

OBTENCIÓN DE MATERIALES BASE CELULOSA A PARTIR DE LA BIOMASA *PHRAGMITES AUSTRALIS* PARA LA FABRICACIÓN DE EMBALAJES SOSTENIBLES

PRODUCTION OF CELLULOSE BASED MATERIALS FROM *PHRAGMITES AUSTRALIS* BIOMASS FOR THE MANUFACTURE OF SUSTAINABLE PACKAGING

PACHECO CALERA, Ricardo Fredy ¹

MARTÍNEZ FLORES, Rocío ¹

PAREJA RODRÍGUEZ, Raúl ²

SALAZAR PÉREZ, Javier ³

ALONSO LEMUS, Ivonne Liliana ³

RESUMEN

A nivel global, se produce una gran cantidad de residuos plásticos que persisten en el ambiente y se fragmentan en microplásticos, además de causar efectos tóxicos en la salud humana. Los métodos actuales de gestión de estos residuos, como el vertido en suelos y la quema, liberan contaminantes peligrosos. Por otra parte, la biomasa de *Phragmites australis* (*P. australis*), mejor conocida como carrizo, a nivel internacional, es considerada una especie invasora sin valor comercial ni nutricional. En el presente proyecto se obtienen materiales celulósicos a partir de la biomasa de *P. australis* para la fabricación de embalajes sostenibles. Como punto de partida, se obtuvieron los materiales a base de celulosa de la biomasa mediante un proceso térmico y utilizando como agente activador hidróxido de sodio (NaOH). Los materiales de partida, así como los embalajes obtenidos, se caracterizaron mediante las técnicas de difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja, análisis termogravimétrico y microscopía electrónica de barrido para establecer sus propiedades fisicoquímicas. Además, los embalajes resultantes fueron evaluados en pruebas de estabilidad térmica e inflamabilidad, obteniendo resultados superiores en comparación con los embalajes plásticos convencionales. El presente proyecto ofrece una solución viable para la gestión de *P. australis* y contribuye a la reducción de residuos plásticos. Además, fomenta la economía circular en Coahuila, promoviendo prácticas ambientalmente responsables y económicamente escalables.

Palabras clave: biomasa; *Phragmites australis*; estabilidad térmica; embalajes sustentables.

1. Tecnológico Superior de Monclova. Monclova, Coahuila, México

2. Laboratorio de Ciencia de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

3. SECIHTI, Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía, CINVESTAV. Saltillo, Coahuila, México.

Correspondencia

rocio.mf@monclova.tecnm.mx
https://orcid.org/0000-0002-7696-0433

Fecha de recepción

13 de agosto de 2025.

Fecha de aceptación

5 de enero de 2026.

ABSTRACT

Globally, large amounts of plastic waste are produced, which persist in the environment and fragment into microplastics that cause toxic effects on human health. Current waste management methods, such as dumping and burning, release hazardous pollutants. On the other hand, *Phragmites australis* (*P. australis*) biomass, commonly known as reed, is internationally recognized as an invasive species with no commercial or nutritional value. This project obtains cellulose-based materials from *P. australis* biomass to produce sustainable packaging. Cellulose-based materials were obtained from the biomass by a thermal process using sodium hydroxide (NaOH) as the activating agent. The raw materials and the resulting packaging were characterized using X-ray diffraction, infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis, and scanning electron microscopy to determine their physicochemical properties. Furthermore, the resulting packaging was evaluated in thermal stability and flammability tests, obtaining superior results compared to conventional plastic packaging. This project offers a viable solution for managing *P. australis*, thereby reducing plastic waste. Furthermore, it fosters the circular economy in Coahuila, promoting environmentally responsible and economically scalable practices.

Keywords: biomass; *Phragmites australis*; thermal stability; sustainable packaging.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, debido al auge de las ventas en plataformas digitales, la entrega de productos mediante paquetería ha experimentado un incremento significativo, y el plástico es uno de los materiales más utilizados en el sector de embalaje. Se reporta que entre el veinte y el treinta por ciento de los residuos encontrados en los vertederos municipales son de plástico (Mai y col., 2022). Los cuales pueden permanecer en el ambiente durante grandes intervalos de tiempo o degradarse con el medio ambiente, provocando su fragmentación en partículas más pequeñas (microplásticos) que, al ser ingeridas por los seres humanos, causan severos efectos toxicológicos (Luo y col., 2025). Ante este panorama, surge la necesidad de desarrollar materiales

amigables con el medio ambiente y que cubran las necesidades de la industria del embalaje. Investigaciones recientes han reportado la extracción de celulosa, materia prima para el desarrollo de materiales de embalaje, a partir de distintas biomásas. Por ejemplo, en el trabajo presentado por Aldosari y colaboradores se logró obtener celulosa mediante procesos químicos a partir de vainas de *Astragalus armatus*, mediante procesos alcalinos y de blanqueo. En estudios de descomposición térmica se encontró que la celulosa obtenida mediante agentes químicos presenta una mayor estabilidad térmica que la biomasa sin procesamiento químico (Aldosari y col., 2023). Otro grupo de investigadores logró extraer microfibras naturales a base de celulosa mediante un proceso económico y medioambientalmente sostenible denominado purificación, a partir de los residuos de fibras de mesocarpio de palma aceitera y de hojas de piña (Anukwah y Gadzekpo, 2024). Recientemente, un estudio comparó los resultados con los de diversas fibras lignocelulósicas para determinar su contenido como refuerzos de compuestos poliméricos. El análisis químico confirma la presencia de $37.43 \pm 1.40\%$ de celulosa, $31.06 \pm 1.03\%$ de hemicelulosa y $28.42 \pm 0.81\%$ de lignina en las fibras de caña de *Calamus tenuis*. Además, el análisis termogravimétrico asegura que las fibras de caña son termoestables hasta $210 \pm 5^\circ\text{C}$ (Arup y Dip, 2023).

En la Tabla 1 se presentan diferentes metodologías reportadas para la extracción de celulosa a partir de diversas biomásas. Se puede observar que se utilizan agentes modificadores reactivos básicos o sustancias peligrosas para el medio ambiente. En la metodología propuesta en el presente estudio para la fabricación de embalajes ecológicos, un producto final, no se utilizan componentes tóxicos y el tiempo de tratamiento térmico es de solo dos horas. Se propone una alternativa sostenible para la fabricación de embalajes ecológicos y de valor agregado mediante la celulosa extraída de la biomasa de *P. australis*. El proceso se basa en un tratamiento térmico a baja temperatura, complementado con NaOH como agente activador. El uso de esta sustancia en grado comercial representa una ventaja significativa, ya que es un reactivo de bajo costo, ampliamente disponible y eficaz para promover la disrupción estructural y la activación química de la celulosa. A su vez, *P. australis*, gracias a su crecimiento acelerado y a su alta producción de biomasa, se ha consolidado como una fuente prometedora de celulosa, con proporciones de aproximadamente treinta a cuarenta por ciento en masa (Herrera-Zamora y col., 2023; Pareja-Rodríguez y col., 2025), capaz de impulsar alternativas más sostenibles tanto en la industria del papel como en diversos bioprocesos.



Tabla 1. Análisis del estado de los trabajos académicos reportados sobre la extracción de celulosa a partir de diferentes biomasas.

Biomasa	Procesamiento	Aplicaciones	Ref/Año
<i>Arenga Pinnata</i> (Palma de azúcar)	-Alcalinización -Blanqueo	NR	Yuanita y col., 2024.
Tallo de plátano	-Asistente de microondas -Agitación magnética	Productos industriales	Thi Thuy Van y col., 2022.
<i>Astragalus armatus</i> (Planta leguminosa)	-Blanqueo -Mezcla de ácido acético glacial y peróxido de hidrógeno	Biosorción de azul de metileno	Aldosari y col., 2023.
Palma aceitera y hojas de piña	-Lavado con agua del grifo y hervido -Secadas en el horno -Filtrado del NaOH -Lavado con agua desionizada -Blanqueado por inmersión -Agitación periódica	Soportes porosos	Anukwah y Gadzekpo, 2024.
<i>Calamus tenuis</i>	-Sumergido en agua - Lavado en agua destilada	NR	(Arup Kar y Dip, 2023)
<i>P. australis</i>	- Lavado con agua del grifo y hervido a reflujo -Alcalinización con NaOH -Blanqueo con H ₂ O ₂ - Lavado con agua destilada	Remoción de azul de metileno	Başaran y Metin, 2020.
<i>P. australis</i>	-Proceso de calentamiento -Activación química -Trituración -Vertido en moldes -Secado -Desmoldeo	Fabricación de embalajes sustentables	Este trabajo

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 OBTENCIÓN DE MATERIALES A BASE DE CELULOSA Y FABRICACIÓN DE EMBALAJES SUSTENTABLES

La etapa experimental comenzó con la recolección de la materia prima, *P. australis*, en la zona del Río Monclova, Coahuila (26°55'46.9"N



101°24'40.8"W). La biomasa recolectada se cortó en segmentos de aproximadamente 2 cm de longitud. A continuación, se pesaron 500 g de biomasa y se colocaron en un recipiente metálico junto con 1 L de agua potable. Después, la mezcla se sometió a un proceso térmico a 90 °C durante 30 min y, posteriormente, se realizó la activación química mediante la adición de 500 mL de una disolución de NaOH a 1 M (grado comercial). La mezcla se mantuvo a 90 °C durante una hora para favorecer la descomposición parcial de los componentes no celulósicos. Enseguida del tratamiento alcalino, el material se trituyó durante dos minutos con un procesador de alimentos (Nutribullet®) para obtener una mezcla homogénea. Esta mezcla se vertió en moldes que fueron secados al sol durante aproximadamente tres horas. Se procedió con la etapa de desmoldeo del material.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante las técnicas de difracción de rayos X (DRX) en el equipo Bruker modelo D8 Advance (Cu K α , λ = 0.154184 nm), espectroscopia infrarroja (FTIR) Frontier FT-IR/NIR con una velocidad de barrido 0.2 en un intervalo de 4000-450 cm⁻¹ y con número de onda de IR-Laser 15798.00. Análisis termogravimétrico (TGA-DSC) Thermal modelo SDT Q 600 en un rango de temperatura de 25-700 °C, atmósfera de aire a 100 mL/min y una rampa de calentamiento de 10 °C/min. Microscopio electrónico de barrido (MEB) marca Philips modelo XL30 ESEM. La prueba de inflamabilidad se realizó encendiendo directamente un *pellet* de embalaje plástico (Poliestireno expandido) y un *pellet* base de celulosa, ambos con geometría cilíndrica y dimensiones de 2 cm de diámetro por 2 cm de alto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta la descripción de las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica, que permiten analizar en detalle la evolución morfológica de la biomasa de *P. australis* durante el proceso de producción. En la Figura 1 se observan las imágenes de MEB que revelan la morfología de las muestras a diferentes escalas de magnificación, desde una vista macroscópica (3 mm) hasta detalles estructurales (20 μ m). Las imágenes de baja magnificación (1a y 1e) muestran la estructura general del material y

exhiben una superficie heterogénea con morfología fibrosa. Al aumentar la magnificación (b/f: 100 μm ; c/g y d/h: 20 μm), se aprecia con mayor detalle la organización de las fibras individuales, que forman una red interconectada. Particularmente, en las imágenes de mayor resolución (20 μm) se distinguen las características superficiales de las fibras, incluida su textura porosa. Si bien el procesamiento induce fracturas en la estructura de las fibras de celulosa, lo que resulta en un material más moldeable, se mantiene la arquitectura fibrosa jerárquica característica de este tipo de materiales lignocelulósicos, lo cual coincide con resultados previamente reportados (Başaran y Metin, 2020). Esta modificación controlada de la estructura, que preserva la porosidad intrínseca mientras altera la integridad fibrilar, resulta particularmente relevante para aplicaciones tecnológicas donde se requieren materiales con mayor capacidad de conformado.

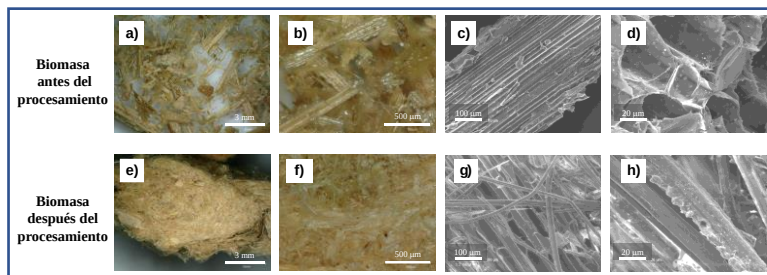


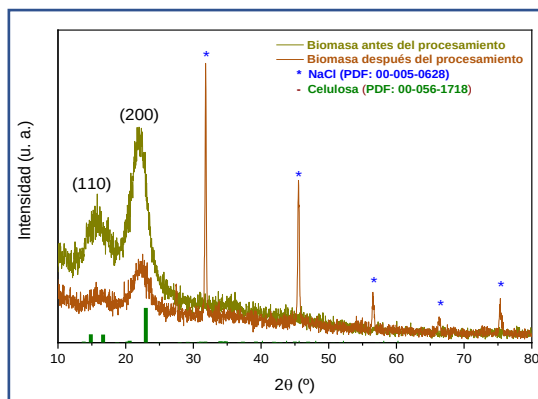
Figura 1. Imágenes de microscopía óptica (a, b, e y f) y microscopía electrónica de barrido (c, d, g y h) de la biomasa de *P. australis* antes y después del proceso de producción.

En la Figura 2 se presentan los patrones DRX de la biomasa antes y después del procesamiento, así como la carta cristalográfica (PDF: 00-056-1718) de la celulosa I. Este análisis se realizó con la finalidad de comprobar que efectivamente se estuviera obteniendo materiales a base de celulosa.

En el difractograma previo al procesamiento, se observan dos señales a $2\theta = 16^\circ$ y 22° , asociadas a los planos (110) y (002) de la estructura cristalina monoclínica de la celulosa (Başaran y Metin, 2020; El Allaoui y col., 2023). Durante el tratamiento con NaOH, la disminución de la intensidad de los picos de celulosa en el difractograma de rayos X se debe principalmente a la molienda mecánica, que transforma la celulosa I (altamente cristalina) en celulosa II (menos ordenada), lo que reduce su cristalinidad.

Además, el NaOH rompe puentes de hidrógeno, hincha las fibras y solubiliza componentes amorfos como la hemicelulosa y la lignina, lo que contribuye a una menor intensidad de las señales asociadas a la estructura cristalina original (Stanciu y col., 2025).

Figura 2. Difractograma de la biomasa antes y después del procesamiento.



Los resultados obtenidos en el tratamiento alcalino de *P. australis* coinciden con los reportados por Rico del Cerro y col. (2020) y Thielemans y col. (2023), donde se reporta la disminución de la cristalinidad de la celulosa tras diferentes tratamientos (como el uso de líquidos iónicos e hidrólisis ácida), lo que incrementa su reactividad química y su susceptibilidad a la hidrólisis enzimática; sin embargo, estos estudios emplean sistemas enzimáticos más complejos y tratamientos combinados para lograr una despolimerización más eficiente. Asimismo, en la muestra posterior al procesamiento se pueden detectar picos en 32, 46, 56, 66 y 75° que corresponden a la fase cristalina del NaCl (PDF: 00-005-0628) (Tounsadi y col., 2020), lo que indica la presencia de residuos provenientes del tratamiento alcalino con NaOH.

Los resultados de las pruebas para evaluar la estabilidad térmica de los embalajes se realizaron mediante estudios termogravimétricos, en la Figura 3 se presenta el termograma y su primera derivada (dm/dT) del material base de celulosa obtenido. El perfil termogravimétrico, muestra cuatro etapas principales de pérdida de masa asociadas a los procesos de descomposición. En la primera (25–105 °C), se observa una pérdida de masa moderada (11%), asociada a la evaporación de humedad adsorbida en la estructura del material, un fenómeno común en biopolímeros y biomateriales. Entre 200 y 320 °C, ocurre la descomposición simultánea de hemicelulosa y celulosa, generando la mayor pérdida de masa (38 % en el ejemplo).

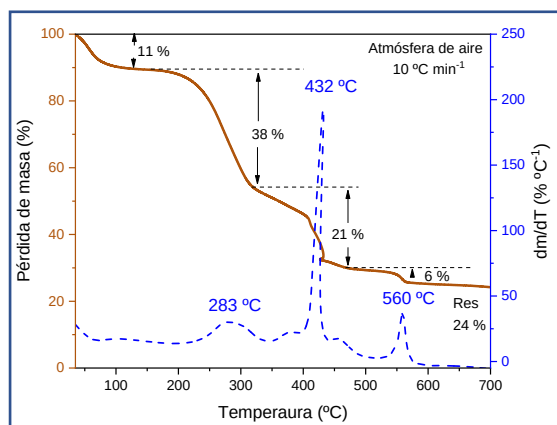


Figura 3. Termograma del embalaje a base de celulosa obtenido.

Esta etapa refleja la ruptura de los enlaces glucosídicos y la degradación de los componentes principales de la matriz lignocelulósica. Posteriormente, en el rango de 320-475 °C, la pérdida de masa continúa (21%) se debe a la descomposición de residuos de celulosa y lignina, junto con procesos de oxidación acelerados por la atmósfera de aire. Durante esta fase, la lignina, más termoestable, se degrada parcialmente, liberando

compuestos volátiles y dejando residuos carbonosos. Finalmente, por encima de 475 °C, se produce la descomposición de los restos de lignina y alquitrans formados durante el tratamiento térmico, culminando en un residuo estable (~24 %) a 700 °C. Este residuo contiene fundamentalmente estructuras carbonosas oxidadas y cenizas (como NaCl y, en menor proporción, silicatos y carbonatos), lo cual coincide con los resultados de DRX anteriores.

El análisis termogravimétrico demuestra que el material en estudio presenta una notable estabilidad térmica hasta 200 °C, con una pérdida de masa mínima por debajo de 100 °C. Esta resistencia al calor (comparable a otros polímeros sintéticos comerciales como poliestireno), combinada con su naturaleza biodegradable, lo hace particularmente adecuado para aplicaciones como envases alimentarios para productos calientes (tazas, recipientes de comida) donde las temperaturas no superan los 180 °C, así como para materiales de aislamiento térmico en construcción (paneles aislantes, revestimientos) donde se requiera protección contra temperaturas moderadas. Su comportamiento térmico predecible y origen sostenible lo posicionan como una alternativa ecológica frente a materiales sintéticos convencionales en estas aplicaciones.



Los espectros FTIR de la biomasa antes y después del tratamiento con NaOH se muestran en la Figura 4, los cuales presentan una notable similitud en la posición y la intensidad de los principales picos, lo que indica que no ocurren cambios estructurales significativos entre la biomasa de partida y el material base de celulosa. En ambos casos se observa una banda ancha alrededor de 3340 cm^{-1} , atribuida a los grupos -OH presentes en la celulosa y la lignina; señales en 2918 y 2848 cm^{-1} asociadas a estiramientos C-H de grupos metilo y metileno; un pico en 1635 cm^{-1} correspondiente a los grupos carbonilo (C=O) de la hemicelulosa, cabe resaltar la disminución en la intensidad de este pico debido a la hidrólisis básica; otro en 1425 cm^{-1} relacionado con las deformaciones de los grupos -CH_2 y -CH_3 ; y una señal intensa alrededor de 1030 cm^{-1} debida a enlaces C-O y C-C en polisacáridos. La persistencia de estos picos sugiere que el tratamiento alcalino no altera sustancialmente la estructura química general de la biomasa, aunque sí se ha observado, según estudios de DRX previamente realizados, una disminución de la cristalinidad de la celulosa. Esto es coherente con la acción del NaOH, que puede desorganizar la estructura cristalina de la celulosa al romper parcialmente los enlaces de hidrógeno entre las cadenas celulósicas, sin modificar significativamente su composición funcional.

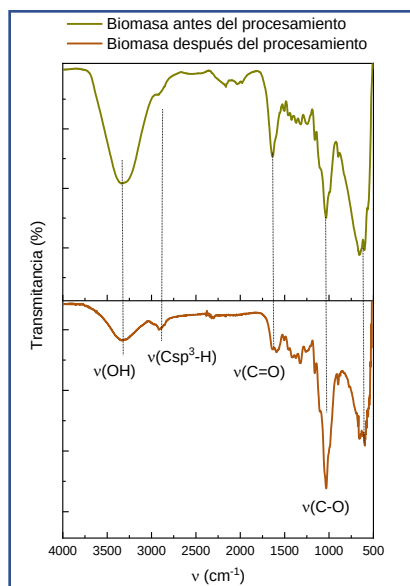


Figura 4. Espectros FTIR de la biomasa antes y después del procesamiento.

Finalmente, para evaluar la inflamabilidad del material base de celulosa y de un embalaje comercial de plástico, se realizó la prueba de ignición, cuyos resultados se muestran en la Figura 5. La prueba de ignición muestra una comparación visual del comportamiento ante la llama de dos tipos de materiales utilizados como embalaje: un embalaje plástico comercial y un embalaje de base de celulosa. En la fila superior se observa que la muestra de plástico, al entrar en contacto con la llama, comienza a deformarse rápidamente y desarrolla una flama sostenida a partir de los 4 s. A partir de ese momento, la combustión progresa de manera acelerada, con un derretimiento visible y una flama intensa que consume casi por completo el

material. El proceso total de combustión dura aproximadamente 10 s, lo que evidencia su alta inflamabilidad y su incapacidad para autoextinguirse.

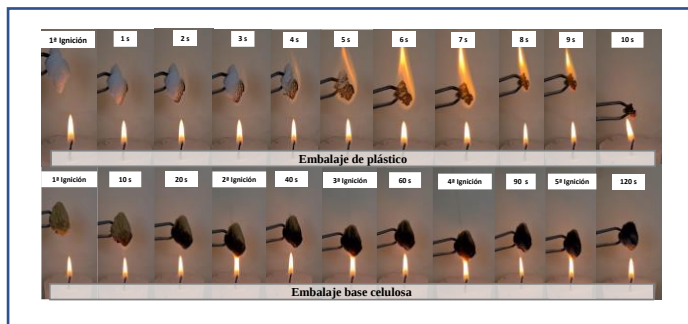


Figura 5. Prueba de inflamabilidad de embalajes de plástico y de materiales a base de celulosa.

En contraste, la secuencia correspondiente al embalaje de base de celulosa (fila inferior) muestra un comportamiento significativamente más seguro: aunque el material se oscurece y carboniza en la superficie, no logra sostener una flama estable, y a los 20 s se autoextingue por completo; incluso después de cinco intentos de ignición en distintos momentos (40, 60, 90 y 120 s), no desarrolla una combustión persistente. Este comportamiento refleja una baja inflamabilidad y una destacada capacidad de autoextinción, asociadas tanto a la formación de una capa carbonosa que limita el avance del fuego como a la presencia residual de NaCl y otras sales inorgánicas, como se aprecia en las Figuras 2 y 3, estas sustancias actúan como retardantes de llama al absorber calor, favorecer la carbonización y dificultar la generación de gases combustibles, contribuyendo así a inhibir la propagación de la flama. En conjunto, se evidencia que el embalaje plástico presenta un riesgo de combustión elevado, mientras que el embalaje de base de celulosa demuestra un comportamiento mucho más seguro frente al fuego.

CONCLUSIONES

Mediante el presente proyecto se logró desarrollar una metodología simple, escalable y amigable con el medio ambiente para obtención de materiales base celulosa a partir de la biomasa *P. australis* mediante un procesamiento térmico y activación química. Los resultados de las pruebas de DRX indican que la estructura cristalina del material tras el procesamiento corresponde a la de



la celulosa, con una menor cristalinidad, mientras que los resultados de FTIR confirman que el tratamiento en medio básico no genera cambios estructurales significativos en la biomasa. Los resultados de la prueba del análisis termogravimétrico realizada al material obtenido indican que presenta una estabilidad térmica hasta ~ 200 °C superior a la de ciertos polímeros comerciales como el polietileno, ampliamente utilizado en la industria del embalaje. Además, el embalaje base de celulosa presenta una baja inflamabilidad y una destacada capacidad de autoextinción. En conclusión, el presente proyecto representa un paso significativo hacia soluciones de embalaje más sostenibles con un alto potencial para reemplazar materiales contaminantes.

AGRADECIMIENTOS

El grupo de investigadores agradece al Instituto Tecnológico Superior de Monclova y al laboratorio de Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía, CINVESTAV Unidad Saltillo, por el apoyo y las facilidades brindados en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Aldosari, O. F., Jabli, M. & Morad, M. H. (2023). Chemical extraction of cellulose from Ligno-cellulosic *Astragalus armatus* pods: Characterization, and application to the biosorption of methylene blue. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(8): 105019. <https://doi.org/10.1016/-j.arabjc.2023.105019>
- Anukwah, G. D. & Gadzekpo, V. P. Y. (2024). Production of natural cellulose-based microfibrils, from oil palm mesocarp fibres and pineapple leaf wastes, as porous supports for further applications. *Heliyon*, 10(18): e16491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37701>
- Arup Kar & Dip S. (2023). Characterization of new natural cellulosic fiber from *Calamus tenuis* (Jati Bet) cane as a potential reinforcement for polymer composites. *Heliyon*, 9(6): 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16491>

- Başaran Kankılıç, G. & Metin, A. Ü. (2020). *Phragmites australis* as a new cellulose source: Extraction, characterization and adsorption of methylene blue. *Journal of Molecular Liquids*, 312: 113313. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113313>
- Del Cerro, D. R., Koso, T. V., Kakko, T., King, A. W. T., & Kilpeläinen, I. (2020). Crystallinity reduction and enhancement in the chemical reactivity of cellulose by non-dissolving pre-treatment with tetrabutylphosphonium acetate. *Cellulose*, 27(10): 5545–5562. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03044-6>
- El Allaoui, B., Chakhtouna, H., Zari, N., Benzeid, H., Qaiss, A. el K., & Bouhfid, R. (2023). Superhydrophobic alkylsilane functionalized cellulose beads for efficient oil/water separation. *Journal of Water Process Engineering*, 54: 104015. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104015>
- Herrera-Zamora, D. M., Pareja-Rodríguez, R., Ruiz-Gómez, M., González-Gómez, W. S., Velasco-Arias, D., García-Valladares, O., Escobar, S., Rodríguez-Gattorno, G. & Martínez-Flores, R. (2023). Dispersibility study of GO-like biocarbons obtained from the thermal decomposition of biomass: *Phragmites australis* and *Carya illinoensis*. *Biomass and Bioenergy*, 172: 106749. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106749>
- Luo, Q., Tan, H., Ye, M., Jho, E. H., Wang, P., Iqbal, B., Zhao, X., Shi, H., Lu, H. & Li, G. (2025). Microplastics as an emerging threat to human health: An overview of potential health impacts. *Journal of Environmental Management*, 387: 125915. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125915>
- Mai, L., He, H. & Zeng, E. Y. (2022). Plastic pollution in waterways and in the oceans. T. M. Letcher, Water and Climate Change Sustainable Development, Environmental and Policy Issues (pp.179-195). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99875-8.00008-2>
- Pareja-Rodríguez, R., Torres-García, E., Martínez-Flores, R. & Rodríguez-Gattorno, G. (2025). The role of autogenous atmosphere during graphene-like materials formation from biomass: a case study from *Phragmites australis*, thermokinetic study and structural evolution. *Materials Today Communications*, 45: 112156. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112156>
- Stanciu, M.-C., Tanasă, F. & Teacă, C.-A. (2025). Crystallinity Changes in Modified Cellulose Substrates Evidenced by Spectral and X-Ray Diffraction Data. *Polysaccharides*, 6(30): 2-32. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6020030>
- Thi Thuy Van, N., Gaspillo, P. asa, Thanh, H. G. T., Nhi, N. H. T., Long, H. N., Tri, N., Thi Truc Van, N., Nguyen, T. T. & Ky Phuong Ha, H. (2022). Cellulose from the banana stem: optimization of extraction by response surface methodology (RSM) and characterization. *Heliyon*, 8(12): e11845. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11845>
- Thielemans, K., De Bondt, Y., Comer, L., Raes, J., Everaert, N., Sels, B. F., & Courtin, C. M. (2023). Decreasing the Crystallinity and Degree of Polymerization of Cellulose

Increases Its Susceptibility to Enzymatic Hydrolysis and Fermentation by Colon Microbiota. *Foods*, 12(5): 1100. <https://doi.org/10.3390/foods12051100>

Tounsadi, H., Metarfi, Y., Barka, N., Taleb, M. & Rais, Z. (2020). Removal of Textile Dyes by Chemically Treated Sawdust of Acacia: Kinetic and Equilibrium Studies. *Journal of Chemistry*, 2020: 234218. <https://doi.org/10.1155/2020/7234218>

Yuanita, E., Nugraha, A. F., Jumahat, A., Mochtar, M. A. & Chalid, M. (2024). Extraction of Cellulose from *Arenga Pinnata* "Ijuk" Fiber for Polypropylene Composite: Effect of Multistage Chemical Treatment on the Crystallinity and Thermal Behaviour of Composite. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48: 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.01.010>