

Obtención de papel a partir de bagazo de caña para el aprovechamiento de residuos agroindustriales

Granados Suárez Katia¹, Sánchez Fuentes Cinthia Erika^{1*}, Salazar Cano Juan Ramón², Gómora Herrera Diana Rosa³, Santana Cruz Alejandra⁴


¹Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento Ingeniería en Sistemas Ambientales, Wilfrido Massieu s/n U. Adolfo López Mateos, Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México, México.

²Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de Biofísica, Wilfrido Massieu s/n U. Adolfo López Mateos, Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México, México.

³Instituto Mexicano del Petróleo, Laboratorio de Análisis Ambientales, Eje Central Norte Lázaro Cárdenas No. 152, Col. San Bartolo Atepehuacan, CP 07730, Ciudad de México, México.

⁴Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Departamento de Ciencias Básicas, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200, Ciudad de México, México.

*Autor para correspondencia: cesanchez@ipn.mx

ORCID : 0000-0002-5634-7455

Recibido:

28/mayo/2025

Aceptado:

04/noviembre/2023

Palabras clave:

Bagazo de caña,
aprovechamiento,
papel

Keywords:

Sugarcane bagasse,
utilization,
paper

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la extracción de celulosa a partir del bagazo de caña para la elaboración de papel. Durante el proceso de extracción, se estableció la cantidad óptima de hidróxido de sodio (NaOH) y ácido clorhídrico (HCl) mediante tres pruebas realizadas al bagazo. Se evaluó y caracterizó la extracción de celulosa utilizando Espectroscopia Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). A partir de la metodología desarrollada se demuestra la presencia de celulosa.

ABSTRACT

This paper presents the results obtained from the extraction of cellulose from sugarcane bagasse for paper production. During the extraction process, the optimal amount of sodium hydroxide (NaOH) and hydrochloric acid (HCl) was established through three tests carried out on the bagasse. Cellulose extraction was evaluated and characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Thermogravimetric Analysis (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC). From the developed methodology the presence of cellulose is demonstrated.

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 1997, define a la agroindustria, como el conjunto de actividades económicas que favorecen la transformación de los productos procedentes de la agricultura, la ganadería, la pesca y lo forestal, es decir, elaboración de materias primas y productos intermedios derivados del sector agrícola. Una de las grandes problemáticas ambientales de este sector, se genera a partir de la alta demanda de este tipo de productos, provocando así una gran producción de residuos (Mejías et al., 2016).

Un claro ejemplo de esta problemática es en los ingenios azucareros en donde el fruto agroindustrialmente útil para múltiples procesos es el tallo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) con un 75% de agua en su composición total, en el cual se acumula sacarosa en el período de maduración, y que tiene una gran importancia para los ingenios azucareros.

La caña de azúcar mexicana es una gramínea tropical de tallo macizo de 2 m a 5 m de altura, con 5 cm o 6 cm de diámetro, cilíndrico, alargado y sin ramificaciones, dividido en nudos y entrenudos. Las hojas llegan a alcanzar de 2 m a 4 m de longitud. En su parte superior está la panoja que mide unos 30 cm de largo (SAGARPA, 2017).

Para extraer la sacarosa en los ingenios azucareros la caña es prensada. Esto produce una gran cantidad de residuo que consiste en una mezcla de fibras, vasos y médula denominado bagazo integral (Aguilar, 2011; Boopathy, 2004).

El bagazo de caña generado en México son 12,5 millones de toneladas. La composición de materia seca de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) en su estado natural es de 8.4% de cogollo y hojas verdes; 19.7% de hojas secas o paja; y 71.8%, de tallos limpios, es decir, los residuos constituyen alrededor de 28% de su composición, por lo cual puede convertirse en una fuente de biomasa para la elaboración de otros materiales (Flores et al., 2008; León et al., 2013).

El 50 % de la producción del bagazo de caña es usado en los ingenios azucareros como combustible para las calderas (Liu et al., 2004, sin embargo, la mayoría de los ingenios requiere la quema de combustóleo o llantas para alcanzar el poder calorífico necesario para el proceso de combustión, lo que implica liberación de gases contaminantes como el dióxido de carbono [CO₂] (López et al., 2016).

Aunada a esta problemática ambiental, también se encuentra la producción de papel teniendo como efectos ambientales la contaminación atmosférica por generación de compuestos orgánicos volátiles, compuestos sulfurados, partículas, etc., dependiendo del proceso de producción utilizado, además, se generan grandes descargas de aguas residuales, cuya composición depende de la etapa del proceso de producción de papel. También, esta industria genera residuos sólidos en la mayoría de sus procesos; en la preparación de la materia prima se forman residuos de madera y cortezas procedentes del lugar de almacenamiento, en la elaboración de la pasta se producen desechos como fibras, lodos de destintado, cenizas procedentes de la combustión, entre otros (Centro de Actividad Regional para la producción limpia [CAR/PL], 2005).

Debido a la situación presentada anteriormente se han realizado diferentes propuestas para la elaboración de papel aprovechando los residuos agroindustriales. En este caso, la elaboración de papel tiene como materia prima la fibra o bagazo de caña que, por un lado, no agota un nuevo recurso, es decir, no se emplea una materia prima destinada para este fin, y por otro, disminuye la acumulación de este residuo agroindustrial para transformarlo y darle un valor agregado en el mercado (MITRE, 2013).

El bagazo de caña tiene una composición química de 68%-69% de holocelulosa, 20%- 21% de hemicelulosa, 48%-49% de alfa celulosa y 2%- 22% de lignina (Sanjuán et al., 2001) y para que una materia prima tenga potencial para la producción de papel deben tener valores de celulosa por encima de 40% (Klass, 1998), por lo que es viable extraer celulosa de este residuo.

Metodología

Se enlista los materiales y el procedimiento a seguir para la obtención de celulosa y elaboración de papel, cabe mencionar que todo el desarrollo práctico de este proyecto se llevó a cabo en el hogar.

Materiales

- Bagazo de caña procedente del Mercado Jardines de Santa Clara, Ecatepec de Morelos, Edo. Méx. México
- Licuadora marca Core Oster
- Balanza granataria marca Sharper image
- Extractor de jugo marca Hamilton beach
- Horno tostador marca Faberwaver
- Olla de presión marca Ekco
- Reactivos químicos: Hidróxido de sodio (NaOH 89-99%), agua (H₂O 80%), ácido muriático (HCl 25-38%), hipoclorito de sodio (NaOCl 4-6%).

Determinación del peso de los componentes de la caña de azúcar

A partir de 2 kg de caña de azúcar se realizó la cuantificación de la masa correspondiente a las tres partes constitutivas: cáscara, jugo y bagazo de la caña de azúcar. Primero se retiró la cáscara de la caña usando un cuchillo, posteriormente mediante un extractor de jugo se procesó la caña, para obtener el jugo y el bagazo, determinando finalmente la masa de cada parte de la caña de azúcar con ayuda de una báscula granataria de 5 kg. Se ilustra a continuación en la figura 1 la secuencia del proceso.



Figura 1. Diagrama de bloques del proceso para la determinación de los componentes de la caña de azúcar. Fuente: Elaboración propia con base al proceso tradicional de prensado, 2021.

Obtención de celulosa

Se realizó la obtención de celulosa, a partir del bagazo de caña, empleando 4 pasos o tratamientos: se tomaron 50 g de bagazo de caña y se secaron en un horno eléctrico a 80 °C, hasta llegar a peso constante. Antes y después de cada operación unitaria se pesó el material vegetal.

a) Sólidos solubles en H₂O. Se mezclaron 50 g de muestra con agua potable municipal esta mezcla se colocó en una olla exprés durante 1 hora. Posteriormente se filtró y secó el residuo en horno a 75 °C con la función de convección hasta llegar a peso constante (Piguave, 2018).

b) Extracto graso por el método Soxhelt con adaptaciones propias. Se pulverizó la muestra proveniente de la sección anterior con ayuda de una licuadora, posteriormente se realizó un lavado con 500 mL de ácido muriático, durante 4.5 h. Se filtró el sólido y se dejó secar a temperatura ambiente durante dos días.

c) Tratamiento alcalino por el método Kraft con adaptaciones propias. A partir de la muestra anterior se realizó un lavado con 250 mL de NaOH 1 M durante una hora en baño maría con agitación constante. La muestra se filtró y lavó con H₂O común, llevándose a secar en horno convectivo a 75 °C durante 4 a 5 h.

d) Blanqueado. La muestra anterior se mezcló con 200 mL de blanqueador común marca Cloralex, se dejó durante 1 h con 30 min, posteriormente se filtró y se enjuagó con suficiente agua hasta neutralizar.

Se dejó secar a temperatura ambiente durante un día (Sulaimani y Dwivedi, 2017).

El diagrama de bloques de la figura 2 describe de manera puntal el proceso que se siguió para la obtención de celulosa

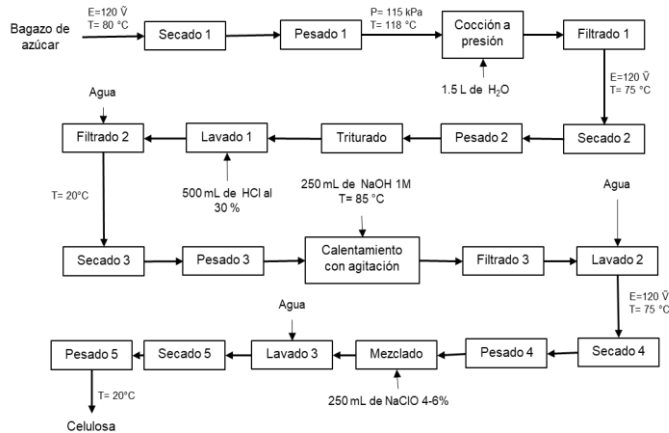


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de la obtención de celulosa. (Elaboración propia con base a diversos autores, 2020).

Elaboración de papel bond a partir de la celulosa extraída

Para la fabricación de papel se utilizó el método tradicional de papel de tina descrito en *Calidad de papel artesanal de fibras no convencionales de cinco especies colombianas* (Benítez et al., 2019) con adaptaciones propias. En una tina lo suficientemente grande se sumergió la celulosa del proceso anterior, una vez hidratada la pulpa se recogió y se filtró hasta que dejara de gotear sin retirarle toda el agua. Se colocó en un paño limpio dándole el grosor y la forma deseada, se prensó para completar la extracción de agua, se colocó en un lugar con sombra. Se dejó secar a temperatura ambiente hasta que el papel se desprendió de la tela. Después de este proceso se volvió a prensar el papel durante 3 días para darle una mayor lisura a su superficie. Este proceso de manera general se ilustra en la figura 3.

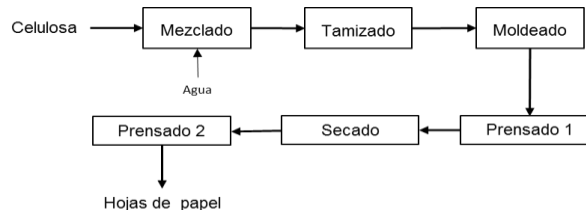


Figura 3. Diagrama de bloques del proceso de elaboración de papel. (Elaboración propia con base al método tradicional de papel de tina, Benítez et al., 2019).

Caracterización por espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)

Para identificar grupos funcionales y comprobar la obtención de celulosa, se analizaron las muestras en cada etapa mediante espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) en un espectrofotómetro Thermo Scientific Nicolet 8700, beamsplitter de KBr, resolución de 4cm^{-1} , detector DTGS TEC; con intervalo de longitud de 4000cm^{-1} a 500cm^{-1} . Los espectros fueron tomados en absorbancia y transmitancia en pastillas al 5% en KBr (bromuro de potasio).

Caracterización mediante análisis termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Los termogramas y las calorimetrías se obtuvieron mediante el equipo Netzch STA 409 PC/PG, empleado para determinar los cambios de masa de tres muestras respecto a la temperatura con una velocidad de calentamiento de $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ en atmosfera de aire. Las muestras se calentaron en un crisol de alúmina hasta los $800\text{ }^\circ\text{C}$, utilizando una purga inicial de aire seco durante 20 min. En la primera muestra se tomó una masa de 19.300 mg, para la segunda se tomaron 19.100 mg, finalmente para la tercera fueron 16.900 mg.

Resultados y discusión




Se efectuaron 3 pruebas para la extracción de celulosa.

Primera prueba: Determinación del peso del bagazo de caña para la evaluación del procedimiento de extracción de celulosa

En la tabla 1 se describe de manera gráfica las características físicas obtenidas del primer procedimiento realizado.

Se determinó que esta prueba no fue la más adecuada para la extracción de la celulosa, puesto que al dejar trozos tan grandes de bagazo de caña, ocasionó que los tiempos de secado fueran muy prolongados; además en el tratamiento con sosa cáustica (NaOH), se complicó el manejo de la celulosa ya que se hizo una pulpa muy fina y poco perceptible al ojo humano, por lo que al momento de moldearla para generar el papel se tuvieron varias dificultades, ocasionando así un papel frágil y poco flexible, otro de los inconvenientes presentados, fue la falta de experiencia para elaborar el papel, lo que provocó que una de las muestras fuera muy gruesa y tardara más tiempo en secar en comparación a las dos primeras hojas, aunado a ello no se logró determinar el peso después del tratamiento ácido.

Tabla 1. Obtención de papel en la primera prueba.

Papel obtenido	Características
	Esta primera muestra solo se sometió a la cocción por presión, la hoja se sintió muy débil, ya que era muy fina la hoja, tuvo un color ligeramente marrón, la textura fue suave, a contraluz se alcanzó a ver ligeros fragmentos a lo largo del papel.
	Este papel es parte de la muestra que pasó por el tratamiento alcalino y el blanqueamiento, la textura fue mucho más suave que la primera muestra, era más flexible, a contraluz no se observaron tantos fragmentos como en la primera o tercera muestra, el color fue un blanco brillante.
	Esta hoja no pasó por el tratamiento alcalino, solamente al blanqueamiento, tuvo una textura mucho más rígida en comparación a las otras dos muestras, fue de un tono blanco brillante, al tacto era bastante suave y al observarse a contraluz se lograban ver varios fragmentos de lo que aún parecía ser bagazo.

Elaboración propia, 2020.

En la tabla 2 se muestra la cantidad extraída en cada tratamiento de los componentes básicos del bagazo de caña.

Tabla 2. Determinación del porcentaje de cada componente separado de la celulosa para la primera prueba a partir de 20 g de bagazo seco.

Constituyentes de la caña de azúcar	Porcentaje de cada componente separado de la celulosa (%) Obtenido en este trabajo	Porcentaje teórico de cada componente (%) Obtenido por otros autores	Referencias
Carbohidratos	35	10-16	Larrahondo,1995
Lípidos	-	20-21	Paz, 2011
Lignina	-	21-22	Paz, 2011

Nota: En cada proceso se guardaron de 2 a 3 gramos.

Elaboración propia con ayuda de diversos autores para la obtención de porcentajes teóricos, 2020.



Segunda prueba: Determinación de la cantidad de hidróxido de sodio (NaOH) en la extracción de la celulosa y optimización del procedimiento

En la tabla 3 se exponen las características obtenidas de cada método empleado en esta segunda prueba realizada.

En esta prueba se determinó que secar la muestra después del tratamiento alcalino y pasarlo por el blanqueamiento el papel no adquiere un color blanco brillante, quedándose en una tonalidad beige claro.

Pasa lo mismo con el tratamiento de HCl, el color que adquiere no es totalmente blanco, además que los tiempos de secado siguen siendo prolongados, pero, si disminuyeron en comparación con la primera prueba, posiblemente esto se deba que no se ejerce la fuerza suficiente al momento de filtrar y presionar en cada etapa.

Tabla 3. Características de los dos métodos empleados en la obtención del papael.

Papel obtenido	Características
	Muestra 1. Pasó por el tratamiento alcalino, la textura de la hoja fue tersa, el tamaño de la hoja era reducido ya que no se presionó lo suficiente por lo que fue ligeramente gruesa en comparación con la segunda muestra, el color del papel era ligeramente beige y no se fracturó con facilidad.
	Muestra 2. Se omitió el tratamiento alcalino, pero aun así la textura de hoja era tersa, era más moldeable en comparación con la primera muestra, además fue delgada en su grosor, a contraluz se alcanzó a apreciar muy pocos fragmentos de bagazo comparándolas con las muestras de la primera prueba, el color del papel fue ligeramente beige.

Elaboración propia, 2021.

En la tabla 4 se muestra el porcentaje obtenido de cada componente separado de la celulosa en cada tratamiento, tomando en cuenta únicamente la muestra que pasó por todos los tratamientos.

Tabla 4. Determinación del porcentaje de cada componente separado de la celulosa para la primera prueba a partir de 50 g de bagazo seco.

Constituyentes de la caña de azúcar	Porcentaje de cada componente separado de la celulosa (%) Obtenido en este trabajo	Porcentaje teórico de cada componente (%) Obtenido por otros autores	Referencias
Carbohidratos	48	10-16	Larrahondo,1995
Lípidos	16.67	20-21	Paz, 2011
Lignina	66.67	21-22	Paz, 2011

Nota: En cada proceso se guardaron de 2 a 3 gramos por proceso. Elaboración propia con ayuda de diversos autores para la obtención de porcentajes teóricos, 2021.

Como se aprecia los porcentajes obtenidos de cada componente separado es mayor al presentado por los autores, esto precisamente puede ser debido a que es un proceso casero en el cual es más difícil la precisión y exactitud para realizar cada tratamiento.

Tercera prueba: Reducción de los reactivos químicos empleados y disminución los tiempos de secado

En esta prueba se determinó que el papel era de una textura firme y tersa, fácil para escribir y borrar, opaco a contraluz, poco flexible, en la figura 4 se puede observar la textura y el color ligeramente beige, ya que, aunque se aplicó el blanqueador, se oxidó con el ambiente tomando una tonalidad crema.



Figura 4. Se realiza un aumento al papel en donde se observa el color ligeramente beige y se alcanza a visualizar la superficie prolija. Elaboración propia, 2021.

En la tabla 5, se muestra el porcentaje obtenido de cada componente separado de la celulosa.

Tabla 5. Determinación del porcentaje de cada componente separado de la celulosa para la segunda prueba a partir de 40 g de bagazo seco.

Constituyentes de la caña de azúcar	Porcentaje de cada componente separado de la celulosa (%) Obtenido en este trabajo	Porcentaje teórico de cada componente (%) Obtenido por otros autores	Referencias
Carbohidratos	32.5	10-16	Larrahondo,1995
Lípidos	29.17	20-21	Paz, 2011
Lignina	40	21-22	Paz, 2011

Nota: En cada proceso se guardaron de 2 a 3 gramos por proceso. Elaboración propia con ayuda de diversos autores para la obtención de porcentajes teóricos, 2021.

Se efectuó un triplicado de la última prueba para confirmar el método óptimo para la extracción de celulosa

Se elaboró la hoja de papel como se muestra en la figura 5. Siendo que el papel obtenido presentó características similares a las deseadas, exceptuando la flexibilidad y opacidad de la hoja.

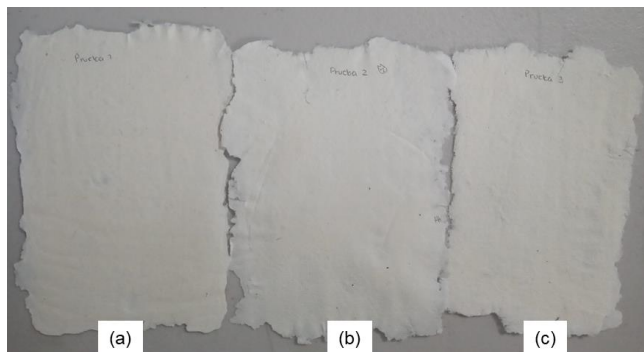


Figura 5. Hojas de papel resultantes a partir del bagazo de caña de azúcar una vez pasadas por el blanqueamiento con cloro comercial marca Clorox, (a) primera prueba, (b) segunda prueba y (c) tercera prueba. Elaboración propia, 2022

En el primer triplicado se obtuvieron 12 g de celulosa, en el segundo 14 g y en el tercero se extrajo 12 g de celulosa. En la tabla 6 se muestran los porcentajes obtenidos de cada componente separado de la celulosa.

Tabla 6. Determinación de los porcentajes de cada componente separado de la celulosa para las pruebas de triplicado a partir de 50 g de bagazo seco cada una.

Constituyentes de la caña de azúcar	Porcentaje de cada componente separado de la celulosa (%) Triplicado 1	Porcentaje de cada componente separado de la celulosa (%) Triplicado 2	Porcentaje de cada componente separado de la celulosa (%) Triplicado 3	Porcentaje teórico de cada componente (%) Obtenido por otros autores	Referencias
Carbohidratos	34	38	30	10-16	Larrahondo, 1995
Lípidos	21.21	16.13	24.24	20-21	Paz, 2011
Lignina	53.85	46.15	47.83	21-22	Paz, 2011

Elaboración propia con ayuda de diversos autores para la obtención de porcentajes teóricos, 2022.

Caracterización por Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)

Se realizaron análisis de Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) a las muestras de bagazo de caña en los diferentes tratamientos utilizados para la obtención de celulosa.

En la tabla 7 se presenta el resumen de los grupos funcionales obtenidos para el bagazo de caña antes y después del procedimiento de obtención de celulosa para el triplicado de la tercera prueba.

Tabla 7. Determinación de los grupos funcionales obtenidos por el espectro infrarrojo para el bagazo de caña durante el proceso de obtención de celulosa.

Grupo funcional	Rango de número de onda (cm^{-1})	Número de onda del bagazo (cm^{-1})	Número de onda de la celulosa (cm^{-1})	Trabajo de otros autores (cm^{-1})
R-OH	3650-3200	3376	3398	3490 Coates, 2000; Brandrup <i>et al.</i> , 1999
C-H ^{(e)*}	2960-2800	2927, 2885	2895	2900 Lu y Hsieh, 2010; Asfanas'ev <i>et al.</i> , 2007 2922 y 2854 López <i>et al.</i> , 2016; Vilorio <i>et al.</i> , 2014; Asfanas'ev <i>et al.</i> , 2007
C-H ₃	~1375	1372	1372	1365, 1328 Mendoza y Vellilla, 2011
Cadenas de glucosa	1800-1600	1632	-	1631 Lu y Hsieh, 2010
C=O	1715-1680	1730	-	1731 Morán <i>et al.</i> , 2008; Asfanas'ev <i>et al.</i> , 2007; Pandey, 1999
C-OH	1200-1050	1055	1055	1050 Dai y Fan, 2010
C-H	800-900	922	903	900 López <i>et al.</i> , 2016
H ₂ O absorbida	~1650	-	1641	1631 Lu y Hsieh, 2010

Nota: (e)*, estiramiento del enlace. Elaboración propia con ayuda de diversos autores para la obtención de la frecuencia de absorción teóricos, 2022.

En la figura 6 se visualiza el espectro de infrarrojo del bagazo de caña y la celulosa obtenida. El primer valor de número de onda observable de izquierda a derecha es de 3376 cm^{-1} y aumenta en el espectro de la celulosa de color rojo a 3398 cm^{-1} , lo cual probablemente indica un aumento de este compuesto, estos son característicos de los grupos R-OH, ya que se produce una tensión y estiramiento de estos que están presentes en los sacáridos de la celulosa (Coates, 2000; Brandrup *et al.* 1999; Vargas *et al.*, 2017), seguido de dos números de onda en 2927 cm^{-1} y 2885 cm^{-1} atribuida al estiramiento de los enlaces de C-H (Lu y Hsieh, 2010; Asfanas'ev *et al.*, 2007), además en el espectro de la celulosa se muestra una banda similar a 2895 cm^{-1} . A 1730 cm^{-1} se visualiza un pico de los enlaces C=O de las cetonas no conjugadas presentes en la hemicelulosa (Morán *et al.*, 2008; Asfanas'ev *et al.*, 2007; Pandey, 1999) desapareciendo en el espectro de la celulosa, de igual manera se infiere que se ha eliminado en gran medida la hemicelulosa presente en el bagazo, a este mismo espectro le sigue una vibración a 1641 cm^{-1} lo que representa una absorción de agua (López *et al.*, 2016). La onda de 1632 cm^{-1} se le atribuye al enlace de CH₃ (Lu y Hsieh, 2010; Vargas *et al.*, 2017).

Los picos de 1055 cm^{-1} en ambos espectros posiblemente correspondan al enlace OH de los grupos C-OH, pertenecientes a la hemicelulosa y la lignina (Dai y Fan, 2010). Finalmente, las bandas a 922 cm^{-1} y 903 cm^{-1} corresponde al enlace C-H de los hidrógenos aromáticos de la lignina (López *et al.*, 2016).

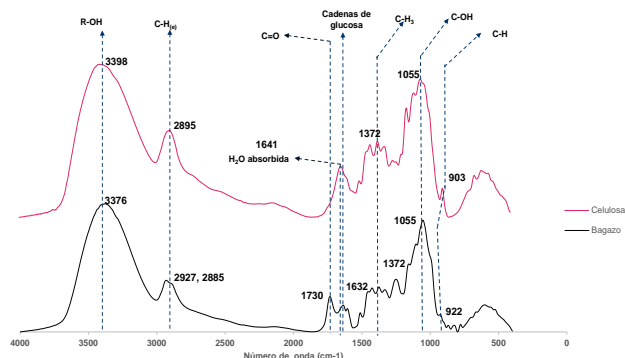


Figura 6. Espectro infrarrojo de absorbancia para la tercera prueba, de color rojo se aprecian los números de onda encontrados para la celulosa y de color negro están los números de ondas del bagazo de caña. Elaboración propia, 2022.

Caracterización por Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Adicionalmente se analizó el comportamiento de la estabilidad térmica de las muestras obtenidas de las diversas pruebas tomando en cuenta que el método óptimo es a partir de la tercera prueba se muestra el termograma de la figura 7 se consideran cuatro etapas, se tiene una pérdida inicial de masa de 8.70% cercana a los 35 °C y un pico endotérmico de -536 J/g , atribuida a la pérdida de agua en forma de vapor (Vera *et al.*, 2014; Ochica, 2015). Se tiene una segunda etapa a partir de 223 °C y presenta una disminución de la masa del 53.90% con un pequeño pico de lo que se piensa es cristalización con un valor de 299.5 J/g , en esta etapa del proceso se desprenden los volátiles ligeros, de relativamente bajo peso molecular y en su mayoría procedentes de la hemicelulosa (Shafizadeh, 1983; Tillman 1991).

La tercera etapa comienza cercana a los 300 °C con una pérdida de masa de 21.25%, se le atribuye esta diferencia a la degradación lenta de la lignina y se genera ligeramente un pico de 38.72 J/g , lo que se asume es cristalización, la lignina es el material que posee mayor estabilidad térmica, es decir, con una descomposición lenta (Yang *et al.*, 2007).

La cuarta etapa es a partir de los 350 °C con una disminución de masa de 11.04% con un cambio de oxidación de 1203 J/g , en esta etapa suceden reacciones de craqueo y rupturas de las cadenas de los compuestos de mayor peso molecular (Antoli & Oliva, 2003).

Desprendiéndose materias volátiles más pesadas, fundamentalmente estos compuestos se constituyen de celulosa, e incluso de lignina (Arauzo y Bilbao, 1995; Raveendran *et al.*, 1996).

Pasando los 530 °C la curva de calor específico decrece por el apareamiento de residuos carbonosos que contiene el carbono fijo y las cenizas, manteniéndose constante la masa de la muestra (Antoli & Oliva, 2003).

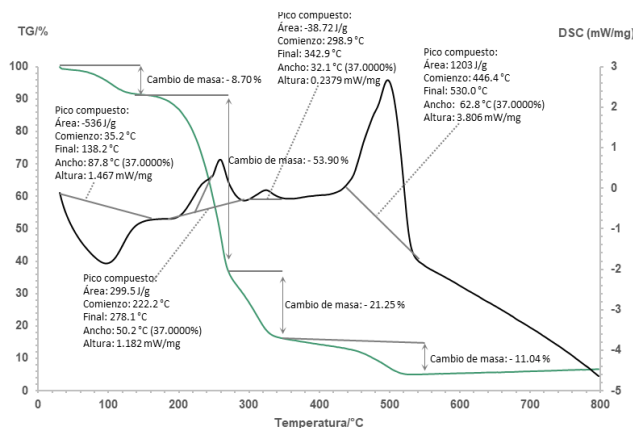


Figura 7. Análisis térmico de la muestra de bagazo de caña de azúcar después haberlo sometido a diversos tratamientos para la remoción de sólidos solubles, compuestos grasos y lignina, referentes a la tercera prueba en atmosfera inerte. (a) Análisis Termogravimétrico (TGA). (b) Calorimetría diferencial de Barrido (DSC). Elaboración propia, 2022.

Conclusiones

A partir de un balance de materia se cuantificó la cantidad de bagazo y cáscara de caña de azúcar que se obtienen de procesar 2 kg de caña de azúcar como fuente de celulosa.

Se obtuvieron 12 g celulosa a partir de 50 g de bagazo de caña de azúcar proveniente del mercado Jardines de Santa Clara en Ecatepec de Morelos, Estado de México, mediante un proceso reducido en hidróxido de sodio (NaOH) para la elaboración de papel.

Se realizaron 3 ensayos de prueba para modificar las proporciones de hidróxido de sodio (NaOH) y ácido clorhídrico (HCl) en la extracción de la celulosa determinado que la cantidad óptima a emplear para 50 g de bagazo son de 500 mL de ácido clorhídrico y 200 mL de hidróxido de sodio.

Se evaluó la calidad de celulosa como materia prima para obtener papel mediante pruebas de caracterización, siendo opacidad, escritura con grafito, facilidad de borrado, desgaste y facilidad de doblez, comparando con propiedades cualitativas de papel bond.

Se realizaron análisis de FTIR, TGA y DSC que confirman la extracción de la celulosa, siendo que la tercera prueba muestra mayor cantidad de celulosa obtenida, asimismo, esta presenta menor cantidad de hemicelulosa y lignina.

Se comprueba que el bagazo de caña es una gran alternativa para la obtención de celulosa, por ello al ser usado para este proceso se evita su depósito en tiraderos a cielo abierto o rellenos sanitarios y por ende la contaminación que conlleva este residuo, asimismo, se disminuye el uso de fuentes maderables para la elaboración del papel.

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional y a la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, por brindarme el espacio para mi desarrollo académico

Al Dr. Juan Ramón Salazar Cano asesor y a la Dra. Cinthia Erika Sánchez Fuentes co-asesora por su dirección, apoyo, asesoramiento, dedicación y paciencia en la elaboración de este proyecto.

A la Dra. Diana Gómora Herrera por su colaboración en el desarrollo de los análisis realizados.

A mis padres por todo su apoyo, amor y paciencia a lo largo de toda la carrera y realización de este proyecto, así como a mis hermanos que siempre han sido un impulso.

Cassandra Flores por el acompañamiento a lo largo de todo este proceso y por su gran amistad.

Referencias

Aguilar, N. (2011). Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. *Ingeniería Investigación y Tecnología* 12(1):189-197.

Antolín, G., & Oliva, D. (2003). Caracterización del bagazo de caña de azúcar mediante análisis térmico. *Inf. Tec*, 14, 3-25.

Arauzo, F. y Bilbao, R., Actualización de Temas Específicos de Biomasa. Pirólisis de Biomasa, Boletín Informativo de la Asociación para la Difusión del Aprovechamiento de la Biomasa en España: 7 (1995) y 8 (1995).

Asfanas'ev N.I., Prokshin G.F., Lichutina T.F., Gusakova M.A., Vishnyakova A. P., Surkhov D.A., Derkacheva O. Y. 2007. *Macromolecular Chemistry and Polymeric Materials* 80 (10), 1695-1698.

Benítez, J., Popo, M., Vallejos, M., & Area, M. (2019). Calidad de papel artesanal de fibras no convencionales de cinco especies colombianas. Recuperado 16 de diciembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/333455269_Calidad_de_papel_artesanal_a_partir_de_fibras_no_convencionales_de_cinco_especies_colombianas_Manufacture_of_handmade_paper_from_nonconventional_fibers_of_five_colombian_species

Boopathy, R. (2004). Use of post-harvest sugarcane residue in coastal reclamation: A feasibility study. *Sugar Cane International* Jan/Feb:9-13

Brandup J., Immergut J. 1975. *Polymer Handbook*. 4a, Ed. John Wiley & Son, New York, USA. 1: 136-144.

Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia. (2005). *Prevención de la contaminación en el sector papelerero*. Recuperado de <https://pdfslide.net/documents/prevencion-de-contaminacion-en-el-sector-papelerero.html>

Coates J. 2000. Interpretation of infrared spectra, a practical approach. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. R. A. Meyers (Ed.), Ed. JohnWiley&Sons Ltd, Chichester pp. 10815-10837.

Dai D. y Fan M. 2010. *Materials Sciences and Applications* 1, pp.336-342.

Flores, Muñoz Ledo, R., Flores, B., & Cano, K. (2008). Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 35:39.

Klass, D. L. (1998). *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. Elsevier.

Larrahondo, J. E. (1995). Calidad de la caña de azúcar. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Eds. Cassalet, C, 337-354.

León Martínez, T., Dopico Ramírez, D., Trina Hernández, O., & Medina Estevéz, M. (2013). Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar Obtenido de Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Cuba 47(2), 13-22. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223128548003.pdf>

Liu, W., Wang, Y.; Sun, Z. (2004). Crystallization behavior of starch-filled polypropylene, *Journal of Applied Polymer Science*, Volume 92, Issue 1, Pp: 484-492.

- López Martínez, A., Bolio López, G. I., Veleza, L., Solórzano Valencia, M., Acosta Tejada, G., Hernández-Villegas, M. M., ... & Córdova-Sánchez, S. (2016). Obtención de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Agroproductividad*, 9(7), 41-46.
- Lu P., Hsieh Y.L. 2010. *Carbohydrate Polymers* 82, 329-336
- Mejías Brizuela, N., Orozco Guillen, E., & Galáan Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2, 29-31. Recuperado de https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol2num6/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N6_4.pdf
- MITRE. (16 de agosto de 2013). Los secretos del papel sin árboles. Obtenido de Ledesma lidera en la Argentina la producción de papel a partir de fibra de caña de azúcar. Recuperado 18 de octubre de 2020, de <https://mitreyelcampo.cienradios.com/secretos-del-papel-sin-arboles/>
- Morán J.I., Vera A., Cyras V.P., Vázquez A. 2008. *Cellulose* 15,149-159.
- Ochica Larrota, A. F. (2015). Obtención de nanofibras de celulosa cationica a partir del bagazo de la caña de azúcar y teñidas con colorante reactivo anionico para la aplicación textil.
- Pandey K.K. 1999. *Journal of Applied Polymer Science* 71, 1969-1975.
- Paz, Y. (2011). Evaluación de las pulpas obtenidas a partir del pseudotallo de plátano para la elaboración de papel. (Tesis de pregrado). Recuperado:13/12/2020 http://tesis.luz.edu.ve/tde_arquivos/39/TDE-2014-05-29T15:41:50Z-4852/Publico/paz_gonzalez_yandrelis_teotiste.pdf
- Piguave Intriago, L. (2018). Propuesta de fabricación de hojas de papel a partir de residuos de plátanos (*Musa paradisiaca*) como alternativa ecológica a la tala de árboles. Recuperado 1 de noviembre de 2020, de <https://repositorio.uileam.edu.ec/bitstream/123456789/1819/1/ULEAM-RNA-0031.pdf>
- Raveendran, K., Ganesh, A. y Khilar, KC (1996). Características del pirólisis de la biomasa y componentes de la biomasa. *Combustible*, 75 (8), 987-998.
- Sanjuán, R., J. Anzaldo, J. Vargas, J. Turrado y R. Patt. 2001. Morphological and chemical composition of pith and fibers from Mexican sugarcane bagasse. *Holz als Rohund Werkstoff* 59:447-450
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Caña de azúcar mexicana. Recuperado 12 de diciembre de 2020, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256427/B_sico-Ca_a_de_az_car.pdf
- Shafizadeh, F., *Thermal Conversion of Cellulosic Materials to Fuel and Chemicals*, Academic Press (1983).
- Sulaimani, K., & Dwivedi, P. B. (2017). Production of handmade papers from sugar cane bagasse and banana fibers in Oman. *International Journal of Students' Research in Technology & Management*, 5(3), 16-20. <https://doi.org/10.18510/ijstrtm.2017.534>
- Tillman, D., *The Combustion of Solid Fuels and Wastes*, Academic Press, California (1991).
- Vargas, N., Zara, J., Navas, P., Márquez-Riquel, M., Yegres, F., & Cubillan, L. (2017). Empleo de la Espectroscopia Infrarroja (FT-IR-ATR) como herramienta para la Caracterización del bagazo de caña proveniente de la Sierra Falconiana. *Química Viva*, 16(3), 17-24.
- Vera, F. L., Cortes, H. A. M., Murcia, C. V., & Galvis, I. C. (2014). Modificación superficial de micro fibras de celulosa obtenidas a partir de bagazo de caña de azúcar usando silanización. *Informador técnico*, 78(2), 106-114.
- Viloria, P. R., Marfisi, S., Rondón, P. O., & Rojas, B. (2014). Obtención de celulosa microcristalina a partir de desechos agrícolas del cambur (*Musa sapientum*). Síntesis de celulosa microcristalina. *Revista iberoamericana de polímeros*, 15(6), 286-300.
- Yang, H.P., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H., Zheng, C. (2007). Characteritics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, *Fuel*, 86:1781-1788.