DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 241-245

Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para la formación de papel: ensayos de tensión
Employment of lignocellulosic waste for papermaking: tensile test

H.D. Gutiérrez-Guzmán [a], I. L. Cruz-Jaramillo [b], L.A. Castillo-Suárez [a], C. A. de León-Condes [b], S. Ventura-Cruz [a*]

[a] *Maestría en Ingeniería, Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Tianguistenco, Estado de México, México.*
[b] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

El papel convencional se fabrica a partir de materias primas como las coníferas de fibra larga, lo que ha contribuido a la deforestación, el consumo intensivo de recursos naturales y la emisión de gases de efecto invernadero asociados a los procesos de extracción y transformación. En este contexto, el aprovechamiento de residuos agroindustriales representa una estrategia sostenible para la obtención de materiales lignocelulósicos alternativos. El presente estudio evaluó las propiedades mecánicas de hojas estándar (H) fabricadas mediante diferentes formulaciones de pulpa de bagazo de agave (PBA) y cartón reciclado (CR). Los ensayos de tensión revelaron el comportamiento de sus propiedades mecánicas, donde la formulación de la hoja estándar H2(60 g de PBA / 6 g de CR) alcanzó un módulo de Young de 63.07 MPa, esfuerzo máximo de 0.21 MPa. Los resultados demostraron que la incorporación de PBA y CR permiten obtener materiales con propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones de empaque, constituyendo una alternativa sostenible a las fibras convencionales de madera y favoreciendo la valorización de residuos agroindustriales abundantes en México.

Palabras Clave: Bagazo de agave, celulosa, residuos agrícolas, cartón reciclado.

Abstract

Traditional paper is produced from raw materials like long-fiber conifers, leading to deforestation, excessive use of natural resources, and greenhouse gas emissions linked to extraction and processing. In this context, the utilization of agro-industrial waste represents a sustainable strategy for obtaining alternative lignocellulosic materials. The present study evaluated the mechanical properties of standard sheets (H) manufactured using different formulations of agave bagasse pulp (PBA) and recycled cardboard (CR). The tensile tests revealed the behavior of its mechanical properties, where the formulation of the standard sheet H2 reached a Young's modulus of 63.07 MPa and a maximum stress of 0.21 MPa. The results demonstrated that the incorporation of PBA and CR allows for the production of materials with suitable mechanical properties for packaging applications, constituting a sustainable alternative to conventional wood fibers and promoting the valorization of agro-industrial waste abundant in Mexico.

Keywords: Agave bagasse, cellulose, agricultural waste, recycled cardboard.

1. Introducción

El papel es una estructura porosa constituida por tejidos de fibras vegetales, cuyo componente principal es la celulosa. La celulosa es un polímero lineal formado por unidades de D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos (1–4).

La pulpa celulósica se obtiene mediante un proceso químico que emplea reactivos alcalinos bajo condiciones controladas de temperatura y presión, en el que las fibras de celulosa se separan de la lignina (Kidanu et al., 2026).

Los residuos lignocelulósicos están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos materiales de desecho se generan en grandes cantidades y tienen poco o ningún valor económico y a menudo su

*Autor para la correspondencia: sagnite_ambiental@test.edu.mx
Correo electrónico: hector_24201016@test.edu.mx (Héctor Daniel Gutiérrez-Guzmán), lenin_cruz@uaeh.edu.mx (Iván Lenin Cruz-Jaramillo), luis_cs@test.edu.mx (Luis Antonio Castillo-Suarez), cristina_arely@uaeh.edu.mx (Cristina Arely De León-Condes), sagnite_ambiental@test.edu.mx (Sagnite Ventura-Cruz).

Historial del manuscrito: recibido el 08/06/2026, última versión-revisada recibida el 28/08/2026, aceptado el 08/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18120

CC BY NC ND

eliminación es un problema (Koskela et al., 2014; Semple et al 2022; Bezza et al 2026; Belyamani, 2026).

Recientes investigaciones revalorizan los residuos lignocelulósicos como fuente renovable para la obtención de fibras sustentables y su posterior aplicación en la fabricación de diferentes tipos de papel (Abenghal et al., 2025, Reza et al 2024) elaboraron papel filtro a partir de fibras celulósicas de residuos de pulpa de café, utilizando un tratamiento químico en condiciones alcalinas con hidróxido de sodio. La resistencia a la tracción del papel fue comparable con la de un papel de filtro comercial, 526 ± 198.4 N/m.

Otros estudios han evaluado la viabilidad de diferentes residuos agrícolas tallos, bagazo y hojas de piña, como materia prima prometedora para la obtención de pulpa celulósica y su aplicación en la fabricación de papel para cartón (Sibaly & Jeetah, 2017).

Durante el proceso de elaboración del mezcal en las etapas de fermentación y destilación se genera el residuo de bagazo de agave, se estima que en la producción de un litro de mezcal se generan aproximadamente 17 kg de bagazo húmedo (Gómez-Guerrero et al., 2019; Consejo Regulador Mezcal, 2021). La presente investigación tuvo como finalidad evaluar las mezclas de pulpa celulósica de bagazo de agave (PBA) y cartón reciclado (CR) para su aplicación en la formación de hojas de papel y su efecto en la resistencia de este material mediante ensayos de tensión. Las pulpas celulósicas a partir de bagazo de agave y cartón reciclado en diferentes proporciones, mejoran la resistencia mecánica del material.

2. Materiales y métodos

2.1 Obtención de la pulpa de bagazo de agave (PBA)

El bagazo de agave tipo espadín (*Agave angustifolia*) se recolectó en una fábrica artesanal ubicada en San José Chalmita, Estado de México. El cartón reciclado se recuperó de las actividades administrativas del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco. El bagazo de agave recolectado se lavó con agua corriente para retirar impurezas, después el residuo se colocó en una superficie plana para secarse a una temperatura ambiente de aproximadamente 21 ºC durante 24 h continuas. El material seco se trituró en un molino de cuchillas de alta velocidad (High-Speed Multi-Functional Crusher, China) con una velocidad de operación de 25,000 rpm y se tamizó con un tamiz de acero inoxidable Tyler malla 40. Para la obtención de la pulpa celulósica se realizó un proceso químico de hidrólisis alcalina con NaOH al 4% (97.5 %, CTR Scientific, México). La mezcla se colocó en un vaso de precipitado de 4 L, el tiempo de hidrólisis fue de 90 min a 75ºC, manteniendo una agitación constante de 360 rpm empleando un agitador digital JOANLAB OS-15S. Al finalizar el proceso químico se realizaron lavados con agua destilada y un equipo de filtración hasta ajustar a un pH 7.

2.2 Preparación de mezclas de pulpa de bagazo de agave (PBA) y cartón reciclado (CR)

Para la formación de la hoja H1 se mezclaron 60 g de pulpa celulósica base húmeda y 400 mL de agua destilada, utilizando un motor de agitación (JOANLAB, OS-15S,China) a 374 rpm durante 20 min. Al finalizar el tiempo se tomaron cinco muestras de 100 mL y se filtraron. La hoja dispuesta en una malla se colocó en una prensa diseñada con impresión 3D durante 24 h a una presión de 3 MPa, la cual fue calculada con la siguientes ecuaciones para la fuerza y la presión respectivamente:

$$F = 2\pi T\eta/L \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Donde:
$T = Torque$
$\eta = Eficiencia\ de\ la\ rosca$
$L = Avance\ de\ la\ rosca$

Para calcular la presión se empleó la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{A} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Donde:
$P = Presión$
$F = Fuerza$
$A = Area\ transversal$

Este proceso de formación de hoja se replicó para todas las mezclas, donde se obtuvieron 3 muestras de cada formulación. En la Tabla 1 se presentan las formulaciones de las hojas y en la Figura 1 se muestra la metodología utilizada para la formación de la H.

Tabla 1. Formulaciones de las hojas estándar (H).

Formulación de hojas de papel	Etiqueta de la hoja
0.16 de CR	H0
Control: 60 g de PBA	H1
60 g de PBA + 6 g CR	H2
60 g de PBA + 5.5 g CR	H3
60 g de PBA + 5 g CR	H4
60 g de PBA + 4 g CR	H5



Figura 1. Hojas estándar formadas con las diferentes formulaciones.

2.3 Ensayos de tensión

Se realizaron 5 probetas por cada muestra. Las probetas para ensayo de tensión fueron dimensionadas de acuerdo con las especificaciones establecidas en la norma ASTM D828. La geometría de las muestras se obtuvo a partir de las hojas estándar (H) y de una muestra de cartón reciclando (H0), realizando el corte mediante una guillotina Westcott TrimAir para garantizar uniformidad dimensional. Los ensayos de tensión se llevaron a cabo utilizando una máquina universal de pruebas WSW-5E de acuerdo a la norma ASTM D828, la velocidad de desplazamiento se disminuyó a 12.7 mm/ min por el ajuste de la longitud de las probetas, los ensayos fueron realizados hasta llegar al punto de fractura (Figura 2). El espesor de cada muestra fue determinado mediante un micrómetro Mitutoyo de alta precisión. Posteriormente, el área de la sección transversal se calculó multiplicando el espesor medido por el ancho nominal de la probeta (25 mm). A partir de los registros de carga obtenidos durante el ensayo y del área transversal calculada, se determinaron los valores de esfuerzo, permitiendo la construcción de las curvas esfuerzo–deformación. Con base en dichas curvas se calcularon las propiedades mecánicas como el módulo de Young, la resiliencia, la tenacidad y el esfuerzo máximo alcanzado por cada muestra.

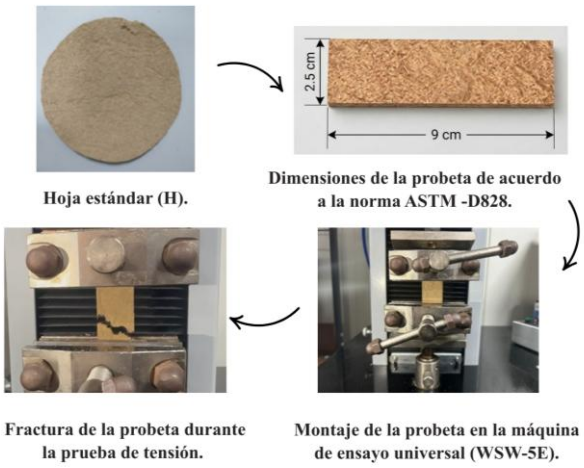


Figura 2. Metodología para obtención de las propiedades mecánicas de las H y H0.

3. Resultados

3.1 Propiedades mecánicas

Como se observa en la Figura 3, la muestra H0 exhibe un límite de fluencia de 4.1 MPa, seguido de una región de plasticidad perfecta comprendida entre deformaciones de 0.005 y 0.018 mm/mm, en la cual el esfuerzo permanece prácticamente constante y alcanza un esfuerzo máximo de 9.47 MPa a una deformación de 0.030 mm/mm.

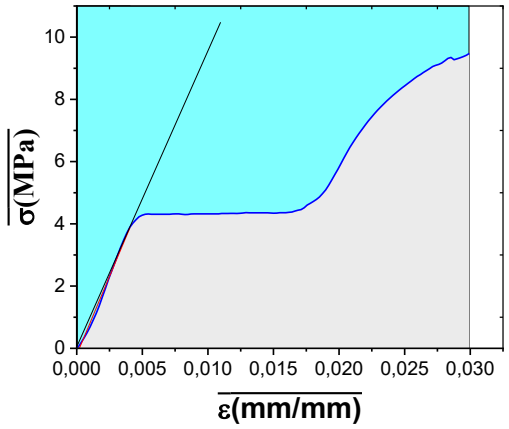


Figura 3. Gráfica esfuerzo deformación de H0.

La Figura 4 presenta las curvas esfuerzo–deformaciones correspondientes a las diferentes hojas estándar (H). En el caso de la muestra H1, no fue posible obtener las curvas mecánicas debido a que las probetas se fracturaban durante su montaje en la máquina universal de ensayos, lo que evidencia una elevada fragilidad estructural.

La muestra H5 exhibió el comportamiento mecánico más limitado, alcanzando un módulo de Young de 0.06 MPa y un esfuerzo máximo de 0.07 MPa, con un porcentaje de 99.32, inferior al registrado para H0.

Asimismo, presentó una deformación máxima de 0.010 mm/mm, equivalente a una reducción del 66.66 % respecto a H0.

La muestra H4 alcanzó un esfuerzo de fluencia de 0.09 MPa, un esfuerzo máximo de 0.16 MPa y una deformación máxima de 0.015 mm/mm, mostrando una mejora respecto a H5, aunque con propiedades mecánicas aun significativamente inferiores a las observadas en H2 y H3 (Tabla 2).

Las muestras H3 y H2 presentaron el punto de fluencia de 0.12 MPa y 0.15 MPa respectivamente. Sin embargo, H3 mostró una mayor pendiente en la región elástica, indicando un incremento en el módulo de Young y, por consiguiente, una mayor rigidez del material (Figura 4c y d). Posteriormente, en la zona plástica H2 desarrolló una mayor capacidad de soportar carga, alcanzando un esfuerzo máximo de 0.21 MPa y una deformación máxima de 0.012 mm/mm, mientras que H3 registró un esfuerzo máximo de 0.19 MPa y una deformación máxima de 0.012 mm/mm.

Las Figura 4a y 4b muestran las hojas H5 y H4 que presentan un punto de fluencia de 0.06 MPa y 0.09 MPa respectivamente, el comportamiento mostrado indica una menor resistencia al esfuerzo máximo y una capacidad de carga más baja con respecto a las hojas H3 y H2, por lo que se consideraron las ultimas hojas las cuales presentaron valores más altos en sus propiedades mecánicas (Tabla 2).

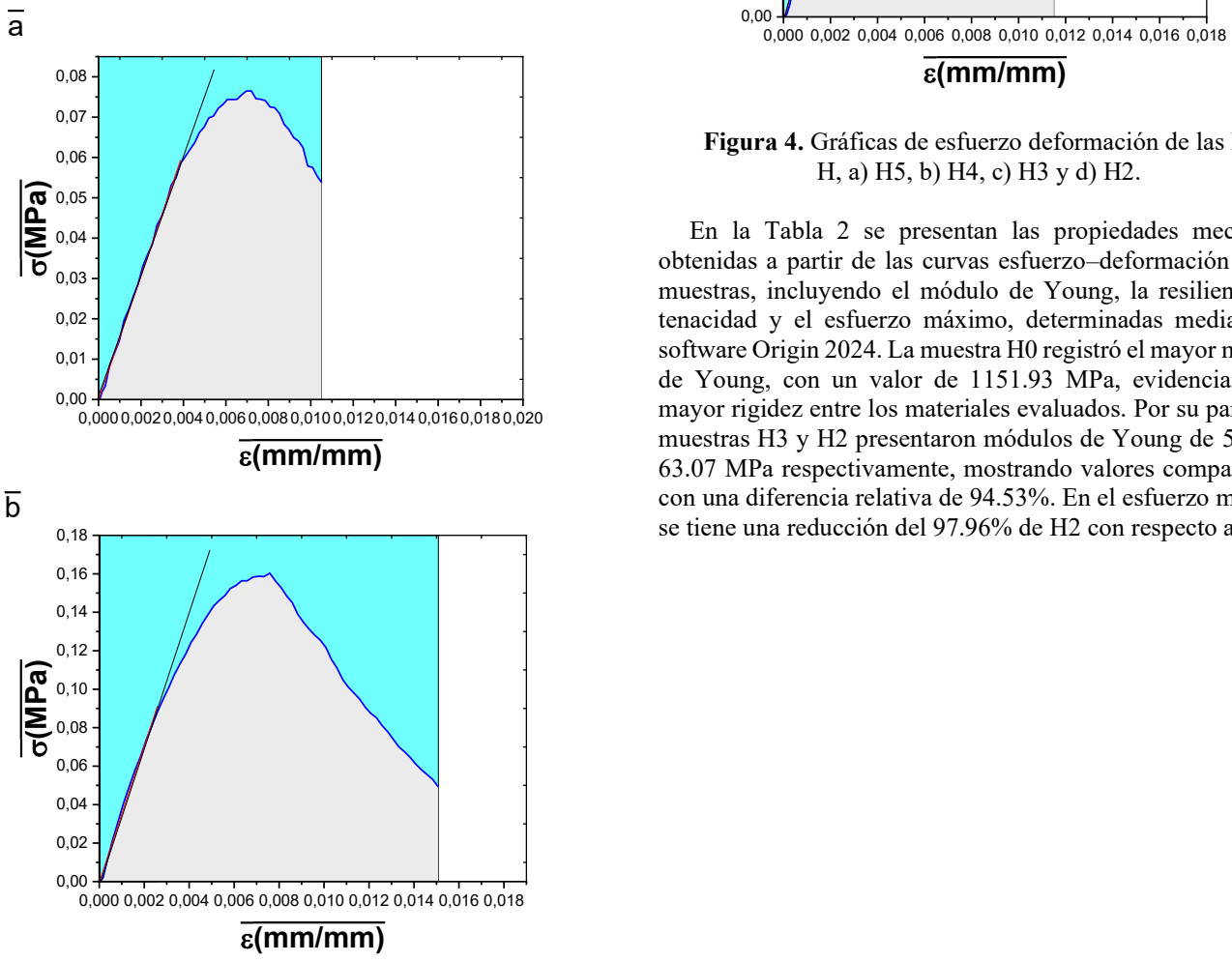


Figura 4. Gráficas de esfuerzo deformación de las hojas H, a) H5, b) H4, c) H3 y d) H2.

En la Tabla 2 se presentan las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las curvas esfuerzo–deformación de las muestras, incluyendo el módulo de Young, la resiliencia, la tenacidad y el esfuerzo máximo, determinadas mediante el software Origin 2024. La muestra H0 registró el mayor módulo de Young, con un valor de 1151.93 MPa, evidenciando la mayor rigidez entre los materiales evaluados. Por su parte, las muestras H3 y H2 presentaron módulos de Young de 57.02 y 63.07 MPa respectivamente, mostrando valores comparables, con una diferencia relativa de 94.53%. En el esfuerzo máximo se tiene una reducción del 97.96% de H2 con respecto a H0.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de tensión de las hojas estándar2.

H PBA/CR	Gramaje Promedio (g)	Espesor Promedio (mm)	Módulo de Young (MPa)	Resiliencia (Mpa)	Tenacidad (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)
H2 $_{60/6}$	4.89 ± 1.08	1.29 ± 0.12	63.07	0.00019	0.00181	0.21
H3 $_{60/5.5}$	4.72 ± 0.74	1.46 ± 0.21	57.02	0.00012	0.00176	0.19
H4 $_{60/5}$	4.50 ± 0.61	1.33 ± 0.15	35.39	0.00011	0.00156	0.16
H5 $_{60/4}$	4.91 ± 1.06	1.29 ± 0.27	15.39	0.00011	0.00050	0.07
H0	0.16 ± 0.01	0.13 ± 0.01	1151.93	0.00710	0.15892	10.33

(Abenghal et al., 2025) mencionan que los papeles de 80 % de filamentos de celulosa y 20 % de pulpa kraft refinada alcanzan mejoras notables en resistencia con un índice de tracción de 87 Nm/g. En el caso del papel de hoja de piña, el mejor desempeño mecánico se logra con fibras 100 % piña, alcanzando un índice de tracción de 6.5 Nm/g y un índice de estallido de 0.84 kPa·m²/g, valores superiores a las mezclas con bagazo o papel reciclado, aunque con menor resistencia a la abrasión que las combinaciones con bagazo (Sibaly y Jeetah, 2017). Por otra parte el papel a partir de pulpa de café muestra un comportamiento comparable al papel comercial para filtros, donde el papel resultante presenta una resistencia a la tracción de 526 N/m, además soporta agua hirviendo sin romperse (Rizkiansyah et al., 2024).

4. Conclusiones

Los ensayos de tensión evidenciaron diferencias en el comportamiento mecánico de las hojas estándar evaluadas. La muestra H1 presentó una fragilidad extrema, impidiendo la determinación de sus propiedades mecánicas. Por su parte, H4 y H5 exhibieron los menores valores de esfuerzo máximo, resiliencia y tenacidad, indicando una baja capacidad de absorción de energía y una alta susceptibilidad a la fractura. Las muestras H2 y H3 mostraron un desempeño mecánico superior, con esfuerzos de fluencia de 0.12 y 0.15 MPa respectivamente.

Los resultados identifican a H2 como la muestra con el mejor desempeño mecánico global, al combinar elevada resistencia a la tracción, capacidad de deformación y absorción de energía. Lo que indica que la cantidad de cartón mezclada con PBA mejora las propiedades mecánicas de las hojas.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores no utilizaron IA para la corrección gramatical y mejora de redacción. Los autores asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Agradecimientos

Al programa Becas COMECYT Modalidad Posgrado, Estudios de Maestría por la beca con folio 2024BPC2-M0357. Los autores expresan su agradecimiento al Laboratorio de Biomecánica de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la ESIME Zacatenco por el apoyo brindado en la realización de los ensayos de tensión.

Referencias

Abenghal, L., Bley, J., Tolnai, B., Njamen, G., & Chabot, B. (2025). Development of a new sustainable packaging paper based on cellulose filaments and refined kraft pulp. Future Foods, 11, 100540. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100540

Belyamani, I., Alameri, A., & Soghman, J. (2026). Sustainable paper production from date palm and reed leaves through the valorization of agricultural waste products. *Next Materials, 10*, 101392. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101392

Bezza, F. A., Tichapondwa, S. M., Brink, H. G., Daramola, M. O., Chirwa, E. M. N., & Iwarere, S. A. (2026). Sustainable valorization of lignocellulosic biomass for integrated biofuel and biomaterials production within the circular economy framework: Recent advances in pretreatment processes—A comprehensive review. Biomass and Bioenergy, 215, 109534. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109534

Consejo Regulador Mezcal (2021) Informe estadístico 2021; Consejo Regulador Mezcal; Oaxaca, México.

Gómez-Guerrero, A. V., Valdez-Vazquez, I., Caballero-Caballero, M., Chiñas-Castillo, F., Alavéz-Ramírez, R., & Montes-Bernabé, J. L. (2019). Co-digestion of Agave angustifolia Haw bagasse and vinasses for biogas production from mezcal industry. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 18(3), 1073–1083. https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n3/Gomez

Kidanu, B. T., Tizazu, B. Z., Sibhatu, A. K., & Gemechu, F. G. (2026). Comparative experimental investigations of alkaline reagents on the delignification efficiency and cellulose recovery from Ethiopian coffee pulp waste. Industrial Crops and Products, 245, 123263. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2026.123263

Koskela, S., Dahlbo, H., Judl, J., Korhonen, M.-R., & Niininen, M. (2014). Reusable plastic crate or recyclable cardboard box? A comparison of two delivery systems. *Journal of Cleaner Production, 69,* 83–90. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.036

Rizkiansyah, R. R., Mardiyati, Y., Hariyanto, A., Steven, S., & Dirgantara, T. (2024). Non-Wood paper from coffee pulp waste: How its performance as coffee filter. Cleaner Materials, 12, 100241. https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100241

Semple, K. E., Zhou, C., Rojas, O. J., Nkeuwa, W. N., & Dai, C. (2022). Moulded pulp fibers for disposable food packaging: A state-of-the-art review. Food Packaging and Shelf Life, 33, 100908. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100908

Sibaly, S., & Jeetah, P. (2017). Production of paper from pineapple leaves. Journal Of Environmental Chemical Engineering, 5(6), 5978-5986. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.026