

Extracción sustentable de microfibras celulósicas desde residuos agroindustriales del plátano

Omar Alejandro Martínez-Anguiano¹

Florentino Soriano-Corral^{1,§}

José de Jesús Ku-Herrera²

Ramón E. Díaz de León-Gómez¹

Gabriela Yolotzín Romero-Zúñiga¹

Lucía Fabiola Cano-Salazar³

1 Centro de Investigación en Química Aplicada. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo núm. 140, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25294. Tel. 844 4389830. (omar.martinez.ps@ciqa.edu.mx; ramon.diazdeleon@ciqa.edu.mx; romero.gabriela.pd@ciqa.edu.mx). C

2 SECIHTI-Centro de Investigación en Química Aplicada. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo núm. 140, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25294. Tel. 844 4389830. (jesus.ku@ciqa.edu.mx).

3 Facultad de Ciencias Químicas-Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. José Cárdenas Valdez S/N, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25280. (lucia.cano@uadec.edu.mx).

Autor para correspondencia: florentino.soriano@ciqa.edu.mx.

Resumen

Las fibras de celulosa natural tienen propiedades y estructuras que las hacen adecuadas para distintos usos, como la fabricación de textiles, compuestos, pulpa y papel. Aunado a esto, existe un creciente interés en el uso de materiales alternativos de bajo impacto ambiental debido a la problemática relacionada al medio ambiente, por ende, es necesario la implementación de nuevas fuentes y procesos de obtención de celulosa. La investigación se inició en 2024. El objetivo fue la obtención de microfibras de celulosa cristalina a partir de residuos agroindustriales del cultivo del plátano mediante procesos de menor impacto ambiental. Las fibras de celulosa se obtuvieron a partir de las fibras del pseudo-tallo del plátano de la variedad *Musa cavendish* empleando tratamientos mediante explosión de vapor realizados en un reactor térmico y procesos de blanqueo con NaClO al 2% obteniéndose microfibras de celulosa suaves y frágiles. El análisis por TGA demostró que las fibras de celulosa obtenidas a partir de las fibras de plátano presentaron una mayor estabilidad térmica debido a la remoción de la hemicelulosa, misma que se pudo corroborar por FT-IR. El tratamiento mediante explosión de vapor es una alternativa viable y ecológica para la obtención de microfibras de celulosa a partir de fibras de plátano y otros residuos agroindustriales.

Palabras clave:

Musa cavendish, explosión de vapor, reactor, tratamiento.



Introducción

Las fibras naturales tienen propiedades favorables como bajo costo, fácil disponibilidad, baja densidad y reciclabilidad, etc. Las desventajas del refuerzo natural, como es el caso de las fibras, es una mayor absorción de humedad y la mala compatibilidad del refuerzo y la matriz. Por lo tanto, existe una variedad de tratamientos químicos o físicos que se utilizan para modificar la superficie de la fibra y mejorar la adhesión entre la matriz y la fibra (Godara, 2019).

Las fibras naturales presentan algunas ventajas en comparación con las fibras artificiales, como, bajo costo, alta disponibilidad, baja densidad, no dañan el equipo de procesado, son reciclables y biodegradables (Rajwade *et al.*, 2020; Reddy *et al.*, 2020). Las fibras de celulosa natural tienen propiedades físicas y químicas que las hacen adecuadas para diversos usos, como la fabricación de textiles, compuestos poliméricos, pulpa y papel. Las fibras celulósicas para la producción de textiles y pulpa de papel siguen siendo productos comerciales no alimentarios importantes (Sheng *et al.*, 2014).

El nicho de mercado para la celulosa natural se ha mantenido y están surgiendo numerosos nuevos mercados debido a la imagen ecológica 'verde' y baja huella de carbono de las fibras celulósicas. Dependiendo del tipo de biomasa lignocelulósica, generalmente, las fibras naturales contienen entre un 25 y un 45% en peso de celulosa, entre un 20 y un 40% en peso de hemicelulosa y entre un 10 y un 25% en peso de lignina (Sarker *et al.*, 2021).

La celulosa es un homopolisacárido que consiste en cadenas lineales de subunidades de D-glucosa unidas por enlaces β -(1-4) glicósidos. La hemicelulosa es un polisacárido ramificado heterogéneo que consiste en galactosa, arabinosa, manosa, glucosa y xilosa. Mientras que la lignina es un polímero aromático de fenilpropano cuyos precursores están realizados principalmente de alcohol coniferílico, alcohol p-cumarílico y alcohol sinapílico. Tiene una función estructural en la célula vegetal, uniendo celulosa y hemicelulosa (Gupta *et al.*, 2020).

También contiene extractos de los componentes no estructurales de la biomasa, como aceites esenciales, grasas, ceras, fenólicos y ácidos grasos, entre otros. Las hemicelulosas, la lignina y otros componentes no celulósicos deben separarse, disolverse y descomponerse parcialmente durante el proceso de macerado de las fibras de celulosa para uso textil (Xu *et al.*, 2017). Sin embargo, la complejidad y variabilidad de la estructura lignocelulósica dificultan la biodegradación, en particular la hidrólisis de la materia orgánica es compleja para convertirla en compuestos solubles, que es el paso limitante de la velocidad de degradación (Capári *et al.*, 2016).

Esta resistencia estructural se puede romper mediante métodos de pretratamiento físicos, químicos y biológicos. El pretratamiento hidrotermal es un método en condiciones acuosas que combina procesos físicos y químicos (Barciela *et al.*, 2023). Uno de ellos es la explosión con vapor, cuyo mecanismo se basa en la despolimerización de la lignina y la explosión de las fibrillas celulósicas mediante el tratamiento de la biomasa con vapor presurizado a alta temperatura, que suele oscilar entre 160 y 280 °C.

Para extraer las fibras de celulosa y mantener su integridad, la temperatura hidrotermal debe ser inferior a 240 °C. El agua contenida en el sustrato se evapora y se hincha rápidamente, lo que da lugar a cierto grado de hidrólisis (Pérez-Limiñana *et al.*, 2022). Por lo tanto, en este trabajo de investigación se presentó un estudio sobre el pretratamiento hidrotermal, específicamente por explosión con vapor, para mejorar las propiedades de las fibras naturales en compuestos poliméricos.

La investigación se centra en cómo el control de las condiciones de temperatura y tiempo influye en la despolimerización de la lignina y en la preservación de la celulosa, optimizando así la compatibilidad fibra-matriz y la biodegradabilidad del material. Esta contribución ofrece una estrategia más eficiente y sostenible para el uso de fibras naturales en aplicaciones de materiales compuestos ecológicos.

Materiales y métodos

Para este estudio se recolectaron fibras del pseudo tallo del plátano variedad *Musa cavendish* del estado de Tabasco. El proceso de blanqueo se realizó empleando hipoclorito de sodio (NaClO) grado analítico de Sigma-Aldrich. El tratamiento por explosión de vapor (SE) se realizó en un reactor Parr 4842 de 2 L de capacidad.

Tratamiento por explosión de vapor (SE)

Se colocaron 10 g de fibra de plátano previamente humedecida en el portamuestras del reactor Parr, el cual evita que las fibras estén en contacto directo con las paredes del reactor y el agua, evitando la carbonización de estas. Se colocaron 300 ml de agua destilada en el reactor y se calentó a 185 °C por 10 min a una presión de 170 psi.

La muestra se explotó mediante una caída de presión, al liberarse ésta a través de la apertura de una válvula de alivio. Las fibras explotadas fueron secadas a 70 °C durante 24 h en una estufa. El diseño del reactor con el portamuestras adaptado para el proceso del tratamiento de las fibras se muestra en la Figura 1, este diseño se basó en un trabajo previamente reportado por Shamsudin *et al.* (2024).

Figura 1. Reactor con portamuestra para el tratamiento de fibras mediante explosión de vapor.



Proceso de extracción de microfibras de celulosa

Para la extracción de las microfibras se realizó un proceso de blanqueo en un vaso de precipitado y una parrilla de calentamiento, para ello se preparó previamente una solución de NaClO al 2% y se calentó a 50 °C con agitación constante. Una vez alcanzada la temperatura se colocaron 5 g de fibra explotada en 250 ml de solución por 1 h. Al terminar la reacción, las microfibras recuperadas fueron filtradas por gravedad y lavadas con abundante agua hasta que el exceso de NaClO fuese eliminado, las microfibras fueron secadas a temperatura ambiente por 24 h.

Caracterización

El análisis químico se realizó en un espectrofotómetro FT-IR marca Nicolet Nexus modelo 470 ESP en un rango de 600 a 4 000 cm^{-1} , el análisis se realizó con el objetivo de determinar los grupos químicos funcionales presentes tanto en las fibras sin tratar como tratadas y poder realizar un análisis comparativo sobre los posibles efectos del tratamiento en las fibras.

El análisis termogravimétrico (TGA) se realizó en un analizador térmico marca Linseis con el objetivo de evaluar la estabilidad térmica de las fibras, las muestras (13 mg \pm 3 mg) fueron calentadas en atmosfera de nitrógeno desde temperaturas de 30 a 700 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C min. Para el análisis superficial de las fibras se utilizó un microscopio óptico marca PrimoStar usando magnificaciones de 100 y 200 X.

Resultados y discusión

Después del tratamiento por explosión de vapor y NaClO, las fibras de plátano únicamente presentaron un cambio en el color, debido a que el hipoclorito es un agente blanqueador que posee la capacidad de remover la hemicelulosa y la lignina de la fibra (Aridi *et al.*, 2021). Por otro lado, las fibras tratadas únicamente con SE presentaron un color café oscuro debido a que las temperaturas empleadas tienden a carbonizar parcialmente las fibras, por su parte, las fibras tratadas con NaClO y SE mostraron una tonalidad blanca y una apariencia suave y frágil, producto del efecto del hipoclorito.

Esta situación se debió a que el proceso de SE evapora el agua contenida en las fibras y se expande rápidamente, lo que provoca la ruptura de la pared celular formando poros así como también promueve la deslignificación, y la hidrólisis de las hemicelulosas (Ma *et al.*, 2022), mientras que el tratamiento con NaClO aplicado a las fibras explotadas tiende a separarlas en microfibras durante la remoción de la lignina y la hemicelulosa dando como resultado una consistencia suave y delgada, como se observa en la Figura 2d.



Figura 2. a) fibra de plátano sin tratar; b) fibra tratada con NaClO; c) fibra tratada con SE y d) fibra tratada con SE y NaClO.

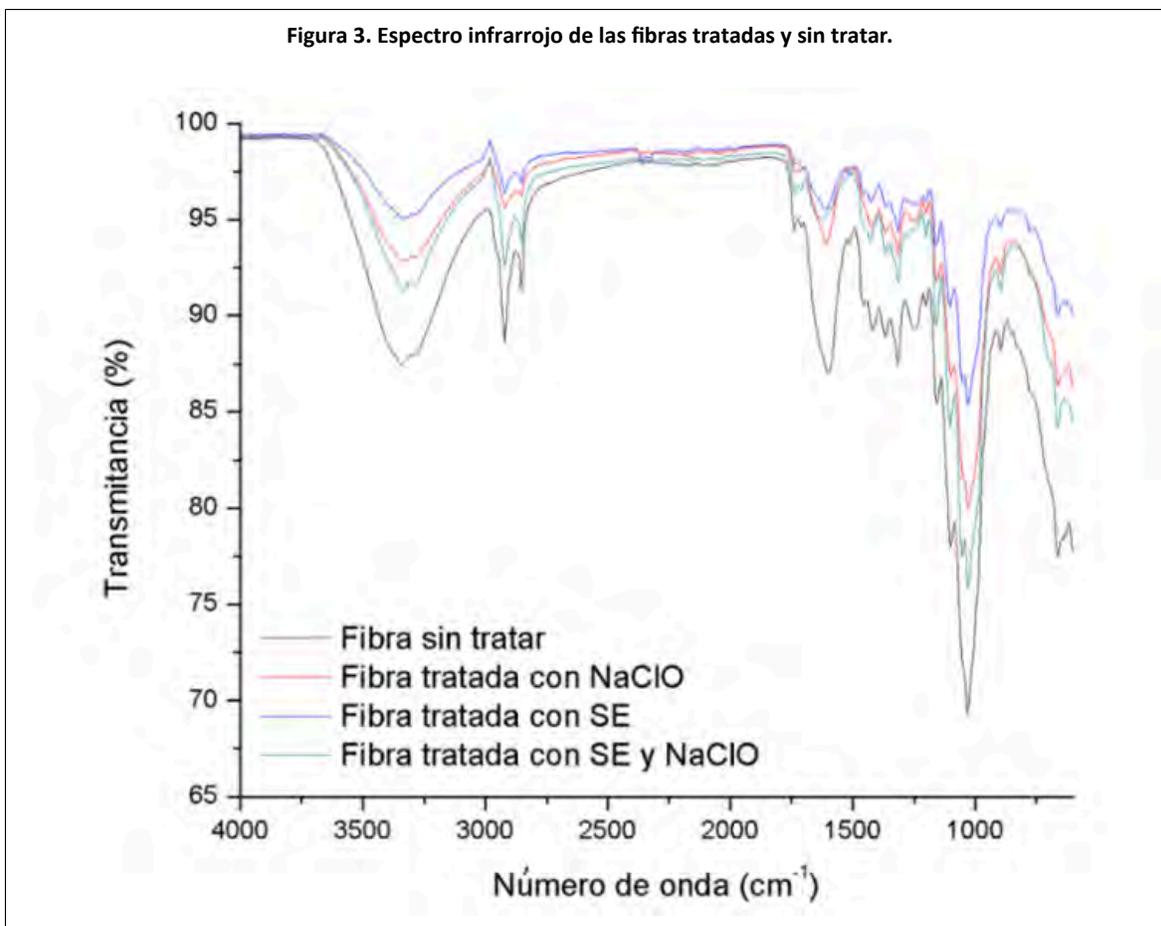


Análisis por espectroscopía infrarroja (FT-IR)

En la Figura 3 se muestran los espectros FT-IR de la fibra de plátano sin tratar, la fibra tratada con NaClO, la fibra tratada con SE y la fibra tratada con SE y NaClO. Tanto las fibras sin tratar como las tratadas presentaron las típicas bandas correspondientes a la celulosa, hemicelulosa y lignina. Se puede observar en todos los casos la banda de absorción de estiramiento de O-H alrededor de 3331 cm^{-1} , dichos grupos pueden provenir del agua absorbida producto del carácter higroscópico de las fibras, y de los alcoholes alifáticos primarios y secundarios presentes en la celulosa, hemicelulosa y ácidos carboxílicos (Ibrahim *et al.*, 2010).



Figura 3. Espectro infrarrojo de las fibras tratadas y sin tratar.



Los picos de absorción presentes en $2\ 918\ \text{cm}^{-1}$ y $2\ 850\ \text{cm}^{-1}$, son atribuidos a la vibración de estiramiento asimétrica de C-H en grupos metilo y la vibración de estiramiento simétrica de C-H en grupos metileno pertenecientes a la celulosa y hemicelulosas residuales, respectivamente. Los picos ubicados alrededor de $1\ 390\text{-}1\ 410\ \text{cm}^{-1}$ en el espectro de deformación simétrica pertenece a los estiramientos C-H de la celulosa (Parre *et al.*, 2020).

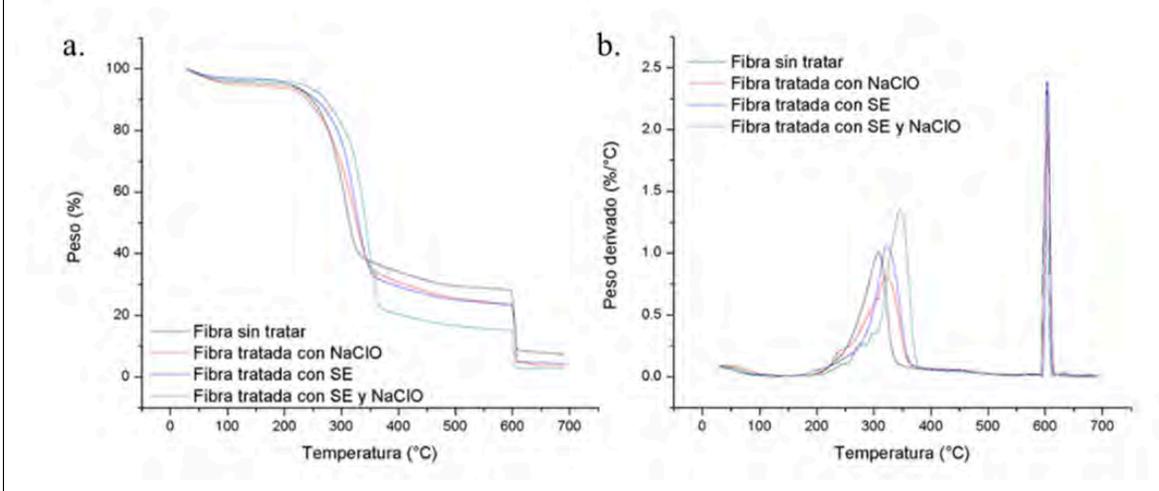
Los picos comprendidos entre $1\ 000\text{-}1\ 200\ \text{cm}^{-1}$ indicaron un estiramiento de tipo asimétrico C-O-C producto de la celulosa y la hemicelulosa, así como también una vibración de estiramiento C-O y C-C. La intensidad de absorbancia del pico de $1\ 608\ \text{cm}^{-1}$ característico de las hemicelulosas y atribuido al estiramiento C=O, disminuyó en todos los casos en comparación con la fibra sin tratar. Esto es debido a la disminución en contenido de hemicelulosa y lignina producto de los tratamientos (Ronald Aseer *et al.*, 2013).

Análisis termogravimétrico (TGA)

Con el objetivo de comparar las características de las fibras tratadas y sin tratar, las muestras de fibra de plátano se analizaron mediante análisis termogravimétrico. Las curvas termogravimétricas (TG) y termogravimétricas derivadas (DTG) de las fibras tratadas y sin tratar se muestran en la Figura 4a y 4b. Se pudo observar una ligera pérdida en peso entre los 50 y $100\ ^\circ\text{C}$ indicativo de la pérdida de humedad producto del agua absorbida por la fibra.



Figura 4. a) termograma (TG) de las fibras tratadas y sin tratar y b) termograma derivado (DTG) de las fibras tratadas y sin tratar.



La principal señal de descomposición de las fibras sin tratar ocurre entre los 200 y 350 °C la cual se atribuye a la descomposición de la celulosa y componentes de la lignina, la curva DTG de la fibra de plátano sin tratar (Figura 4b) muestra un pico en 309.91 °C (pérdida de masa 63.44%) que se debe a la descomposición térmica de la α -celulosa (Deepa *et al.*, 2011).

Después de los 400 °C la pérdida en peso fue lenta hasta los 800 °C apreciándose pequeñas señales producto probablemente de la lignina residual (Kataria *et al.*, 2017). La DTG de las fibras tratadas con NaClO presentó dos picos, el pico inicial aproximadamente a 85 °C corresponde a una pérdida de masa de agua adsorbida; sin embargo, el pico principal de descomposición en las fibras tratadas con NaClO aumentó hasta aproximadamente 325.33 °C (pérdida de masa 66.73%) debido principalmente a la remoción de la hemicelulosa y la lignina durante el tratamiento.

Se ha reportado que el hipoclorito de sodio al 5% ha sido el mejor agente blanqueador para eliminar la hemicelulosa y la lignina de la fibra (Aridi *et al.*, 2020). De la curva DTG de las fibras tratadas con SE, se observa un pico de descomposición importante a 322.51 °C (pérdida de masa del 68.91%) debido principalmente a la descomposición de la α -celulosa.

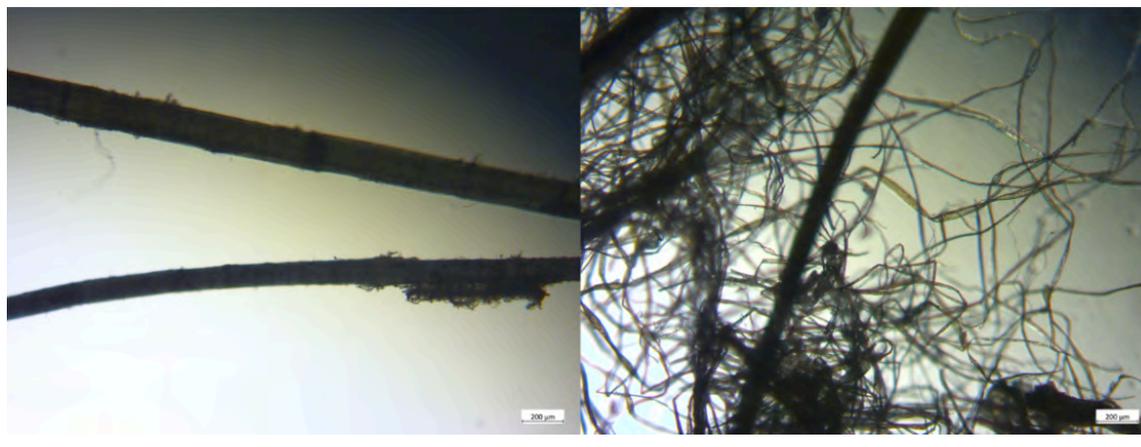
Por su parte, la curva de DTG de la fibra tratada con SE y NaClO presentó un pico mayoritario a 346.78 °C (pérdida de masa del 78.36%) producto de la descomposición de la β -celulosa, es evidente que existe un cambio en la temperatura de descomposición principal de 309.91 a 346.78 °C mientras se realiza la transición de la fibra sin tratar a la fibra tratada con SE y NaClO.

Las fibras tratadas muestran en todos los casos un aumento en la temperatura de pérdida en masa. El proceso de blanqueo por NaClO coadyuba a eliminar la lignina residual después del proceso mediante explosión con vapor. El mecanismo de blanqueo implica la oxidación de la lignina, lo que conduce a la depolimerización de la lignina dejando a la α -celulosa como material residual la cual se ha reportado posee propiedades cristalinas. Los aumentos en la temperatura de degradación ocurren debido al mayor contenido de celulosa y a la alta cristalinidad de las fibras tratadas, lo que permite que las fibras sean capaces de soportar mayor temperatura de descomposición (Meng *et al.*, 2019).

Análisis por microscopía óptica (MOP)

En la Figura 5 se estudió en que las fibras tratadas con SE Y NaClO poseen tamaños desde las 9 μm hasta las 39 μm de espesor siendo la razón principal de que las fibras posean una consistencia suave y blanda en comparación con las fibras sin tratar; sin embargo, aun con el tratamiento realizado se pudieron encontrar de manera minoritaria fibras con tamaños superiores a las 100 μm indicando que el proceso de desfibrilación no es del todo homogéneo, se sabe que las condiciones de operación en los tratamientos con vapor a alta temperatura y las concentraciones del agente blanqueador son altamente determinantes para la liberación de microfibras.

Figura 5. Micrografías obtenidas de las fibras sin tratar (izquierda) y las fibras tratadas con SE y NaClO (derecha).



Conclusiones

Los tratamientos combinados de explosión de vapor con hipoclorito han demostrado ser altamente eficaces en la reducción drástica de las largas cadenas empaquetadas de fibras a microfibrillas al actuar principalmente en la región interfibrilar durante la explosión de vapor a alta presión. Esta desestructuración facilita una mayor accesibilidad y dispersión de las microfibrillas, mejorando significativamente sus propiedades.

Los resultados obtenidos indican que las microfibras producidas presentan una notable mejora en sus características químicas y térmicas en comparación con las fibras sin tratar. Estas propiedades mejoradas, permiten una mayor superficie de contacto con diversas matrices poliméricas, lo que las hacen altamente aptas para su uso como materiales de refuerzo en la fabricación de compuestos, ofreciendo así un camino prometedor hacia la producción de materiales más sostenibles y de alto rendimiento.

Bibliografía

- 1 Aridi, A. S.; Chin, N. L.; Ishak, N. A.; Yusof, N. N. M.; Kadota, K.; Manaf, Y. N. and Yusof, Y. A. 2021. Effect of sodium hypochlorite concentration during pre-treatment on isolation of nanocrystalline cellulose from *Leucaena leucocephala* (Lam.) Mature Pods. *BioResources*. 16(2):3137-3158.
- 2 Aridi, A. S.; Ling, C. N.; Ishak, N. A.; Nor Nadiyah, M. Y.; Ahmed, M. F. M. and Yusof, Y. A. 2020. Structural FTIR analysis of cellulose functional groups isolated from *Leucaena leucocephala* pods using different bleaching agents. *AgriRxiv*.
- 3 Barciela, P. A.; Perez-Vazquez, A.; Carpena, M. R.; Seyyedi-Mansour, S.; Donn, P.; Fraga-Corral, M.; Otero, P.; Xiao, J.; Simal-Gandara, J.; Prieto, M. A. and Cassani, L. 2023. Insight into steam explosion pretreatment of sugarcane bagasse for bioethanol production †. *Engineering proceedings*. 37(1): 1-6.
- 4 Capári, D.; Dörg#, G. and Dallos, A. 2016. Comparison of the effects of thermal pretreatment, steam explosion and ultrasonic disintegration on digestibility of corn stover. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 4(2):107-126.
- 5 Deepa, B.; Abraham, E.; Cherian, B. M.; Bismarck, A.; Blaker, J. J.; Pothan, L. A.; Leao, A. L.; Souza, S. F. and Kottaisamy, M. 2011. Structure, morphology and

- thermal characteristics of banana nano fibers obtained by steam explosion. *Bioresource Technology*. 102(2):1988-1997.
- 6 Godara, M. S. S. 2019. Effect of chemical modification of fiber surface on natural fiber composites: a review. *Materials today: proceedings*. 18(7):3428-3434.
 - 7 Gupta, U. S.; Dhamarika, M.; Dharkar, A.; Chaturvedi, S.; Tiwari, S. and Namdeo, R. 2020. Surface modification of banana fiber: a review. *Materials today: proceedings*. 43(7):904-915.
 - 8 Ibrahim, M. M.; Agblevor, F. A. and El-Zawawy, W. K. 2010. Isolation and characterization of cellulose and lignin from steam-exploded lignocellulosic biomass. *BioResources* . 5(1):397-418.
 - 9 Kataria, R.; Mol, A.; Schulten, E.; Happel, A. and Mussatto, S. I. 2017. Bench scale steam explosion pretreatment of acid impregnated elephant grass biomass and its impacts on biomass composition, structure and hydrolysis. *Industrial Crops and Products*. 106(8):48-58.
 - 10 Ma, C.; Ni, L.; Guo, Z.; Zeng, H.; Wu, M.; Zhang, M. and Zheng, B. 2022. Principle and application of steam explosion technology in modification of food fiber. *Foods*. 11(21):1-19.
 - 11 Meng, F.; Zhang, X.; Yu, W. and Zhang, Y. 2019. Kinetic analysis of cellulose extraction from banana pseudo-stem by liquefaction in polyhydric alcohols. *Industrial Crops and Products*. 137(5):377-385.
 - 12 Parre, A.; Karthikeyan, B. Y.; Balaji, A. and Udhayasankar, R. 2020. Investigation of chemical, thermal and morphological properties of untreated and NaOH treated banana fiber. *Materials today: proceedings*. 22(6):347-352.
 - 13 Pérez-Limiñana, M. A.; Pérez-Aguilar, H.; Ruzafa-Silvestre, C.; Orgilés-Calpena, E. and Arán-Ais, F. 2022. Effect of processing time of steam explosion for the extraction of cellulose fibers from phoenix canariensis palm leaves as potential renewable feedstock for materials. *Polymers*. 14(23):5206.
 - 14 Rajwade, J. M.; Chikte, R. G. and Paknikar, K. M. 2020. Nanomaterials: new weapons in a crusade against phytopathogens. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 104(4):1437-1461. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10334-y>.
 - 15 Reddy, R. A.; Yoganandam, K. and Mohanavel, V. V. 2020. Effect of chemical treatment on natural fiber for use in fiber reinforced composites Review. *Materials today: proceedings*. 33(2):2996-2999.
 - 16 Ronald-Aseer, J.; Sankaranarayanan, K.; Jayabalan, P.; Natarajan, R. and Priya-Dasan, K. 2013. Morphological, physical, and thermal properties of chemically treated banana fiber. *Journal of Natural Fibers*. 10(4):365-380.
 - 17 Sarker, T. R.; Pattnaik, F.; Nanda, S.; Dalai, A. K.; Meda, V. S. and Naik, S. N. 2021. Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: a review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. *Chemosphere*. 284(4):131372.
 - 18 Shamsudin, S.; Kamal-Bahrin, E.; Hassan, M. A. and Shirai, Y. 2024. Chemical free saturated steam pretreatment of oil palm empty fruit bunch for improved enzymatic saccharification. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 44(1):44-63.
 - 19 Sheng, Z.; Gao, J.; Jin, Z.; Dai, H.; Zheng, L. and Wang, B. 2014. Effect of steam explosion on degumming efficiency and physicochemical characteristics of banana fiber. *Journal of Applied Polymer Science*. 131(16):1-9.
 - 20 Xu, J.; Zhou, G. and Li, J. 2017. Effects of steam explosion pretreatment on the chemical composition and fiber characteristics of cornstalks. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2(4):153-157.

Extracción sustentable de microfibras celulósicas desde residuos agroindustriales del plátano

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 00 March 2025
Date accepted: 00 June 2025
Publication date: 15 October 2025
Publication date: Sep-Oct 2025
Volume: 16
Issue: esp30
Electronic Location Identifier: e4041
DOI: 10.29312/remexca.v16i30.4041
Article Id (other): 00004

Categories

Subject: Artículos

Palabras clave

Palabras clave

Musa cavendish
explosión de vapor
reactor
tratamiento

Counts

Figures: 5
Tables: 0
Equations: 0
References: 20