




Valorización de bagazo de agave mediante materiales compuestos de PEBD Agave bagasse valorization through LDPE composite materials

Breakdown of the translation:

E. Rubio-Rosas ^{a,*}, V. Rodríguez-Lugo ^b, R. Salgado-Delgado ^c

^a Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Prolongación de la 24 Sur y San Claudio, Ciudad Universitaria, Sn Manuel, 72570 Puebla, México.

^b Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42184, México.

^c Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27, C.P. 62780 Zacatepec Morelos, México.

Resumen

El bagazo de agave, residuo generado durante la producción de mezcal, representa un problema ambiental debido a su acumulación y lenta degradación. En este trabajo se prepararon materiales compuestos a base de polietileno de baja densidad (PEBD) reforzado con fibras de bagazo de agave, sometidas o no a tratamiento alcalino. El bagazo se recolectó, molió y tamizó en fracciones de 150–425 μm , y posteriormente se mezcló con PEBD en proporciones de 10, 20 y 30 % en peso. La caracterización se realizó mediante espectroscopía infrarroja (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TGA) y ensayos de tensión. Los resultados muestran que el tratamiento alcalino eliminó parcialmente lignina y hemicelulosa, incrementando la rugosidad de las fibras. La resistencia a la tensión se incrementó hasta un 36.6 % respecto al PEBD puro en el caso del composite con 20 % en peso de fibra tratada y tamizada en malla 40.

Palabras Clave: Bagazo de agave; materiales compuestos; polietileno de baja densidad; fibras naturales; propiedades mecánicas.

Abstract

Agave bagasse, a residue generated during the production of mezcal, represents an environmental problem due to its accumulation and slow degradation. In this work, composites based on low-density polyethylene (LDPE) reinforced with agave bagasse fibers, either untreated or subjected to an alkaline treatment, were prepared. The bagasse was collected, ground, and sieved into fractions of 150–425 μm , and then mixed with LDPE at 10, 20, and 30 wt%. Characterization was carried out using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), Scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Thermogravimetric analysis (TGA), and tensile testing. The results show that the alkaline treatment partially removed lignin and hemicellulose, increasing the surface roughness of the fibers. Tensile strength increased by up to 36.6% compared to neat LDPE in the composite containing 20 wt% of treated fibers sieved through a 40-mesh screen.

Keywords: Agave bagasse; biocomposites; low-density polyethylene; natural fibers; mechanical properties.

1. Introducción

La creciente preocupación mundial por la sostenibilidad medioambiental ha impulsado la búsqueda de nuevos materiales que sean tanto de alto rendimiento como respetuosos con el medio ambiente (Asim *et al.*, 2018; Faruk *et al.*, 2012). En este contexto, los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras naturales han surgido como una alternativa prometedora a los materiales compuestos sintéticos, ofreciendo ventajas como baja densidad,

biodegradabilidad, renovabilidad y bajo coste (George *et al.*, 2020; Pickering *et al.*, 2016). El uso de residuos agrícolas como fuente de fibras de refuerzo es particularmente atractivo, ya que añade valor a subproductos que a menudo se consideran desechos, reduciendo su impacto ambiental y contribuyendo a una economía circular (Espinoza-Hernández *et al.*, 2021).

El bagazo de agave es un ejemplo primordial de dicho residuo, cuya generación se ha visto exacerbada por el auge explosivo de la industria del mezcal en México. Entre 2012 y

*Autor para la correspondencia: efrain.rubio@correo.buap.mx

Correo electrónico: efrain.rubio@correo.buap.mx (E. Rubio-Rosas), venturar@uaeh.edu.mx (V. Rodríguez-Lugo), rene.sd@zacatepec.tecnm.mx (R. Salgado-Delgado),

2022, la producción de mezcal se incrementó en un 355 %, alcanzando más de 14 millones de litros anuales (INEGI, 2023). Este crecimiento genera paralelamente grandes volúmenes de residuos. Se estima que por cada litro de mezcal producido se generan entre 15 y 17 kg de bagazo húmedo (Global Press Journal, 2023; de Anda-Rodríguez *et al.*, 2024). Bajo estas cifras, la producción nacional supera las 180 000 toneladas anuales de bagazo. Este residuo, al no tener un destino productivo masivo, suele acumularse en los entornos de las destilerías, representando un riesgo ambiental por contaminación de suelos y aguas (Gómez-Vargas, *et al.*, 2024), el manejo inadecuado del bagazo no solo representa un problema de disposición local, sino que también tiene un impacto ambiental significativo. Ruiz-Camou *et al.* (2023), mediante un análisis de ciclo de vida de la producción de mezcal en Michoacán, demostraron que el bagazo contribuye en un 22.7 % al potencial de calentamiento global del proceso, lo que refuerza la necesidad de estrategias de valorización sustentable.

Aunque estados como Oaxaca concentran hasta el 99% de la producción nacional (Pérez Díaz, 2021) el estado de Zacatecas es un productor significativo y en crecimiento, donde la acumulación de bagazo también constituye un desafío ambiental apremiante. Este bagazo es un material lignocelulósico compuesto principalmente por celulosa ($\approx 43\%$), hemicelulosa ($\approx 19\%$) y lignina ($\approx 15\%$), lo que lo convierte en un candidato adecuado para su uso como refuerzo en materiales compuestos (Caché Escamilla, 2010; Chávez-Guerrero *et al.*, 2017). Sin embargo, sus aplicaciones actuales son limitadas.

El polietileno de baja densidad es uno de los polímeros termoplásticos más utilizados debido a su excelente flexibilidad, bajo coste, baja temperatura de fusión y buena procesabilidad (Al-Salem *et al.*, 2009; George *et al.*, 2020). Utilizar PEBD como matriz para compuestos con fibras naturales combina la versatilidad del polímero con el refuerzo mecánico y la sostenibilidad de las fibras (Asim *et al.*, 2018; Pickering *et al.*, 2016). No obstante, un gran desafío en el desarrollo de estos compuestos es la inherente incompatibilidad entre las fibras naturales hidrofílicas y la matriz polimérica hidrofóbica, lo que resulta en una pobre adhesión interfacial y, en consecuencia, en propiedades mecánicas mediocres (Li *et al.*, 2007; Mwaikambo & Ansell, 2002). Para superar esta limitación, se aplican varios tratamientos químicos a las fibras. El tratamiento alcalino (mercerización) con hidróxido de sodio (NaOH) es uno de los métodos más comunes y efectivos (Benítez *et al.*, 2013; Joseph *et al.*, 1996). Este tratamiento elimina impurezas superficiales como ceras, aceites y parte de la lignina y hemicelulosa, aumentando la rugosidad superficial y exponiendo más grupos hidroxilo de la celulosa. Esto mejora el anclaje mecánico y facilita una mejor unión interfacial con la matriz polimérica (Shahzad, 2012). Además, el tamaño de la fibra y la relación de aspecto son parámetros críticos que influyen en la transferencia de tensiones de la matriz al refuerzo (Benítez *et al.*, 2017).

Si bien varios estudios han explorado compuestos utilizando fibras de especies de agave como *A. sisalana* o *A. tequilana* (Benítez *et al.*, 2013, 2017), la investigación sobre compuestos reforzados con fibras de bagazo de *Agave salmiana*—una especie clave para la producción de mezcal en

Zacatecas—sigue siendo necesaria. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo desarrollar y caracterizar un material compuesto utilizando PEBD como matriz reforzado con fibras de bagazo de *Agave salmiana*. Se evaluaron sistemáticamente los efectos del tratamiento alcalino (NaOH 0.5N) y del tamaño de partícula de la fibra (mallas 40, 60 y 100) sobre las propiedades morfológicas, térmicas y mecánicas de los compuestos. El desarrollo exitoso de este compuesto proporciona una solución viable para valorizar los residuos de bagazo de agave, ofreciendo un material sostenible con aplicaciones potenciales en las industrias automotriz, de la construcción y del envasado, al tiempo que mitiga un pasivo ambiental crítico.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

El bagazo de *Agave salmiana* fue proporcionado por la mezcalera "Saldaña", ubicada en el municipio de Pinos, Zacatecas, México. Se utilizó polietileno de baja densidad (PEBD) de la marca Aldrich (CAS: 9002-88-4). Para el tratamiento químico se utilizó hidróxido de sodio (NaOH, 99% de pureza, marca J.T. Baker) y ácido clorhídrico (HCl, 36.5% v/v, marca Fermont) para la neutralización.

2.2. Tratamiento o alcalino de las fibras

El bagazo recibido se sometió inicialmente a un proceso de acondicionamiento que comprendió la molienda en un molino manual de granos, seguida de un lavado con agua destilada a 50 °C durante 1 hora bajo agitación constante. Posteriormente, las muestras fueron secadas en estufa a 70 °C por 12 horas y clasificadas por tamaño de partícula mediante tamices ASTM No. 40 (425 μm), No. 60 (250 μm) y No. 100 (150 μm).

Las fibras previamente clasificadas fueron sometidas a un tratamiento de mercerización empleando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.5 N, bajo una relación líquido:sólido de 10:1 (500 mL de solución por cada 50 g de fibra). El proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente (25 °C) durante 60 minutos con agitación constante. Posteriormente, las fibras fueron neutralizadas mediante ácido clorhídrico (HCl, 36.5% v/v), enjuagadas con agua destilada hasta alcanzar pH neutro y, finalmente, sometidas a un secado en estufa a 70 °C durante 24 horas.

2.3. Obtención de los materiales compuestos

Se prepararon materiales compuestos incorporando diferentes porcentajes de refuerzo (10, 20 y 30% en peso) y distintos tamaños de partícula correspondientes a las mallas

ASTM No. 40, 60 y 100, empleando fibras tanto tratadas como sin tratar. El proceso de fabricación consistió en la fusión y homogeneización de la mezcla en una inyectora de laboratorio (Atlas, modelo IMM) a 140 °C durante 7 minutos. Posteriormente, las probetas fueron moldeadas mediante inyección en un molde metálico con dimensiones establecidas por la norma ASTM D638 (tipo IV), bajo condiciones de temperatura de molde de 60 °C, tiempo de inyección de 30 segundos y presión de 5 bar.

2.4. Técnicas de caracterización

La caracterización de los materiales se llevó a cabo mediante diferentes técnicas instrumentales. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se realizó en un espectrómetro Bruker Vertex 70 equipado con accesorio ATR. La microscopía electrónica de barrido (SEM) se efectuó en un microscopio JEOL JSM-5600LV, previa metalización de las muestras con oro. Los análisis de difracción de rayos X (DRX) se llevaron a cabo en un difractómetro Bruker D8 Discover utilizando radiación Cu-K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), a un voltaje de 40 kV y corriente de 40 mA. El análisis termogravimétrico (TGA) se efectuó en un equipo TA Instruments Q600 SDT, empleando muestras de aproximadamente 10 mg, las cuales fueron calentadas desde temperatura ambiente hasta 800 °C a una razón de 10 °C/min. Los ensayos de tensión se realizaron en una máquina universal de ensayos Instron 3365, siguiendo la norma ASTM D638, con una velocidad de prueba de 5 mm/min y una celda de carga de 5 kN. Finalmente, la densidad de los materiales se determinó mediante el método de desplazamiento en un densímetro, conforme a la norma ASTM D792.

3. Resultados y discusión

3.1. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

En la Figura 1 se muestran los espectros FTIR de las fibras de bagazo de agave, antes y después del tratamiento con hidróxido de sodio. En ambos casos se observa la banda ancha en $\sim 3330 \text{ cm}^{-1}$, atribuida al estiramiento O–H de enlaces de hidrógeno presentes en polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) y en los grupos fenólicos de la lignina. La señal en $\sim 2920 \text{ cm}^{-1}$ corresponde al estiramiento C–H de grupos alifáticos ($-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$), presente en todos los componentes lignocelulósicos.

En la región de $1600\text{--}1630 \text{ cm}^{-1}$ se identifican contribuciones de los anillos aromáticos de la lignina ($\nu \text{ C}=\text{C}$) y de la flexión H–O–H del agua adsorbida en la celulosa. La banda en 1524 cm^{-1} está asociada principalmente a vibraciones aromáticas de lignina.

De forma relevante, tras el tratamiento alcalino se observa una disminución marcada en la intensidad de la señal a 1734 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento C=O de grupos carbonílicos presentes en hemicelulosa (acetilos, ésteres de ácidos urónicos) y lignina, lo que evidencia su saponificación y extracción parcial. Asimismo, la señal en la región $1240\text{--}1260 \text{ cm}^{-1}$, asociada a vibraciones C–O de enlaces aril–alquilo de lignina y grupos acetilados de hemicelulosa, también disminuye, en concordancia con la eliminación de estos componentes durante el tratamiento.

La señal en torno a 1316 cm^{-1} se atribuye a vibraciones características del oxalato de calcio monohidratado ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, whewellita).

Finalmente, en la región de $1160\text{--}898 \text{ cm}^{-1}$ se encuentran los modos C–O y C–O–C característicos de los enlaces glucosídicos de la celulosa. La señal en $\sim 898 \text{ cm}^{-1}$ es particularmente relevante, pues se asocia a la unión β -(1 \rightarrow 4) de la celulosa, considerada una “banda diagnóstica” de este polisacárido.

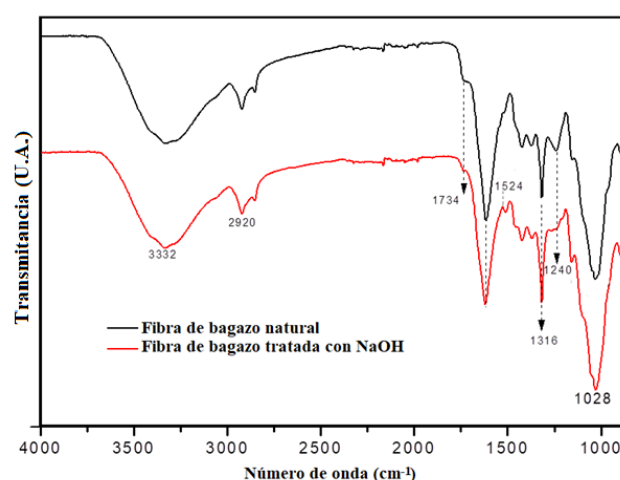


Figura 1. Espectros en el infrarrojo del bagazo de agave con tratamiento alcalino y sin tratamiento.

3.2. Difracción de rayos X

La Figura 2 muestra los patrones de difracción de rayos X del bagazo de agave sin y con tratamiento alcalino. En el bagazo sin tratamiento se observa un pico ancho centrado en torno a $22^\circ 2\theta$, característico de la fracción amorfa de la Celulosa I ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$, ficha PDF 00-050-2241). Además, aparecen múltiples picos agudos entre 15° y $48^\circ 2\theta$ (marcados con asteriscos, *), que se asignan a Oxalato de calcio monohidratado ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, ficha PDF 00-020-0231), lo que confirma la presencia de inclusiones minerales nativas embebidas en la matriz lignocelulósica.

Tras el tratamiento con hidróxido de sodio, el patrón de difracción presenta cambios notables: se observa una disminución de la contribución amorfa en la región de $18\text{--}20^\circ 2\theta$ y un incremento relativo en la intensidad de la reflexión (200) ($\sim 22^\circ 2\theta$), lo cual indica un aumento en el grado de cristalinidad de la celulosa, atribuible a la eliminación parcial de hemicelulosa y lignina. Adicionalmente, se registra un incremento en la

intensidad de los picos de oxalato de calcio y la aparición de un nuevo pico en $\sim 29.4^\circ 2\theta$ (marcado con “O”), correspondiente a Carbonato de calcio (CaCO_3 , ficha PDF 01-086-2334), el cual se asocia a la descomposición parcial del oxalato durante el procesamiento.

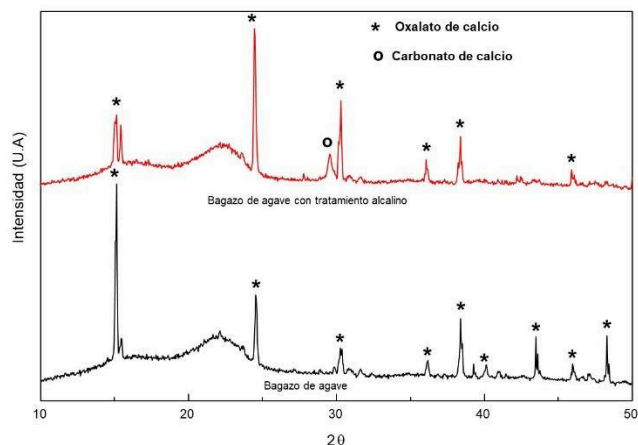


Figura 2. Patrón de difracción de la fibra de bagazo de Agave Natural, sin tratamiento alcalino y con tratamiento alcalino.

3.3. Microscopía

a
Electrónica
de
Barrido
(SEM)

En la Figura 3 se observa la estructura jerárquica típica de las fibras lignocelulósicas. La fibra principal ($\sim 350 \mu\text{m}$ de diámetro) consiste en un haz de fibrillas elementales de celulosa ($33 \mu\text{m}$ de diámetro) orientadas longitudinalmente, cohesionadas por una matriz de hemicelulosa y lignina. Esta organización confiere a las fibras su resistencia mecánica característica, ya que las fibrillas de celulosa actúan como refuerzo en una matriz amorfa de polímeros naturales. La presencia de fracturas en el material inter-fibrilar sugiere fragilidad en la matriz de lignina/hemicelulosa, lo que podría afectar la integridad estructural bajo esfuerzos mecánicos.

Figura 3. Imagen representativa de la morfología de una sección de las fibras de bagazo de agave

El mapeo elemental EDS que se muestra en la Figura 4, confirma la presencia de depósitos minerales ricos en calcio (color rojo), distribuidos heterogéneamente entre las fibrillas. Este hallazgo es consistente con la presencia de oxalato de calcio (CaC_2O_4), compuesto comúnmente reportado en plantas del género Agave. Los cuales pueden actuar como puntos de estrés, reduciendo la resistencia mecánica de las fibras individuales, así como alterar la adhesión fibra-matriz en materiales compuestos poliméricos debido a su incompatibilidad química con matrices orgánicas. La detección de oxígeno y carbono (color azul) en las fibrillas corrobora la naturaleza orgánica de la celulosa y hemicelulosa.

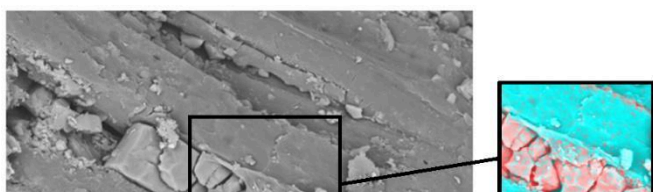


Figura 4. Micrografía de la fibra de Bagazo y mapeo químico elemental EDS, donde se aprecia un material enriquecido de calcio (color rojo).

La Figura 5 corresponde a las fibras de agave post-tratamiento alcalino y muestran cambios morfológicos críticos, como es la remoción de componentes no celulósicos: La separación de fibrillas indica la disolución parcial de lignina y hemicelulosa por el NaOH, exponiendo la microestructura de celulosa. La superficie muestra mayor aspereza lo que es benéfico para el anclaje mecánico en matrices poliméricas.

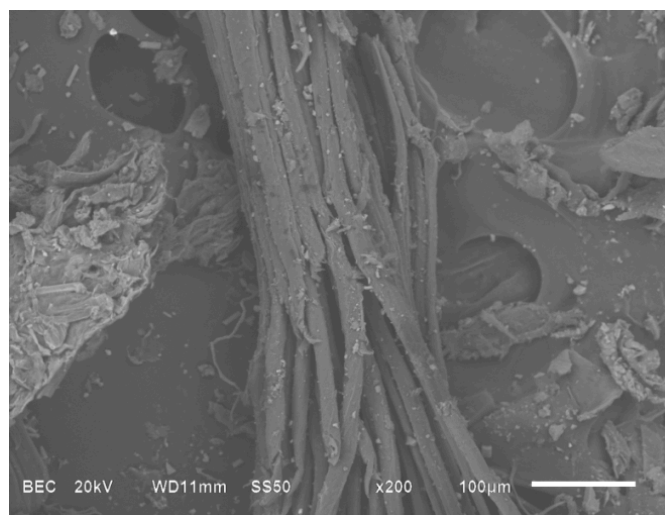


Figura 5. Micrografía de la fibra de Bagazo postratamiento alcalino

3.4. Análisis Termogravimétrico (TGA)

El termograma de la fibra sin tratar (Figura 6) muestra un perfil de descomposición típico de materiales lignocelulósicos, con tres etapas principales de degradación:

Etapla I ($30\text{--}150^\circ\text{C}$): Pérdida de masa del $\sim 4\%$. Esta etapa se atribuye a la evaporación de agua físicamente adsorbida en la estructura porosa de las fibras. La baja temperatura de desorción sugiere que el agua está débilmente unida.

Etapla II ($250\text{--}360^\circ\text{C}$): Pérdida de masa del $\sim 46\%$. Esta es la etapa principal de degradación, donde ocurre la pirólisis de los componentes estructurales:

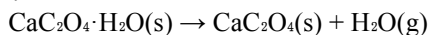
Hemicelulosa: Se degrada primero ($\sim 200\text{--}300^\circ\text{C}$) debido a su estructura amorfa y ramificada.

Celulosa: Se descompone en el rango de $\sim 300\text{--}360^\circ\text{C}$.

Lignina: Se degrada en un rango amplio (150-500 °C) debido a su estructura compleja y aromática.

Etapa III (380-600 °C): Pérdida de masa adicional del ~8%. Esta etapa se asocia a la descomposición del oxalato de calcio ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), identificado previamente por DRX y SEM-EDS. La descomposición ocurre en tres sub-etapas:

Deshidratación (380-460 °C): Pérdida de agua de cristalización:



Descomposición a carbonato (460-500 °C):

Descarboxilación para formar carbonato de calcio:



Descomposición del carbonato (500-600 °C): Aunque no completa, inicia la descarbonatación:

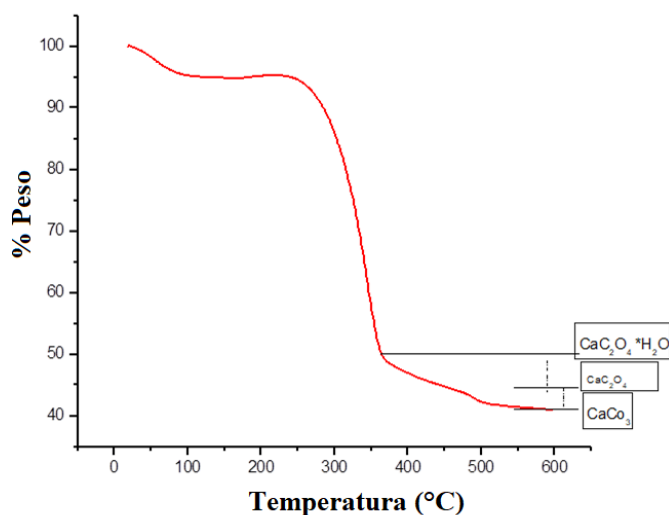


Figura 6. Análisis Termogravimétrico de la fibra de bagazo de agave sin tratar.

El termograma de la fibra tratada con NaOH (Figura 7) evidencia cambios significativos respecto a la fibra sin tratamiento. En primer lugar, se observa una mayor pérdida de humedad (6% frente a 4%), atribuida al incremento en la hidrofiliabilidad de las fibras como consecuencia de la exposición de grupos hidroxilo de la celulosa tras el tratamiento alcalino, lo que favorece una mayor adsorción de agua. Asimismo, en la Etapa II se registra una pérdida de masa más acelerada (50% frente a 46%), efecto asociado a la remoción parcial de lignina y hemicelulosa que reduce la protección térmica de la celulosa, provocando una degradación más rápida y completa de los componentes restantes. Este fenómeno se refleja además en un ligero desplazamiento del pico de degradación hacia temperaturas inferiores. Finalmente, se aprecia una reducción del residuo mineral, ya que la pérdida de masa total aumenta de aproximadamente 58.6% a 65%, lo cual indica una mayor volatilización de los compuestos orgánicos como consecuencia del proceso de deslignificación parcial.

La temperatura de máxima tasa de degradación (T_{max}) para la celulosa se encuentra alrededor de 340-360 °C, consistente con reportes previos para fibras de agave. El

residuo final a 600 °C es mayor en las fibras sin tratar, debido a la presencia de más material estable térmicamente (lignina y minerales).

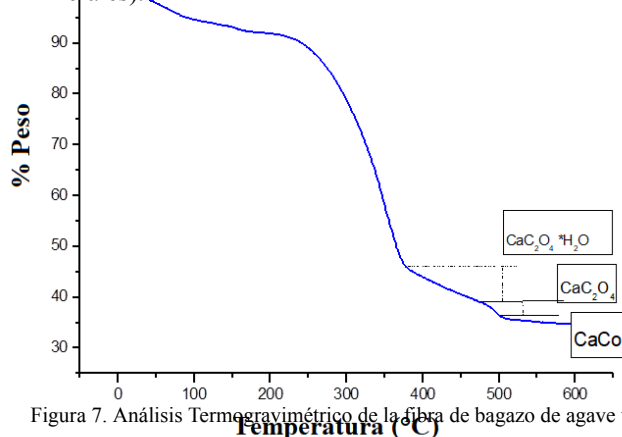


Figura 7. Análisis Termogravimétrico de la fibra de bagazo de agave tratada.

3.5. Propiedades Mecánicas

La Figura 8 presenta una probeta de material compuesto elaborado a partir de polietileno de baja densidad reforzado con bagazo de agave, utilizada en el ensayo de microtracción. Se aprecia que las fibras de refuerzo se encuentran homogéneamente dispersas dentro de la matriz polimérica.

Figura 8. Probeta para ensayo de microtracción. Dimensiones (mm) según ASTM D-1708.

Los resultados de los ensayos de tracción (Tabla 1) demuestran que el tratamiento alcalino y el tamaño de partícula influyeron significativamente ($p < 0.05$, ANOVA unidireccional) en las propiedades mecánicas de los compuestos. El análisis estadístico reveló una variabilidad diferenciada entre las formulaciones, siendo la muestra con 20% de fibra tratada y malla 40 la que presentó el mejor desempeño mecánico.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de compuestos de PEBD/bagazo de agave con tratamiento alcalino.

(Valores expresados como media \pm desviación estándar; $n=3-4$ réplicas)

Malla	% Fibra	Resistencia (MPa)	Módulo (MPa)	Elongación (%)
-	0	12.10 \pm 1.37	210 \pm 15	45.2 \pm 3.1
40	10	13.40 \pm 0.10	320 \pm 25	38.5 \pm 2.8
40	20	16.40 \pm 1.31	385 \pm 28	12.3 \pm 1.1
40	30	13.60 \pm 0.82	355 \pm 22	10.8 \pm 0.9
60	10	13.40 \pm 2.13	305 \pm 30	35.2 \pm 3.2
60	20	12.60 \pm 1.48	325 \pm 22	15.8 \pm 1.3
60	30	12.70 \pm 0.83	340 \pm 26	14.2 \pm 1.0
100	10	10.70 \pm 0.71	280 \pm 20	32.5 \pm 2.5
100	20	10.60 \pm 0.87	295 \pm 20	18.4 \pm 1.5
100	30	12.00 \pm 1.35	315 \pm 24	16.1 \pm 1.2

Las fibras sin tratamiento no superaron la resistencia del PEBD puro (12.1 MPa), debido a la incompatibilidad

interfacial y la presencia de impurezas (ceras, lignina). En cambio, las fibras tratadas con NaOH mostraron una mejora significativa, alcanzando un máximo de 16.4 ± 1.31 MPa (incremento del 36.6% respecto al PEBD) para la formulación con 20% de fibra y malla 40. Este mejoramiento se atribuye a la mejor adhesión interfacial y a la efectiva transferencia de carga desde la matriz hacia las fibras. El tratamiento alcalino elimina componentes no celulósicos, expone fibrillas de celulosa y aumenta la rugosidad superficial, mejorando el anclaje mecánico con la matriz polimérica.

Se observó un óptimo de refuerzo al 20% de fibra. A mayor contenido (30%), la resistencia disminuyó debido a la aglomeración de fibras y mala dispersión, observable en el aumento de la desviación estándar en algunas formulaciones.

El tamaño de partícula mostró un efecto crucial en el desempeño mecánico:

- Malla 40 (425 μm): Mayor resistencia debido a la mejor transferencia de carga y mayor relación de aspecto de las fibras.
- Malla 100 (150 μm): Peor desempeño (10.6-12.0 MPa). Las partículas demasiado finas actúan como defectos y no como refuerzo efectivo, consistentemente mostrando las menores resistencias.

3.5.1. Análisis estadístico

El análisis ANOVA confirmó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los grupos. El test post-hoc de Tukey mostró que:

- La resistencia del compuesto con 20% fibra/malla 40 fue significativamente mayor que todas las demás formulaciones.
- No hubo diferencia significativa entre el PEBD puro y las fibras sin tratamiento.
- Las muestras con malla 100 mostraron valores significativamente menores que sus contrapartes de malla 40.

La variabilidad de los datos (desviación estándar) fue consistentemente menor para las formulaciones con malla 40 (0.10-1.31 MPa) comparada con malla 60 (0.83-2.13 MPa), indicando una mejor reproducibilidad y distribución homogénea de las fibras de mayor tamaño.

3.6. Densidad de los compuestos

La densidad disminuyó significativamente con el aumento del contenido de fibra:

- PEBD puro: 0.92 ± 0.01 g/cm³
- Compuestos: 0.58-0.68 g/cm³ (reducción del 26-37%)

Esta reducción representa una ventaja significativa para aplicaciones donde el peso es crítico. La menor densidad de las fibras naturales (~ 1.3 - 1.5 g/cm³) comparada con cargas inorgánicas típicas (> 2.0 g/cm³) permite fabricar materiales más ligeros.

4. Discusión de resultados

El tratamiento alcalino con Hidróxido de sodio (NaOH) eliminó parcialmente hemicelulosa y lignina del bagazo de agave, lo que generó fibras más limpias y desfibriladas, con depósitos visibles de Oxalato de calcio monohidratado detectados por Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) y Difracción de rayos X (DRX).

Los análisis por Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y Análisis termogravimétrico (TGA) confirmaron la reducción de componentes amorfos y un mayor aporte relativo de celulosa.

Estos cambios estructurales y composicionales se tradujeron directamente en el desempeño mecánico de los compuestos de Polietileno de baja densidad (PEBD) reforzados con bagazo tratado. La mejor combinación de propiedades se obtuvo con 20 % en peso y partículas grandes (malla 40), donde la resistencia a la tensión aumentó 36.6 % y el módulo de Young también se incrementó, reflejando una transferencia de esfuerzos más eficiente gracias a la mejor adhesión matriz-fibra. En contraste, las partículas finas (malla 100) o las altas cargas (30 %) redujeron la resistencia y la ductilidad, lo que puede atribuirse a la aglomeración de partículas y la formación de vacíos, en concordancia con la reducción de densidad (0.58–0.68 g/cm³) observada. Este efecto de fragilización también se evidenció en la disminución del porcentaje de deformación con cargas elevadas, mientras que a bajas cargas (10 %) algunas formulaciones mostraron un aumento de deformación, posiblemente por un efecto toughening asociado a la dispersión de microdefectos.

En conjunto, la convergencia de resultados de FTIR, SEM/EDS, TGA y DRX demuestra que el tratamiento con NaOH promueve la remoción selectiva de componentes amorfos y la exposición de la celulosa, al tiempo que hace visibles y concentrados los depósitos minerales de Ca, lo cual mejora la interacción con la matriz de PEBD y eleva la resistencia y rigidez de los compuestos cuando se optimizan la fracción de carga y el tamaño de partícula.

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado en la literatura sobre refuerzo de matrices poliméricas con fibras lignocelulósicas. Faruk *et al.* (2012) destacan que la incorporación de fibras naturales en matrices termoplásticas mejora la rigidez y la resistencia mecánica, aunque a costa de una disminución en la elongación, comportamiento que también se observó en este estudio. De manera similar, Espinoza-Hernández *et al.* (2021) reportaron que el tratamiento alcalino promueve una mejor adhesión interfacial al eliminar componentes amorfos de la fibra, lo que coincide con el incremento en resistencia a la tensión observado en los materiales compuestos con mayor contenido de fibra tratada. En relación con sistemas basados en agave, Benítez *et al.* (2013, 2017) evidenciaron mejoras en propiedades mecánicas al optimizar el contenido y tamaño de fibra, resultados comparables a las tendencias observadas en los materiales compuestos desarrollados en este trabajo.

5. Conclusiones

La incorporación de fibras de bagazo de Agave salmiana en una matriz de PEBD permitió obtener materiales compuestos ligeros con propiedades mecánicas mejoradas respecto al polímero puro. El tratamiento alcalino con NaOH favoreció la eliminación parcial de lignina y hemicelulosa,

generando superficies más rugosas y con mayor disponibilidad de grupos hidroxilo, lo que mejoró la adhesión fibra-matriz.

Los ensayos de tensión confirmaron un incremento máximo del 36.6 % en la resistencia a la tracción y del 22 % en el módulo de Young en el material compuesto con 20 % de fibra tratada (malla 40), comparado con PEBD sin refuerzo. La elongación a la rotura disminuyó con el aumento en la fracción de fibra, comportamiento esperado en materiales compuestos con refuerzo lignocelulósico.

Los análisis térmicos (TGA) mostraron que el tratamiento alcalino reduce la estabilidad de la fibra, aunque los materiales compuestos mantienen un desempeño aceptable para aplicaciones de mediana temperatura.

El análisis DRX reveló la persistencia de fases cristalinas como oxalato de calcio y carbonato de calcio, mientras que FTIR corroboró la reducción de grupos funcionales de lignina tras el tratamiento químico.

Desde el punto de vista de densidad, los materiales compuestos presentaron reducciones de hasta 37 % respecto al PEBD, lo que los posiciona como candidatos atractivos para aplicaciones donde se requieren materiales estructuralmente ligeros.

Este estudio aporta una estrategia de valorización del bagazo de agave mezcalero, un residuo agroindustrial generado en grandes volúmenes en México, integrándolo en materiales compuestos con potencial en sectores como la construcción ligera, mobiliario y productos de consumo sustentables.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por el apoyo financiero y los recursos proporcionados a través del proyecto 00489-PV/2024, titulado: "Obtención y síntesis de materiales aplicados en salud, medio ambiente y alimentos".

Referencias

- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Asim, M., Jawaid, M., Nasir, M., & Saba, N. (2018). Potential of natural fiber/biomass filler-reinforced polymer composites in aerospace applications. In M. Jawaaid & M. Thariq (Eds.), *Sustainable Composites for Aerospace Applications* (pp. 253–270). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00011-2>
- Benítez, A. N., Montero, B., Díaz, M. J., Viña, J., & Chávez, J. A. (2013). Agave tequilana Weber var. Azul fiber: A potential reinforcement for polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, 91(1), 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.008>
- Benítez, A. N., Viña, J., Chávez, J. A., & García, R. (2017). Effect of fiber extraction method on properties of Agave tequilana Weber var. Azul fiber. *Fibers and Polymers*, 18(3), 581–588. <https://doi.org/10.1007/s12221-017-6955-8>
- Caché Escamilla, G. (2010). Aprovechamiento de residuos fibrosos de bagazo de agave para la obtención de elementos en la industria de la construcción. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
- Chávez-Guerrero, L., Sepúlveda-Guzmán, S., Silva-Mendoza, J., & Aguilar-Flores, C. (2017). Characterization of lignocellulosic components from agave bagasse and their potential use for biofuel production. *BioResources*, 12(2), 2553–2565.
- de Anda-Rodríguez, F. A., Corona-Ramírez, M. R., Patiño-Arévalo, C. D., Zárate-Navarro, M. A., Zárate-Guzmán, A. I., & Romero-Cano, L. A. (2024). Mycomaterials from Agave Bagasse: A Valorization Strategy for Sustainable Tequila Packaging. *Fermentation*, 11(7), 399. <https://doi.org/10.3390/fermentation11070399>
- Espinoza-Hernández, J. C., Rodríguez-Macias, R., López-Dellamary, F. A., & González-García, Y. (2021). Agave: A natural renewable resource with multiple applications. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128498>
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: Progress and future directions. *Progress in Polymer Science*, 37, 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- George, A., Sanjay, M. R., Srisuk, R., Parameswaranpillai, J., & Siengchin, S. (2020). A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.120>
- Global Press Journal. (2023). Twice distilled: Mezcal makers recycle spirit's vast waste. <https://globalpressjournal.com/americas/mexico/twice-distilled-mezcal-makers-recycle-spirits-vast-waste>
- Gómez-Vargas, J. L., Alaniz-Villanueva, O. G., Herrera-Gamboa, J., & Silva-Marrufo, O. (2024). Financial evaluation of agave mezcalero bagasse (Agave durangensis) as a substrate for the production of vegetables. *Journal of Applied Research and Technology*, 22(3), e768. <https://doi.org/10.60968/iaet.3504-035X.768>
- INEGI. (2023). Industria de bebidas alcohólicas en México: estadísticas económicas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Joseph, K., Thomas, S., & Pavithran, C. (1996). Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fiber-reinforced polyethylene composites. *Polymer*, 37(23), 5139–5149. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)00144-9](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)00144-9)
- Li, X., Tabil, L. G., & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>
- Mwaikambo, L. Y., & Ansell, M. P. (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, 84(12), 2222–2234. <https://doi.org/10.1002/app.10460>
- Pérez Díaz, S. (2021). Residuos de agave en el proceso de producción de mezcal artesanal en el valle de Tehuacán-Cuicatlán (Tesis de especialización). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Biológicas, Cuernavaca, Morelos, México.
- Pickering, K. L., Aruan Efendy, M. G., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites – a review. *Journal of Composite Materials*, 46(8), 973–986. <https://doi.org/10.1177/0021998311413623>