

OBTENCIÓN DE CELULOSA A PARTIR DE RESIDUOS DEL ENDOCARPO DE VAINA DE MEZQUITE (*Prosopis laevigata*)

OBTAINING CELLULOSE FROM RESIDUES OF THE ENDOCARP OF MESQUITE POD (*Prosopis laevigata*)

Lucio-López, Marisol^{1*}, Chapa-Hernández, Diana Fátima¹, Pérez-Cadena, Rogelio^{1*}, Téllez-Jurado, Alejandro², Rangel-Jiménez, Solei¹, González-Escamilla, Elizabeth¹

¹Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, ExHacienda de San Javier, C.P. 43860, Tolcayuca, Hidalgo, México.

²Laboratorio de AgroBiotecnología, Universidad Politécnica de Pachuca, Carretera Pachuca-Cd. Sahagún, km 20, ExHacienda de Santa Bárbara, C.P. 43830, Zempoala, Hidalgo, México, * 223111226@upmh.edu.mx, roperez@upmh.edu.mx.

RESUMEN. Mezquite es el nombre común de varias especies de árboles o arbustos pertenecientes al género *Prosopis*. Esta planta se ha convertido en una valiosa fuente de recursos naturales, destacando entre sus componentes la leguminosa del mezquite. Esta vaina se caracteriza por su riqueza en proteínas y su poder endulzante. Como residuo, el endocarpo de la vaina de mezquite está compuesto principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina pudiendo ser aprovechados para la obtención de diversos compuestos de valor. En el presente trabajo se evaluó el potencial del endocarpo de vaina de mezquite como materia prima para la obtención de celulosa. Una muestra de endocarpo de mezquite fue molido y a partir de la fracción con tamaño de partícula #30, se determinó su composición proximal. Para la obtención de celulosa se realizó un diseño experimental con un tratamiento secuencial de NaOH al 5, 10 y 15% p/v seguido de un tratamiento con H₂SO₄ al 5, 10 y 15 %v/v y un blanqueo con NaClO al 0.5, 1 y 3% v/v, en cada ensayo se determinó el rendimiento de celulosa, seguido por un análisis FTIR. En el análisis proximal, se determinó un contenido de celulosa de 63.95% p/p, mientras que la hemicelulosa y lignina obtenida fue de 16.96% p/p y 17.48% p/p respectivamente. A partir del diseño experimental, las pruebas 6, 7, 11 y 15 mostraron porcentajes de celulosa similares al obtenido en el análisis proximal con un 63, 68, 69 y 66% p/p respectivamente. En estos experimentos se observó que el blanqueo de la celulosa con 3.0%v/v de NaClO mostró resultados similares al obtenido por el análisis proximal. Adicionalmente se observó que el 10% p/v de NaOH en combinación con 15% v/v de H₂SO₄ fueron las condiciones para la obtención de celulosa similares al 63.95% p/p obtenido del análisis proximal. El análisis por FTIR mostró alargamientos en las señales a 1028 cm⁻¹, 3339 cm⁻¹ y 2922 cm⁻¹, determinando la presencia y estiramiento de enlaces de celulosa característicos en comparación con la muestra no tratada. Con la determinación en la composición de la biomasa lignocelulósica, el residuo de endocarpo de vaina de mezquite presentó características importantes para ser usado como materia prima sostenible para la obtención de celulosa.

Palabras clave: endocarpo, papel, celulosa

ABSTRACT. Mesquite is the common name for several species of trees or shrubs belonging to the genus *Prosopis*. This plant has become a valuable source of natural resources, with mesquite legumes being one of its components. This pod is characterized by its richness in proteins and its sweetening power. As a residue, the endocarp of the mesquite pod is composed mainly of cellulose, hemicellulose and lignin, which can be used to obtain various valuable compounds. In this work, the potential of mesquite pod endocarp as a raw material for obtaining cellulose and paper was evaluated. A sample of mesquite endocarp was ground and its proximal composition was determined from the fraction with particle size #30. To obtain cellulose, an experimental design was carried out with a sequential treatment of NaOH at 5, 10, and 15% w/v followed by treatment with H₂SO₄ at 5, 10 and 15% v/v and bleaching with NaClO at 0.5, 1, and 3% v/v, determining the cellulose yield, followed by an FTIR analysis. The proximate analysis determined a cellulose content of 63.95% w/w, while the hemicellulose and lignin obtained were 16.96% w/w and 17.48% w/w respectively. Based on the experimental design, tests 6, 7, 11, and 15 showed cellulose percentages similar to those obtained in the proximal analysis with 63, 68, 69, and 66% w/w respectively. In these experiments, it was observed that bleaching of cellulose with 3.0%v/v NaClO showed results similar to those obtained by the proximal analysis. Additionally, it was observed that 10% w/v NaOH in combination with 1.5% v/v H₂SO₄ were the conditions for obtaining cellulose similar to the 63.95% w/w obtained from the proximal analysis. The FTIR analysis showed elongations in the signals at 1028 cm⁻¹, 3339 cm⁻¹ and 2922 cm⁻¹, determining the presence and stretching of characteristic cellulose bonds compared to the untreated sample. With the determination of the composition of the lignocellulosic biomass, the mesquite pod endocarp residue presented important characteristics that can be used as a sustainable raw material for obtaining cellulose.

Keywords: endocarpo, paper, pulp

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria de la pulpa y el papel es de las más importantes del mundo, con una producción de alrededor de 400 millones de toneladas entre papel y cartón¹. Estos ocupan el 31% del mercado global de envases y son los más utilizados para el envasado de alimentos, el transporte y almacenamiento².

Para la obtención de la pasta de celulosa durante el proceso de obtención de papel se utilizan dos métodos; en el método de Kraft se utiliza principalmente NaOH y sulfuro de sodio como digestores a presión para degradar la lignina al mismo tiempo que disminuye la degradación de la celulosa, mientras que en el método alcalino se utilizan reactivos de alta pureza³.

Como parte de la estructura de la biomasa lignocelulósica, el papel y los residuos de la industria del papel; tienen como principal componente, fibras de celulosa, hemicelulosa y lignina en cantidades variadas, además de carbonato de calcio y algo de tinta generada a partir del mecanismo de despulpado o del proceso de reciclaje⁴. Dependiendo del tipo o fuente de obtención del papel, el componente principal del papel es la celulosa, un homopolisacárido compuesto de β -D-glucosa⁵. Anualmente la capacidad biosintética de producción de celulosa se estima de entre 10^{11} a 10^{12} toneladas, lo que hace que este biopolímero natural sea uno de los más abundantes⁶.

La presencia de celulosa en los residuos de papel y el papel le confieren propiedades de formación de fibras debido a la presencia de fibras rectas, largas y paralelas. Por otro lado, las hemicelulosas son responsables de la hidratación de la pulpa y el desarrollo de la unión durante el proceso de batido. Por otro lado, la lignina es un componente de unión natural de las células de la madera sin capacidad para formar fibras².

El mezquite es el nombre común de varias especies de árboles o arbustos pertenecientes al género *Prosopis*⁷. Se han identificado 44 especies pertenecientes a este género, siendo 42 de ellas localizadas en el continente americano⁸. En México

la distribución del mezquite abarca más de 3.5 millones de hectáreas y engloba una amplia variedad de especies autóctonas⁹.

Actualmente, el mezquite se ha convertido en una valiosa fuente de recursos, ofreciendo una amplia gama de beneficios aprovechados por diversas comunidades. Destacando entre sus componentes, la leguminosa del mezquite¹⁰. El contenido promedio de celulosa es de 13.5 a 21.8%, mientras que el contenido de hemicelulosa es del 6.4 a 12.1 % y el de lignina de 5.6 a 13.9%; además de que la digestibilidad in vitro de la materia seca se ha reportado de 39.8 a 63.2 %¹¹. Esta legumbre se ha convertido en el centro de atención debido a su capacidad para producir una harina única, caracterizada por su riqueza en proteínas y un notable poder endulzante¹².

El pericarpio del fruto de *P. laevigata*, tiene tres partes principales: el epicarpo, mesocarpo y el endocarpo¹³. El epicarpo es la capa exterior de la vaina y puede tener tonos amarillos, pajizos o pardo-rojizos, a veces con toques morados. Tiene una apariencia parecida al papel, con una superficie rugosa e irregular¹⁴.

El mesocarpo es la parte más voluminosa del fruto el cual es caroso, fibroso o azucarado, presenta características comestibles y nutritivas, en determinadas especies es de color amarillo con un agradable aroma dulce¹⁵. Se encuentra unido al endocarpo y al epicarpo, lo que dificulta su extracción de los frutos¹⁴.

El endocarpo, es la estructura interna del fruto, la cual cubre a la semilla¹⁶, cerrada e indehiscente, y puede variar en grosor directamente relacionado con las dimensiones de las semillas¹⁵. Tiene una apariencia sólida y fibrosa, dividiéndose en segmentos o septos cerrados entre las semillas¹⁴. En el presente trabajo se evaluó el potencial del endocarpo de vaina de mezquite como materia prima para la obtención de celulosa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Pretratamiento de materia prima

La cáscara de la semilla de vaina de mezquite (endocarpo) fue previamente tratada para la eliminación de los azúcares residuales. Posteriormente fue secada a 70°C en un horno durante 24 h para ser triturada en un molino comercial, posteriormente fue tamizada y se obtuvo la fracción con una malla #30. La fracción obtenida fue lavada y secada para eliminar restos con tamaño de partícula más pequeño. La fracción final fue almacenada en bolsas de plástico y mantenidas en un espacio seco hasta su uso.

Análisis proximal de la muestra

Para la determinación en la composición del endocarpo, 1 g de la muestra triturada se llevó a 550 °C durante 1.5 h en una mufla. La muestra se colocó en un secador y se llevó a peso constante. El contenido de cenizas se determinó mediante la ecuación (1).

$$\% \text{ de cenizas} = \frac{\text{peso de cenizas}}{\text{peso inicial}} * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Para la determinación de la holocelulosa, por triplicado se colocaron 2g de la muestra libre de extraíbles con 150 ml de agua, agregando 0.2 ml de ácido acético y 1 g de clorito de sodio, se colocó en baño maría a 70°C con agitación constante, después de 30 minutos se agregó 0.22 ml de ácido acético y 1 g de clorito de sodio, esto se realizó 3 veces más cada 30 minutos. Al finalizar se filtró, se lavó con agua, y finalmente se colocó en el horno a 105°C durante 24 horas, hasta obtener el peso seco. El porcentaje de holocelulosa se determinó mediante la ecuación 2:

$$\% \text{ Holocelulosa} = \frac{(\text{Peso de holocelulosa})}{(\text{Peso de muestra})} * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

La cantidad de celulosa se determinó a partir de 1 g de la holocelulosa. Se le adicionó 10 ml de NaOH al 17.5% p/v y se mantuvo en agitación 5 min. Se adicionó 5 ml de NaOH al 17.5 %, se agito y se dejó reposar 5 min más. Este último paso se repitió hasta alcanzar un volumen de 15 ml, posteriormente se dejó reposando 30 min a 20°C. A la muestra se le agregó 30 ml de agua con agitación constante y se

dejó reposar una hora. Se filtró y se lavó con 30 ml de agua seguido de un lavado con una solución de ácido acético al 10% v/v. Al finalizar se dejó secar en un horno a 105°C durante 24 h. Para calcular el porcentaje de celulosa se utilizó la ecuación (3) ¹⁷.

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{\text{Peso de celulosa}}{\text{Peso de muestra}} * 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Para calcular el porcentaje de hemicelulosa presentes en la muestra, se determinó por diferencia de porcentajes en la cantidad de holocelulosa y celulosa.

Para la determinación de la lignina, a 1 g de muestra libre de extraíbles se le agrego 15 ml de H₂SO₄ al 72% v/v a 13°C, posteriormente se agitó y se dejó reposar 2 h. Posteriormente se le agregó 560 ml de agua destilada para llevar la concentración al 3% v/v. Se colocó a ebullición durante 4 h manteniendo el volumen constante. Se dejó enfriar y se filtró. La muestra se llevó a peso constante y se determinó el porcentaje de lignina¹⁸ (ecuación 4).

$$\% \text{ Lignina} = \frac{\text{Peso de lignina}}{\text{Peso de muestra}} * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Obtención de la celulosa

Para la obtención de celulosa 2 g de la muestra por triplicado se sometió a un tratamiento secuencial de extracción alcalina con una solución de NaOH al 5% (-1), 10% (0) y 15% (+1) p/v a 70°C con agitación constante durante 2 h para eliminar resinas ceras y pectinas. Las muestras se lavaron hasta pH neutro. Posteriormente, se realizó una hidrólisis ácida con H₂SO₄ al 5% (-1), 10% (0) y 15% (+1) v/v a 80°C durante 1h seguido de un lavado hasta pH 7. Para el blanqueo, se realizó una cloración con una solución de NaClO al 0.5% (-1), 1% (0) y 3% (+1) v/v en agitación continua durante 2 h en un baño de agua a 80°C, seguido por lavado con agua destilada¹⁷. Las muestras se secaron a peso constante y se determinó el rendimiento de fibra de celulosa con respecto a la muestra de endocarpo utilizada. El efecto de las variables evaluadas en el rendimiento de celulosa fue analizado usando un diseño box Benkhen en el software Desing Expert 13.

Análisis de FTIR de celulosa

Las muestras sólidas obtenidas a partir de los diferentes tratamientos fueron analizadas mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en un equipo Cary 630 FTIR (Agilent Technologies) en un rango de longitudes de onda de 400 nm a 4 000 nm. Para todos los espectros se usó una acumulación de 100 barridos con una resolución de 16 cm^{-1} ¹⁹.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la muestra de cáscara de la vaina de mezquite

Inicialmente se determinó el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de la muestra de endocarpo utilizada. Los resultados mostraron que el contenido de celulosa fue de 63.95% en comparación con la hemicelulosa y la lignina los cuales fueron de 16.96% y 17.48%, respectivamente (tabla 1).

Tabla 1. Composición proximal del endocarpo de la vaina de mezquite.

| Componente | % p/p |
|--------------|----------------------|
| Holocelulosa | 80.91 (± 1.09) |
| Celulosa | 63.95 (± 0.71) |
| Hemicelulosa | 16.96 (± 1.76) |
| Lignina | 17.48 (± 2.00) |
| Ceniza | 2.16 (± 0.11) |

El contenido de celulosa y hemicelulosa presentes en el sustrato estudiado mostró tener potencial para ser utilizado como materia prima para la obtención de celulosa. En un estudio realizado con residuos de bagazo de caña se reportó un 42% celulosa, 24% lignina, y 26% hemicelulosa ²⁰. Mientras que en residuos de pasto se ha reportado hasta un 43% de celulosa y un 28% de lignina¹⁷. Los resultados obtenidos, mostraron hasta un 32% más de celulosa con respecto a los sustratos comparados.

Extracción de celulosa del endocarpo de vaina de mezquite

Para la obtención de la celulosa se empleó una muestra de endocarpo con un tamaño de malla #30. A partir del cual se evaluaron los efectos de H_2SO_4 , NaClO y NaOH como se muestra en la tabla 2.

Los resultados obtenidos fueron comparados con el valor de la celulosa obtenida del análisis proximal,

observando que las corridas 6, 7, 11 y 15 presentaron porcentajes de celulosa similares con un 63, 68, 69 y 66%, respectivamente. En estos experimentos se observó que el blanqueo de la celulosa con 3.0% de NaClO mostraron resultados similares al obtenido por el análisis proximal.

Tabla 2. Efecto de los factores estudiados sobre la obtención de la celulosa en la cáscara de semilla de vaina de mezquite.

| No. | NaOH (p/v) | H_2SO_4 (v/v) | NaClO (v/v) | Y*100 |
|-----|------------|-------------------------------|-------------|-----------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0.74 \pm 0.01 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0.71 \pm 0.02 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0.72 \pm 0.01 |
| 4 | 0 | -1 | -1 | 0.76 \pm 0.01 |
| 5 | 0 | 1 | -1 | 0.72 \pm 0.13 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0.63 \pm 0.00 |
| 7 | 0 | -1 | 1 | 0.68 \pm 0.01 |
| 8 | -1 | 0 | -1 | 0.79 \pm 0.00 |
| 9 | -1 | -1 | 0 | 0.79 \pm 0.00 |
| 10 | -1 | 1 | 0 | 0.74 \pm 0.02 |
| 11 | -1 | 0 | 1 | 0.69 \pm 0.01 |
| 12 | 1 | 0 | -1 | 0.75 \pm 0.01 |
| 13 | 1 | 1 | 0 | 0.76 \pm 0.00 |
| 14 | 1 | -1 | 0 | 0.76 \pm 0.01 |
| 15 | 1 | 0 | 1 | 0.66 \pm 0.01 |

Adicionalmente se observó que el 10% p/v de NaOH en combinación con 15% v/v de H_2SO_4 fueron las condiciones para la obtención de celulosa similar al 63.95% obtenido del análisis proximal (figura 1).

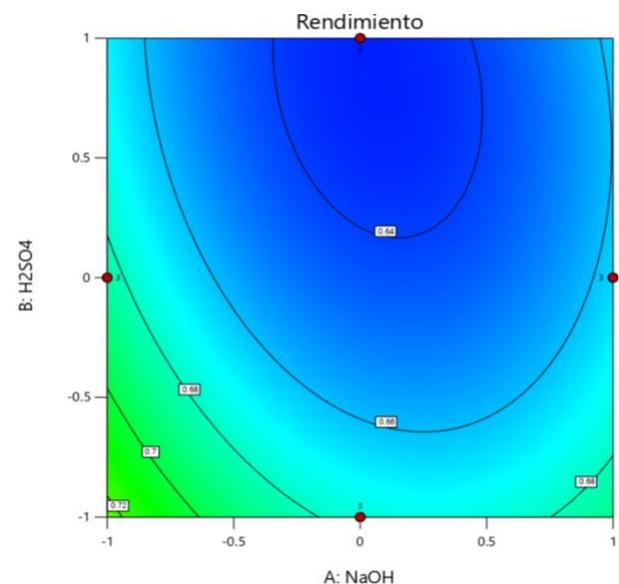


Figura 1. Efecto del NaOH y H_2SO_4 sobre el rendimiento en la obtención de celulosa.

Considerando los objetivos teóricos de cada proceso, la eliminación de la hemicelulosa en el tratamiento con H_2SO_4 y la lignina en el tratamiento con NaOH , el tratamiento alcalino alcanzaría un rendimiento másico mucho menor que el tratamiento ácido, ya que la lignina tiene una mayor masa molecular y está presente en mayor cantidad en la materia prima en comparación a la hemicelulosa ²¹. Este efecto fue observado en el tratamiento 6, por lo tanto, los tratamientos con rendimientos superiores al 70% indicaron una solubilización incompleta de la lignina y hemicelulosa de las muestras de endocarpo analizadas.

Por otro lado, la calidad en el blanqueo de la celulosa del endocarpo de vaina de mezquite se observó en la celulosa obtenida, la cual presentó una coloración blanca con un contenido mínimo de componentes no transformados en comparación a los demás tratamientos realizados (tabla 3).

Al respecto, se ha descrito que el blanqueo químico se lleva a cabo para la eliminación de compuestos cromóforos para aumentar el brillo de la celulosa. Los compuestos cromóforos están constituidos básicamente por fragmentos de lignina, los cuales pueden ser eliminados por el proceso de blanqueo, contribuyendo a una disminución en la pérdida de masa ²¹.

Tabla 3. Comparación entre la celulosa obtenida para los tratamientos con 3% de NaClO .

| Tratamiento | | | |
|---|---|---|---|
| 10%NaOH, 15% H_2SO_4 | 10%NaOH, 5% H_2SO_4 | 5%NaOH, 10% H_2SO_4 | 15%NaOH, 10% H_2SO_4 |
|  |  |  |  |

Análisis de FTIR de las muestras de celulosa

Las muestras se analizaron por FTIR para complementar el proceso de selección de las condiciones mínimas para la obtención de celulosa a partir del endocarpo de vaina de mezquite. Del análisis se encontraron señales características de la

celulosa más marcados comparados con la muestra sin tratamiento (figura 2). Se observó un alargamiento de un pico en 1028 cm^{-1} , el cual correspondió a una señal de enlaces $\text{O}=\text{C}-\text{O}-\text{CH}_3$, característicos de la hibridación sp^2 del acetato de celulosa ²¹. Además, el alargamiento del pico a 1054 cm^{-1} se asocia con cambios en la estructura cristalina y conformacional de la celulosa²². Esta señal evidencio una diferencia entre la muestra sin tratar y las muestras tratadas. De manera complementaria, no se observó un pico a una longitud de onda de 1738 cm^{-1} el cual corresponde a enlace $\text{C}=\text{O}$ de presentes en hemicelulosa y lignina, ya que estas fueron eliminadas con los tratamientos realizados a la muestra ²⁰.

Por otro lado, los alargamientos de los picos observados a 1423 cm^{-1} y 1315 cm^{-1} se atribuyen a los grupos $-\text{CH}_2$ y $-\text{OH}$, previamente reportados ²³. Asimismo, el pico a 1599 cm^{-1} representa carboximetil éter, ya que los alargamientos entre 1610 cm^{-1} y 1420 cm^{-1} indican la presencia de este grupo²⁰.

Adicionalmente, se observaron alargamientos en los picos a 3339 cm^{-1} y 2922 cm^{-1} , los cuales representan el estiramiento de los enlaces $\text{O}-\text{H}$ y $\text{C}-\text{H}$, respectivamente. Esta observación sugiere la presencia de moléculas de celulosa²¹.

Del análisis por FTIR se observó que los tratamientos con un 5 y 10% p/v de NaOH mostraron las señales características más marcadas en comparación a la muestra no tratada (figura 2). Por otro lado se observó que en el tratamiento con un 15% p/v de NaOH , la señal fue de menor intensidad, sugiriendo que los valores máximos del tratamiento ácido provocaron una hidrólisis parcial solubilizando una porción de la celulosa obtenida ²¹. Al respecto, se ha reportado que el NaOH rompe los enlaces éster y glicosídicos que mantienen la lignina unida a la celulosa y hemicelulosa ²⁴. Esto reduce la cantidad de lignina, exponiendo las fibras de celulosa y hemicelulosa, haciéndolas más accesibles para los tratamientos químicos o enzimáticos subsecuentes ²⁵.

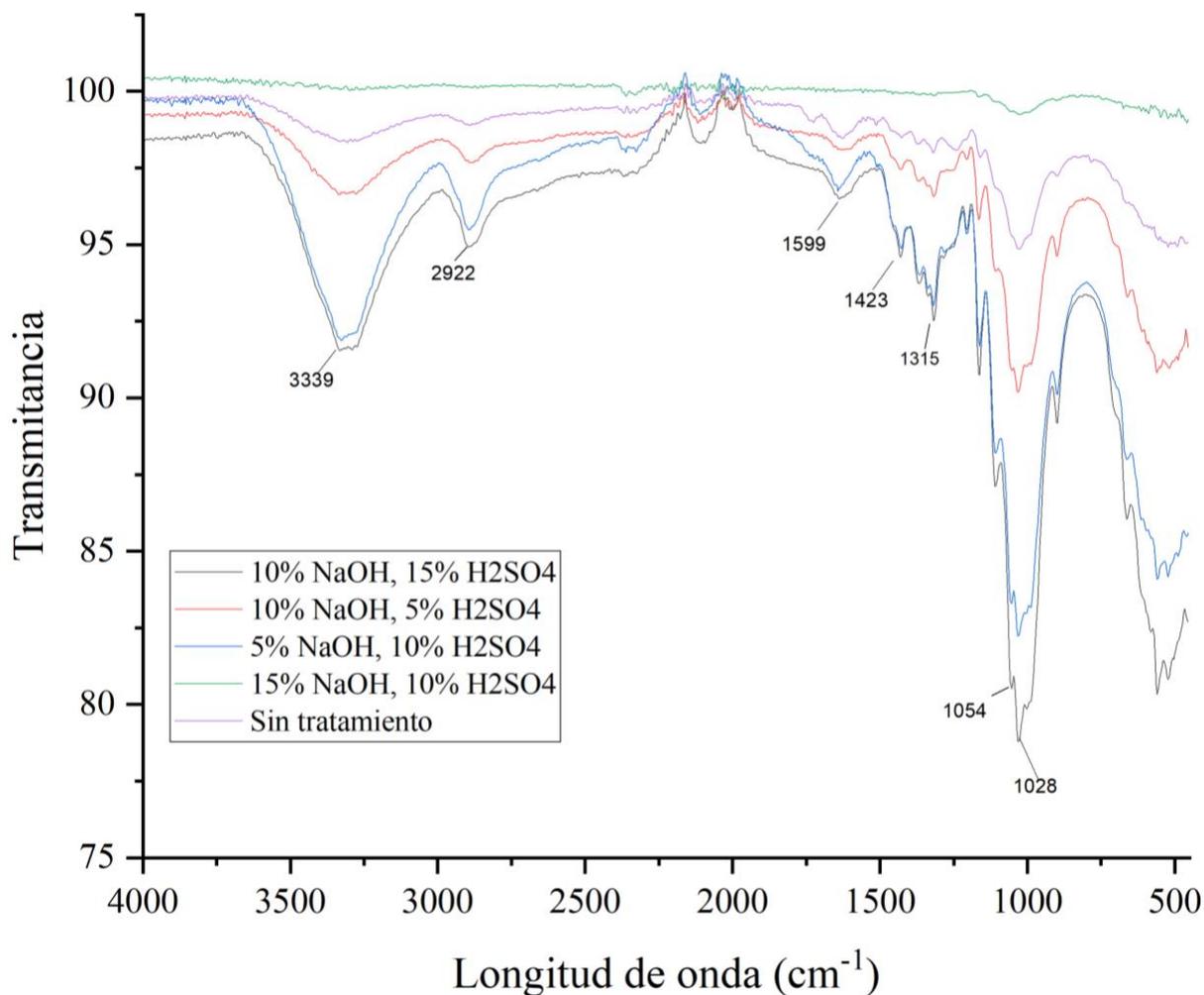


Figura 2. FTIR de cáscara de semilla de vaina de mezquite en la obtención de celulosa

CONCLUSIÓN

El endocarpo de la vaina de mezquite presentó un 63.95% p/p de celulosa con respecto a la muestra inicial y un 17.48% p/p de lignina, haciendo de esta materia prima una fuente con posibilidad de obtener celulosa para la elaboración de papel. Se encontró que con un tratamiento a un 10% p/v de NaOH, y un 1.5% v/v de H₂SO₄ se obtuvo un rendimiento similar al obtenido en el análisis proximal, verificando señales características a través de análisis FTIR.

REFERENCIAS

1. Branco, R., Serafim, L. & Xavier, A. Second Generation Bioethanol Production: On the Use of Pulp and Paper Industry Wastes as Feedstock. *Fermentation* **5**, 4 (2018).
2. Deshwal, G. K., Panjagari, N. R. & Alam, T. An overview of paper and paper based food packaging materials: health safety and environmental concerns. *Journal of Food Science and Technology* vol. 56 (Springer India, 2019).
3. García, Y. *et al.* Métodos para extraer celulosa de la paja de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Agroproductividad* **10**, 54–59 (2017).
4. Al-Azkawi, A., Elliston, A., Al-Bahry, S. & Sivakumar, N. Waste paper to bioethanol: Current and future prospective. *Biofuels, Bioprod. Biorefining* **13**, 1106–1118 (2019).
5. Vynios, D. H. *et al.* Enzymatic production of glucose from waste paper. *BioResources* **4**, 509–521 (2009).
6. Kukrety, A., Singh, R. K., Singh, P. & Ray, S. S. Comprehension on the Synthesis of Carboxymethylcellulose (CMC) Utilizing Various Cellulose Rich Waste Biomass Resources. *Waste and Biomass Valorization* **9**, 1587–1595 (2018).
7. Salas-Valdez, R. *et al.* Plantas del semidesierto de Coahuila: un panorama general Semidesert plants of Coahuila: an overview. 1–24 (2024).
8. Barros Asenjo, S. El género *Prosopis* valioso recurso forestal de las zonas áridas y semiáridas de América, Asia y Africa. *Cienc. Investig. For.* **16**, 91–127 (2010).

9. Rodríguez Saucedo, E. N. *et al.* Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) en México. *Ra Ximhai* 173–194 (2014) doi:10.35197/rx.10.01.e.2014.13.er.
10. López-franco, Y., Goycoolea, F., Valdez, M. & Calderón, A. Goma de mezquite: Una Alternativa De Uso Industrial. *Interciencia* **31**, 183–189 (2006).
11. Esqueda Coronado, M. H., Chaves Silva, A. H. & Gutierrez Aldrete, J. L. Contenido, fluctuación y valor nutricional del mezquite (*Prosopis glandulosa*) en la dieta de bovinos durante la época de sequía. *Técnica Pecu. en México* **25**, 309–314 (1987).
12. Luna Castañón, R. Variabilidad morfológica y genética del mezquite *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) en el estado de Aguascalientes. vol. NA (2014).
13. Sandoval Torres, S., Lopez Cravioto, D., Rodriguez Ramirez, J. & Aquino Gonzales, L. V. Analisis de un proceso de secado de vainas de mezquite (*Prosopis laevigata* Humb & Bonpl. ex Willd.) a condiciones constantes. *Acad. Mex. Investig. y Docencia en Ing. Quim. A.C.* 8–13 (2017).
14. Azpeitia, L. G., Labrada-Delgado, G. J., Montalvo-González, E. & Loza-Cornejo, S. Morphometric and anatomical characters of fruits and seeds of a population of *Prosopis laevigata* (Fabaceae) in Lagos de Moreno, Jalisco, Mexico. *Acta Bot. Mex.* (2022) doi:10.21829/ABM129.2022.2057.
15. Mom, M. P. Caracterización estructural y propiedades funcionales de las harinas de los frutos de optimizar la calidad del producto. (‘Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. <http://digital.bl.fcen.uba.ar/>, 2012).
16. Peña-Avelino, L. *et al.* Chemical composition and in vitro degradation of red and white mesquite (*Prosopis laevigata*) pods. *S. Afr. J. Anim. Sci.* **44**, 298 (2014).
17. Guerrero, Y. Extracción de la celulosa a partir de los residuos de pasto común (*Festuca arundinacea*) para la elaboración de acetato de celulosa. *Tesis de Grado* (Universidad Politécnica Salesiana, 2021).
18. Toscano Palomar, L. *et al.* Determinación simplificada del contenido de Lignina en paja de trigo por método volumetrico y su caracterización química. *Cienc. y Tecnol.* **1**, 113–124 (2015).
19. Medina-Valtierra, J., Camarillo Martínez, G. & Ramírez-Ortiz, J. Método para monitorear el rendimiento y contenido de metil-ésteres en el biodiesel usando la espectroscopia vibracional IR. *Acta Univ.* **21**, 27–32 (2011).
20. Golbaghi, L., Khamforoush, M. & Hatami, T. Carboxymethyl cellulose production from sugarcane bagasse with steam explosion pulping: Experimental, modeling, and optimization. *Carbohydr. Polym.* **174**, 780–788 (2017).
21. Candido, R. G. & Gonçalves, A. R. Synthesis of cellulose acetate and carboxymethylcellulose from sugarcane straw. *Carbohydr. Polym.* **152**, 679–686 (2016).
22. Ünlü, C. H. Carboxymethylcellulose from recycled newspaper in aqueous medium. *Carbohydr. Polym.* **97**, 159–164 (2013).
23. Pushpamalar, V., Langford, S. J., Ahmad, M. & Lim, Y. Y. Optimization of reaction conditions for preparing carboxymethyl cellulose from sago waste. *Carbohydr. Polym.* **64**, 312–318 (2006).
24. Prinsen, P. *Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial.* (2010).
25. Carlosama, C. Análisis de capacidad ligninolítica de hongos basidiomicetos procedentes de la reserva sabia esperanza para la degradación de bagazo de caña. *Univ. Técnica del Norte. Ecuador* 1–58 (2020).