de la celulosa en partículas pequeñas (SriBala et al., 2016). Sin embargo, el tamaño de partícula de las muestras es alto al reportado por Ghodake et al. (2022), con valores de 83-274 nm. En cambio, Soon et al. (2023) reportaron valores en un rango de 1383.67 a 4000 nm, similares a lo reportados en este estudio. La variación puede deberse a la naturaleza de la fuente para la extracción de la celulosa o también puede atribuirse a los métodos de extracción empleados, así como a las condiciones aplicadas durante el proceso.

4.3.4. Microscopia óptica

En la Figura 3 se presentan las imágenes de microscopia óptica con aumento de 100x, donde se aprecia fibras de celulosa de forma cilíndrica y algunas casi

esféricas con diferentes tamaños (Figura 14 a,c,), esto puede deberse al tratamiento con ultrasonido que provocó una fragmentación rápida del material fibroso provocando con superficies más lisas en las fibras. No se observó desfibrilación, esto podría deberse al efecto del tratamiento alcalino que eliminó fracciones desfibriladas o a la debilitación de las uniones fibrilar por el tratamiento alcalino haciéndolas más susceptibles a la fragmentación inducida por el ultrasonido (Freitas et al., 2022; Machado et al., 2019). También se puede observar que las fibras de ambas muestras tienen tendencia a agregarse esto permite corroborar los datos obtenidos de potencial zeta (sección 4.3.3) (Figura 14 b,d).

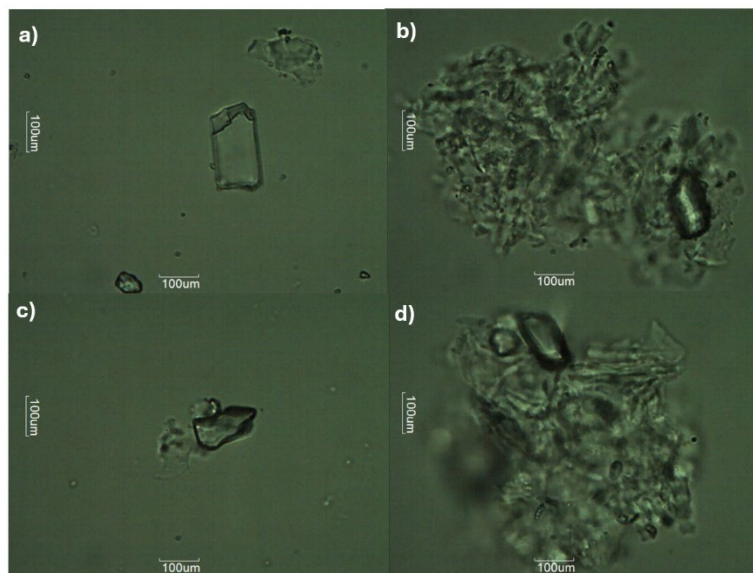


Figura 14. Imágenes de microscopía óptica de CE (a,b) y CM (c,d) obtenidas de penca.

4.3.5. Microscopía electrónica de barrido

Se realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido para observar los cambios morfológicos de la superficie de las celulosas CE y CM, importantes para comprender mejor la estructura y las características superficiales. En la Figura 15 se observó la morfología de las muestras, se exhibe una estructura superficial ligeramente corrugada de las fibrillas, donde se presentan fibrillas de diferentes tamaños y formas irregulares. El ultrasonido induce desorden en la disposición de las fibrillas, lo que resulta en diversas morfologías (Ahmima et al., 2024); en

las muestras se exhibe en forma de varillas y esféricas. La superficie de las muestras de celulosa tratada con ultrasonido es bastante rugosa, debido a la pseudolignina atrapada en la superficie, se forma cuando la lignina degradada sufre condensación o repolimerización de la subestructura fenólica en la lignina durante los procesos de alcalinización (Wardani et al., 2024), las fibrillas parecen rota con la formación de poros, como resultado de la desintegración y ruptura simultáneas de superficies causadas por NaOH y ultrasonido, especialmente el efecto de la implosión de microburbujas durante la sonicación (He et al., 2022).

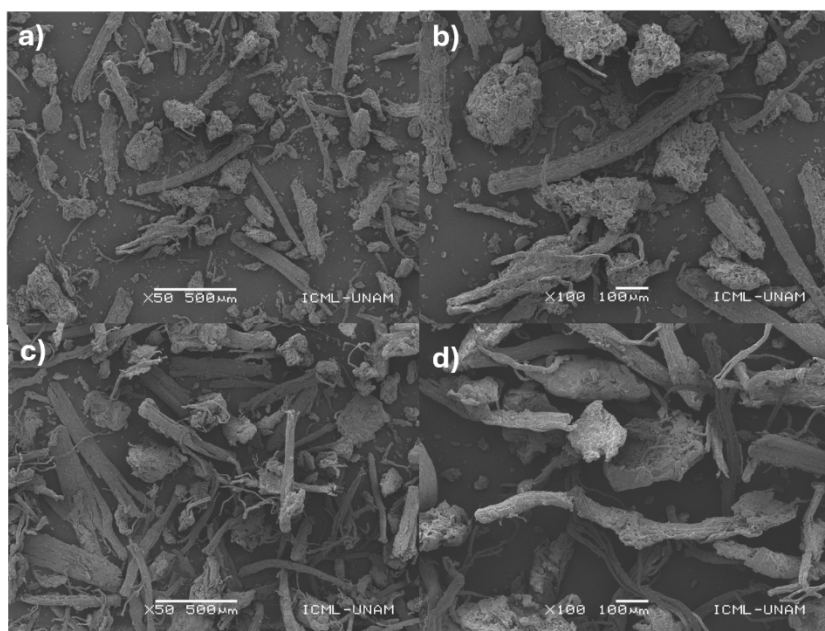


Figura 15. Micrograffías SEM de CE (a,b) y CM (c,d).

4.3.6. Peso molecular

Mediante viscosimetría capilar se determinó el peso molecular (M_w), de las pencas de maguey que fueron tratadas mediante tratamiento alcalino con ultrasonido, donde la muestra de CE presentó un valor de 74.50 kDa y CM de 38.12 kDa. El tratamiento alcalino desfibrila las microfibrillas externas de celulosa, donde exponen cristales de corta longitud, conduciendo a despolimerización de la estructura de la celulosa, este efecto se intensifica con pasos oxidativos prolongados, se ha reportado que, en la extracción de celulosa de fibras de hoja de piña, que al aumentar el tiempo de reacción del tratamiento químico disminuye el M_w (38.6-10.5 kDa) (Fareez et al., 2018). Por su parte, el

ultrasonido induce una despolimerización de la celulosa y una reducción posterior del peso molecular posiblemente debido al efecto de cavitación de la onda ultrasónica (Yan et al., 2019). Por su parte, Wardhono et al. (2025) observaron que al aplicar el tratamiento de ultrasonido con microondas hubo una disminución del Mw de la celulosa extraída del residuo de la producción de palma aceitera (200-142 KDa). El tratamiento con ultrasonido por sí solo puede disminuir el Mw pero depende de la combinación con otros tratamientos. Por otra parte, la heterogeneidad de la composición química y el peso molecular de la celulosa varía según la biomasa vegetal y el método de extracción (El Idrissi et al., 2013); debido a ello se presenta la diferencia de M_w en las muestras.

4.3.7. Análisis térmico

En la Figura 16 se presentan las propiedades térmicas de las muestras de CE y CM mediante análisis termogravimétrico (TGA) y la primera derivada (DTG). El termograma (Figura 16a) indica cuatro etapas de pérdida de peso, la primera etapa, va de 30°C a 200°C, que corresponde a la evaporación del agua unida débilmente a las superficies de la celulosa, la presencia de agua se atribuye al comportamiento hidrófilo de estos materiales celulósicos naturales (Bahloul et al., 2021), la eliminación de humedad es un proceso endotérmico, lo que significa que no hay descomposición química significativa en este rango (Ardila A. et al., 2024); se presentó una pequeña pérdida de peso alrededor del 9%, en ambas muestras, se observaron dos temperaturas de descomposición máxima (DTG) en esta etapa, para CM fue a 65°C y 146°C. y para CE a 64°C y 153 °C.

En la segunda etapa se presentó la mayor pérdida de peso, para CE fue de 36.1%, y CM de 41.6% en el rango de temperatura alrededor de 200°C a 335°C, se atribuye a la despolimerización de la hemicelulosa y la disociación de los enlaces glucosídicos de los anillos de celulosa (Wardani et al., 2024). Se observaron dos temperaturas máximas de degradación (DTG), para CM fue 247°C y 323°C y de CE fue de 247°C y 257°C que indica la degradación térmica de la celulosa (Chen et al., 2023). La estabilidad térmica está asociada con la cristalinidad de la celulosa (Wardani et al., 2024), la muestra de CM resultó con una mayor estabilidad térmica soportando una elevada temperatura en

comparación de CE. Esto es consistente con lo reportado para celulosas derivadas de fibras duras, obtenidas del tallo del fruto de palma datilera (235-252°C) (Alotabi et al., 2020a) y tallo de la planta de berenjena (227°C) (Bahloul et al., 2021), donde a mayor temperatura de degradación, mayor cristalinidad de las fibras.

La tercera etapa, en CM y CE fue aproximadamente a 460°C y 471°C, ambos con una pérdida de peso de alrededor del 27%, en esta etapa la celulosa se carboniza y oxida simultáneamente (Chen et al., 2023), la temperatura máxima de degradación fue alrededor de 464°C. La última etapa, se llevó a cabo alrededor de 594°C, representa la degradación del residuo carbónico, descomposición completa de los materiales (Mohan et al., 2024).

La técnica de DSC es un análisis térmico que mide el consumo de energía y la descomposición en muestras (Ahmima et al., 2024). En la Figura 16c se observan las curvas de DSC de las muestras, se observaron bandas endotérmicas en CM y CE a temperaturas de 162°C y 170°C, lo que indica que la degradación de la celulosa ha comenzado a prevalecer (Alotabi et al., 2020b). En la muestra CM se observaron dos endotermas a 243°C y 357°C y en la muestra CE se identificó un segundo endoterma a 233°C, que corresponden a la despolimerización de la celulosa y la escisión de los enlaces glucosídicos (Ahmima et al., 2024; Kian et al., 2020). Los picos endotérmicos observados en la muestra de celulosa en comparación con las de residuos del procesamiento de palma aceitera (Wardhono et al., 2025) y salvado de trigo (Yazdanbakhsh & Rashidi, 2020) indicaron un comportamiento de descomposición similares, lo que sugiere una estabilidad térmica semejante y una estructura cristalina estable.

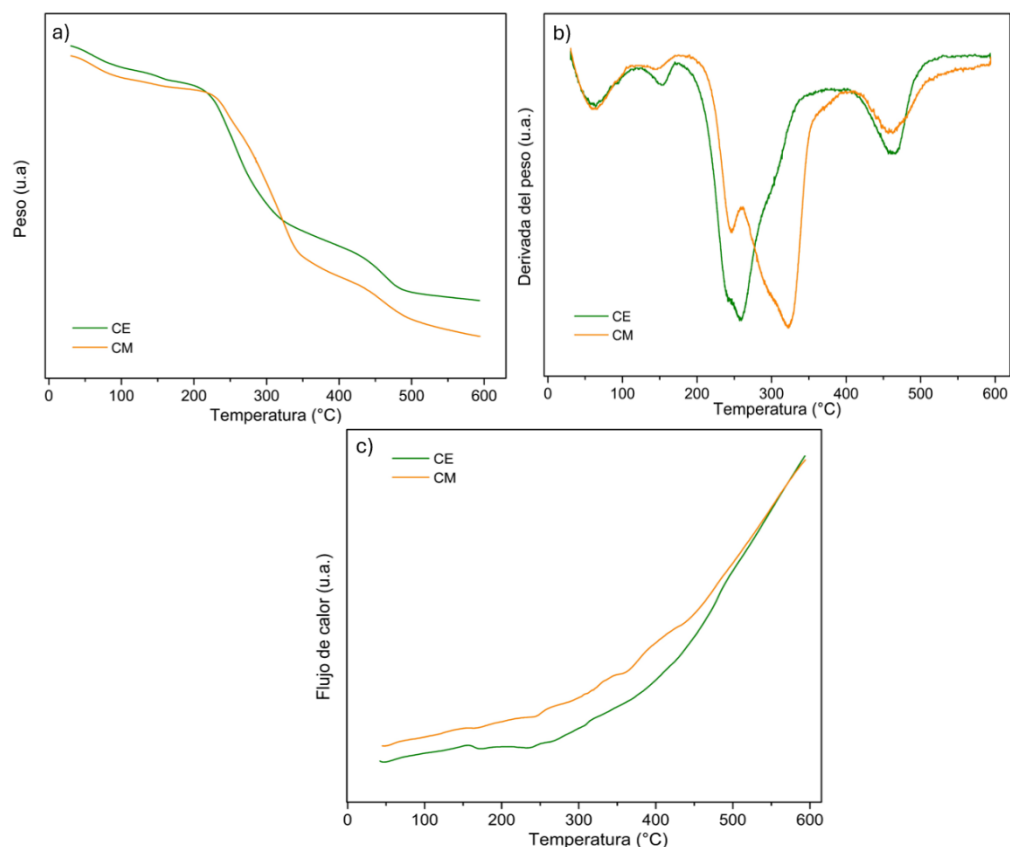


Figura 16. a) curva TGA, b) curva DTG, c) curva DSC de las muestras CE y CM.

4.4. Conclusión

Las pencas es uno de los residuos más abundantes en la producción de mezcal, los resultados en este estudio mostraron que es una alternativa para el aprovechamiento de material celulósico con características relevantes en sus propiedades fisicoquímicas. El tratamiento asistido por ultrasonido fue un método con alto potencial para extraer celulosa de las pencas de maguey, a la vez que reduce el uso de productos químicos y consumo de energía. El tratamiento se presentó como una alternativa prometedora para un procesamiento más sostenible en la extracción de celulosa a partir del residuo agrícola, generando una separación de las fibras con presencia de poros en la superficie. Las muestras de CE y CM presentaron buenas propiedades térmicas, pueden tener potencial para el desarrollo de materiales de soporte o refuerzo.

4.5. Literatura citada

- Ahmima, S., Naar, N., Jędrzejczak, P., Kłapiszewska, I., Kłapiszewski, Ł., & Jesionowski, T. (2024). Isolation and Characterization of Novel Cellulose Micro/Nanofibers from *Lygeum spartum* Through a Chemo-Mechanical Process. *Polymers*, 16(21), 3001. <https://doi.org/10.3390/polym16213001>
- Alotabi, M. D., Alshammari, B. A., Saba, N., Alothman, O. Y., Kian, L. K., Khan, A., & Jawaidd, M. (2020a). Microcrystalline Cellulose from Fruit Bunch Stalk of Date Palm: Isolation and Characterization. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(6), 1766–1775. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01725-8>
- Alotabi, M. D., Alshammari, B. A., Saba, N., Alothman, O. Y., Kian, L. K., Khan, A., & Jawaidd, M. (2020b). Microcrystalline Cellulose from Fruit Bunch Stalk of Date Palm: Isolation and Characterization. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(6), 1766–1775. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01725-8>
- Álvarez-Chávez, J., Villamiel, M., Santos-Zea, L., & Ramírez-Jiménez, A. K. (2021). Agave By-Products: An Overview of Their Nutraceutical Value, Current Applications, and Processing Methods. *Polysaccharides*, 2(3), 720–743. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2030044>
- Anggoro, D. D., Prasetyaningrum, A., Udaibah, W., Imtinan, A. B., Nabilah, F., & Monde, B. U. L. (2024). Effect of ultrasound-advanced oxidation processes for pretreatment of oil palm mesocarp fiber for cellulose extraction. *International Journal of Renewable Energy Development*, 13(3), 532–538. <https://doi.org/10.61435/ijred.2024.60027>
- Ardila A., A. N., Arriola-Villaseñor, E., González, E. E. V., Guerrero, H. E. G., Hernández-Maldonado, J. A., Gutiérrez-Pineda, E., & Villa, C. C. (2024). Enhanced Cellulose Extraction from Banana Pseudostem Waste: A Comparative Analysis Using Chemical Methods Assisted by Conventional and Focused Ultrasound. *Polymers*, 16(19), 2785. <https://doi.org/10.3390/polym16192785>
- Bahloul, A., Kassab, Z., El Bouchti, M., Hannache, H., Qaiss, A. E. K., Oumam, M., & El Achaby, M. (2021). Micro- and nano-structures of cellulose from eggplant plant (*Solanum melongena* L) agricultural residue. *Carbohydrate Polymers*, 253, 117311. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117311>
- Cabrera-Toledo, D., Mendoza-Galindo, E., Larranaga, N., Herrera-Estrella, A., Vásquez-Cruz, M., & Hernández-Hernández, T. (2022). Genomic and Morphological Differentiation of Spirit Producing Agave angustifolia

- Traditional Landraces Cultivated in Jalisco, Mexico. *Plants*, 11(17), 2274. <https://doi.org/10.3390/plants11172274>
- Chen, C., Huang, D., Yang, Q., Wang, G., & Wang, X. (2023). Structure and thermal properties of cellulose nanofibrils extracted from alkali–ultrasound treated windmill palm fibers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126645. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126645>
- COMERCAM. (2025). *Informe estadística 2025*. <https://comercam-dom.org.mx/estadisticas/>
- Domingues, A. A., Pereira, F. V., Sierakowski, M. R., Rojas, O. J., & Petri, D. F. S. (2016). Interfacial properties of cellulose nanoparticles obtained from acid and enzymatic hydrolysis of cellulose. *Cellulose*, 23(4), 2421–2437. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0965-3>
- Dube, A. M., Daba, B. J., & Muleta, M. D. (2023). Optimized isolation and characterization of cellulose for extraction of cellulose nanocrystals from *Ensete ventricosum* pseudo-stem fibre using a two-stage extraction method. *Journal of Experimental Nanoscience*, 18(1), 2199989. <https://doi.org/10.1080/17458080.2023.2199989>
- El Idrissi, A., El Barkany, S., Amhamdi, H., & Maarouf, A. K. (2013). Physicochemical Characterization of Celluloses Extracted from Esparto “*Stipa tenacissima*” of Eastern Morocco. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(1), 537–548. <https://doi.org/10.1002/app.37500>
- Fareez, I. M., Ibrahim, N. A., Wan Yaacob, W. M. H., Mamat Razali, N. A., Jasni, A. H., & Abdul Aziz, F. (2018). Characteristics of cellulose extracted from Josapine pineapple leaf fibre after alkali treatment followed by extensive bleaching. *Cellulose*, 25(8), 4407–4421. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1878-0>
- Freitas, P. A. V., González-Martínez, C., & Chiralt, A. (2022). Applying ultrasound-assisted processing to obtain cellulose fibres from rice straw to be used as reinforcing agents. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76, 102932. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102932>
- Gallardo-Sanchez, M. A., Anzaldo Hernández, J., Ramirez Casillas, R., Escalante Vazquez, J. I., Escobar Hernández, D., Soltero Martínez, J. F. A., García Enríquez, S., & Macías Balleza, E. R. (2019). Obtaining soluble-grade cellulose pulp from Agave tequilana Weber var. Azul bagasse. *BioResources*, 14(4), 9867–9881.

- Ghodake, V. B., Khare, R. A., & Mhaske, S. T. (2022). An Insight into Formation and Characterization of Nano-Cellulose Prepared From Industrial Cellulosic Wastes. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(1), 319–332. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-02026-w>
- Hamid, S. B. A., Zain, S. K., Das, R., & Centi, G. (2016). Synergic effect of tungstophosphoric acid and sonication for rapid synthesis of crystalline nanocellulose. *Carbohydrate Polymers*, 138, 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.023>
- He, C., Li, H., Hong, J., Xiong, H., Ni, H., & Zheng, M. (2022). Characterization and Functionality of Cellulose from Pomelo Fruitlets by Different Extraction Methods. *Polymers*, 14(3), 518. <https://doi.org/10.3390/polym14030518>
- Hidayatullah, K., Rahayu, S., Wirawan, R., Masrurroh, Sudirman, & Ali, M. (2024). CHARACTERIZATION OF BIOPOLYMER NANOCELLULOSE FIBER FROM CORN COB WASTE (ZEA MAYS L) USING CHEMICAL-MECHANICAL TREATMENTS. *RASAYAN Journal of Chemistry*, 17(03), 897–904. <https://doi.org/10.31788/RJC.2024.1738814>
- Kian, L. K., Saba, N., Jawaaid, M., & Fouad, H. (2020). Characterization of microcrystalline cellulose extracted from olive fiber. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156, 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.015>
- Liu, X., Sun, H., Mu, T., Fauconnier, M. L., & Li, M. (2023). Preparation of cellulose nanofibers from potato residues by ultrasonication combined with high-pressure homogenization. *Food Chemistry*, 413, 135675. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135675>
- Machado, I., Faccio, R., & Pistón, M. (2019). Characterization of the effects involved in ultrasound-assisted extraction of trace elements from artichoke leaves and soybean seeds. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104752. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104752>
- Mohan, P., Mohd Yusof, N. S., Thomas, S., & Abd Rahman, N. M. M. (2024). Ultrasound-alkali-assisted isolation of cellulose from coconut shells. *BioResources*, 19(4), 7870–7885.
- Morán, J. I., Alvarez, V. A., Cyras, V. P., & Vázquez, A. (2008). Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. *Cellulose*, 15(1), 149–159. <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9145-9>
- Motaung, T. E. (2021). RECENT APPLICATIONS AND INNOVATIONS OF CELLULOSE BASED MATERIALS: A CRITICAL REVIEW. *Cellulose*

Chemistry and Technology, 55(1–2), 1–12.
<https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2021.55.01>

- Mtibe, A., John, M. J., Andrew, J. E., & Mokhena, T. C. (2022). Sequential extraction of carbohydrates and lignin from agricultural waste and their structural characterization. *Biomaterials and Polymers Horizon*, 1(2). <https://doi.org/10.37819/bph.001.02.0216>
- Pérez Zavala, M. L., Hernández-Arzaba, J. C., Bideshi, D. K., & Barboza Corona, J. E. (2020). Agave: A natural renewable resource with multiple applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15), 5324–5333. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10586>
- Pradhan, D., Jaiswal, S., Tiwari, B. K., & Jaiswal, A. K. (2024). Nanocellulose separation from barley straw via ultrasound-assisted choline chloride – Formic acid deep eutectic solvent pretreatment and high-intensity ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, 110, 107048. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107048>
- Riseh, R. S., Vazvani, M. G., Hassanisaadi, M., & Thakur, V. K. (2024). Agricultural wastes: A practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries. *Industrial Crops and Products*, 208, 117904. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117904>
- Shrestha, P., Sadiq, M. B., & Anal, A. K. (2021). Development of antibacterial biocomposites reinforced with cellulose nanocrystals derived from banana pseudostem. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100112>
- Singh, S. S., Lim, L.-T., & Manickavasagan, A. (2020a). Ultrasound-assisted alkali-urea pre-treatment of *Miscanthus × giganteus* for enhanced extraction of cellulose fiber. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116758. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116758>
- Singh, S. S., Lim, L.-T., & Manickavasagan, A. (2020b). Ultrasound-assisted alkali-urea pre-treatment of *Miscanthus × giganteus* for enhanced extraction of cellulose fiber. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116758. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116758>
- Soon, C. Y., Lim, C. S. S., Hariyanto, Y., Talib, R. A., Abdan, K., Wong, C. W., & Chan, E. W. C. (2023). Optimization of nanocrystalline cellulose particle size using one-factor-at-a-time method under different acid hydrolysis parameters. *Science, Engineering and Health Studies*, 17, 23030001–23030001. <https://doi.org/10.69598/sehs.17.23030001>

- SriBala, G., Chennuru, R., Mahapatra, S., & Vinu, R. (2016). Effect of alkaline ultrasonic pretreatment on crystalline morphology and enzymatic hydrolysis of cellulose. *Cellulose*, 23(3), 1725–1740. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0893-2>
- Vázquez-Pérez, N., Blancas, J., Torres-García, I., García-Mendoza, A., Casas, A., Moreno-Calles, A. I., Maldonado-Almanza, B., & Rendón-Aguilar, B. (2020). Conocimiento y manejo tradicional de Agave karwinskii en el sur de México. *Botanical Sciences*, 98(2), 328–347. <https://doi.org/10.17129/botsci.2421>
- Wang, H., Wu, J., Lian, Y., Li, Y., Huang, B., & Lu, Q. (2023). Zirconium Phosphate Assisted Phosphoric Acid Co-Catalyzed Hydrolysis of Lignocellulose for Enhanced Extraction of Nanocellulose. *Polymers*, 15(2), 447. <https://doi.org/10.3390/polym15020447>
- Wardani, R. K., Holilah, H., Bahruji, H., Abdul Hamid, Z. A., Suprpto, S., Jalil, A. A., Nugraha, R. E., & Prasetyoko, D. (2024). The comparison of hydrothermal, ultrasonication and microwave assisted alkalization of cellulose from *Borassus flabellifer* fruit husk. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39, 101583. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101583>
- Wardhono, E., Kustiningsih, I., Yustanti, E., Kurniawan, B., Sukanto, D., Meliana, Y., & Guénin, E. (2025). Enhanced cellulose extraction from delignified oil palm empty fruit bunches using sequential ultrasound-microwave processing. *South African Journal of Chemical Engineering*, 54, 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.07.015>
- Wu, H., Dai, X., Zhou, S.-L., Gan, Y.-Y., Xiong, Z.-Y., Qin, Y.-H., Ma, J., Yang, L., Wu, Z.-K., Wang, T.-L., Wang, W.-G., & Wang, C.-W. (2017). Ultrasound-assisted alkaline pretreatment for enhancing the enzymatic hydrolysis of rice straw by using the heat energy dissipated from ultrasonication. *Bioresource Technology*, 241, 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.090>
- Yan, L., Liu, B., Liu, C., Qu, H., Zhang, Z., Luo, J., & Zheng, L. (2019). Preparation of cellulose with controlled molecular weight via ultrasonic treatment improves cholesterol-binding capacity -. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14340>
- Yazdanbakhsh, M. F., & Rashidi, A. (2020). The effect of ultrasonic waves on alpha-cellulose extraction from wheat bran to prepare alpha-cellulose nanofibers. *The Journal of The Textile Institute*, 111(10), 1518–1529. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1709261>

Zhao, X., Cheng, F., & Hu, Y. (2021). Extraction of Cellulose Nanofibrils with Ultraviolet Blocking from Agro-industrial Wastes: A Comparative Study. *Fibers and Polymers*, 22(1), 59–68. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0196-6>

5. CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo con los resultados de la investigación, los residuos sólidos generados en la producción de mezcal, como el bagazo y las pencas de maguey, son una fuente confiable de biomasa lignocelulósica para la obtención de celulosa y hemicelulosa. La implementación del tratamiento alcalino asistido por ultrasonido mostró ser un método eficaz que permitió facilitar la ruptura de la pared celular y la separación de componentes.

Por otra parte, las celulosas extraídas mostraron tener una mayor estabilidad térmica en comparación con la hemicelulosa, lo que las posiciona como un material adecuado para utilizarse como agente de refuerzo en matrices poliméricas debido a que soportarían condiciones de procesamiento a temperaturas elevadas.

En general, los resultados indican la viabilidad del método para extraer material lignocelulósico, que permiten la valorización de esos residuos que actualmente representan un desafío ambiental. La caracterización de los biopolímeros indicó que son prometedores para el desarrollo de materiales de refuerzos en matrices poliméricas, hidrogeles y recubrimientos.