



## Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica

### Colombian vegetal fibers as a reinforcement in polymeric matrix composites

José Luis Suarez Castañeda<sup>1</sup>, José William Restrepo Montoya<sup>2</sup>, Adriana Quinchía Figueroa<sup>3</sup>, Fredy Andrés Mercado Navarro<sup>4</sup>

**Fecha de recepción:** 21 de abril de 2016

**Fecha de aceptación:** 23 de noviembre de 2016

**Cómo citar:** Suarez C., J.L.; Restrepo M., J.W.; Quinchía F., A. y Mercado N., F.A. (2017). Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica. *Revista Tecnura*, 21(51), 57-66. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a04

#### Resumen

**Contexto:** Se realizó una búsqueda local de tejidos de fibras vegetales para determinar la composición de los grupos funcionales y morfología de su superficie antes y después de un tratamiento alcalino con miras a su empleo como refuerzo en compuestos de matriz polimérica.

**Método:** La búsqueda se desarrolló dentro del área metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia. Las fibras se trataron por inmersión en NaOH disuelto al 6 % w/v por 48 horas, seguida por una neutralización en ácido acético al 1 % v/v por una hora. Posteriormente fueron secadas a 60 °C por 24 horas. Las técnicas empleadas para los análisis fueron la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y la microscopía electrónica de barrido (SEM).

**Resultados:** Se seleccionaron tejidos de fique, yute, corteza de coco, lino y algodón. Los análisis FTIR muestran una tendencia a la disminución de ácidos grasos, hemicelulosas, ligninas y enlaces  $\beta$  en la superficie de las fibras, mientras que las imágenes

SEM demuestran la remoción de impurezas, la exposición de rugosidades y la creación de espacios interfibras.

**Conclusiones:** El tratamiento alcalino podría favorecer el mecanismo de anclaje del polímero termofijo a la superficie de las fibras y la creación de enlaces entre las moléculas polares de las fibras y el polímero termofijo, disminuyendo el deslizamiento relativo entre matriz y refuerzo durante la aplicación de cargas.

**Palabras clave:** alcalinización, compuestos poliméricos, FTIR, propiedades físicas, polímeros termofijos, SEM, tejidos vegetales.

#### Abstract

**Context:** This research focuses on determining the surface composition of different plant fibers in order to evaluate their possible use as reinforcement in polymer matrix composites. For this, a search was made for several types of fibers, as well as an analysis of their morphology before and after alkaline treatment.

- 1 Ingeniero mecánico, magíster en Ingeniería. Docente de la Universidad EIA, Envigado, Colombia. Contacto: [jose.suarez@eia.edu.co](mailto:jose.suarez@eia.edu.co)
- 2 Ingeniero metalúrgico, doctor en Ingeniería. Docente de la Universidad EIA, Envigado, Colombia. Contacto: [jose.restrepo15@eia.edu.co](mailto:jose.restrepo15@eia.edu.co)
- 3 Ingeniera agrícola, especialista en Ingeniería Ambiental, magíster en Ingeniería Ambiental, doctora en Ingeniería. Docente de la Universidad EIA, Envigado, Colombia. Contacto: [adriana.quinchia@eia.edu.co](mailto:adriana.quinchia@eia.edu.co)
- 4 Ingeniero mecánico, magíster en Simulación Numérica y Control. Investigador y docente de cátedra de la Universidad EIA, Envigado, Colombia. Contacto: [fredy.mercado@eia.edu.co](mailto:fredy.mercado@eia.edu.co)

**Method:** The search was carried out within the metropolitan area of the Aburrá Valley, Colombia. For the treatment of the fibers, we performed, in first place, an immersion in dissolved NaOH at 6% w/v for 48 hours; secondly, a neutralization in 1% v/v acetic acid for one hour; and thirdly, they were dried at 60°C for 24 hours. Additionally, the techniques used for the analyzes were Fourier Transform Infra-red Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM).

**Results:** Fique, Jute, Coconut husk, Flax and Cotton fiber fabrics were selected. FTIR analyzes show a trend towards the decrease of fatty acids, hemicellulose, lignins and  $\beta$ -bonds on the surface of the fibers,

whereas SEM images show the removal of impurities, the exposure of roughness, and the creation of interfibril spaces.

**Conclusions:** Alkaline treatment could favor both the anchoring mechanism of the thermosetting polymer to the surface of the fibers and the creation of bonds between the polar molecules of the fibers and the thermosetting polymer. This could reduce the relative slip between matrix and reinforcement during the application of loads.

**Keywords:** alkalization, polymeric composites, FTIR, physical properties, thermoset polymers, SEM, vegetal fabrics.

## INTRODUCCIÓN

Los costos económicos y medioambientales de la producción de fibras sintéticas, la preocupación por la sostenibilidad y el cambio climático, y la necesidad de materiales de alto desempeño, están motivando la búsqueda de fibras alternativas para ser empleadas como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica (Castaño, Robayo y Sánchez, 2013). En este estudio se buscan tejidos vegetales disponibles en el área metropolitana del Valle de Aburrá (Antioquia) y se estudian los grupos funcionales y los cambios morfológicos de los tejidos antes y después de un tratamiento químico de alcalinización (Shenouda, 1979). Este tratamiento favorece la adhesión entre las fibras vegetales (polares) y los polímeros termofijos (también polares) como las resinas insaturadas de poliéster, epóxicas y fenoles. Las fibras vegetales están compuestas de celulosa, hemicelulosa y lignina, y por otros componentes que se consideran impurezas de la superficie, como pectinas y ceras. El contenido de humedad también desempeña un rol importante en la composición de una fibra y sus propiedades (Lamus, Plazas y Luna, 2015), al igual que en la compatibilidad con la matriz. Por otro lado, un contenido alto de celulosa conlleva a

una rigidez más alta y, por consiguiente, a ser una característica preferible para usar una fibra vegetal como refuerzo (Mwaikambo, 2002).

El interés actual por los refuerzos de fibras vegetales en compuestos de matriz polimérica se refleja en varios estudios: Aziz y Ansell (2004) mencionan un material compuesto por fibras de cáñamo y poliéster; Siva, Sankar, Amico y Ravindran (2013) abordan el efecto de la fracción de fibras de refuerzo en un compuesto formado por láminas de fibras de corteza de coco en una matriz de poliéster; Gowda, Naidu y Chhaya (1999) analizan las propiedades mecánicas de un compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibras de yute no tratadas; Hossain, Islam, Vuurea y Verpoest (2013) usan refuerzo de yute en una matriz epóxica; Amico, Angrizani y Drummond (2010) emplean fibras de vidrio y sisal como refuerzo de una matriz de poliéster, y Shah, Schubel y Clifford (2013) recurren a tejidos de lino para reforzar una matriz de poliéster y elaborar álabes para aerogeneradores.

En el ámbito colombiano se destacan estudios, como los de Moreno y Trujillo (2007), quienes analizan las características de haces de fibra de guadua angustifolia, para evaluar la factibilidad de usarlos como posible refuerzo en compuestos; Cuéllar y Muñoz (2010), quienes abordan

refuerzos de guadua en una matriz de poliéster, y Mejía (2010), quien procesa y caracteriza fibras de bambú para ser usadas con el mismo fin. Los resultados de este estudio sugieren que la alcalinización podría mejorar las propiedades del compuesto en comparación con compuestos de fibras no tratadas.

## METODOLOGÍA

Los tejidos vegetales utilizados en este estudio fueron buscados en puntos de venta dentro del área metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia. Una vez determinadas las fibras vegetales disponibles en el mercado como fibras tejidas o no tejidas, se seleccionaron cinco de ellas con base en la resistencia a la tensión reportada en fuentes como Ken-gkhetkit y Amornsakchai (2012), y Chand y Fahim (2008).

La literatura sobre el tratamiento químico de fibras vegetales es extensa, siendo el proceso de alcalinización el más utilizado para remover hemicelulosas, ligninas y demás ácidos grasos y monosacáridos de la superficie de las fibras vegetales. Por otro lado, el estudio realizado por Le-Troedec *et al.* (2011) sugiere que la alcalinización es más efectiva para aumentar la fuerza de adhesión con la matriz polimérica por encima de otros procesos de tratamiento que usan polietilenimina (PEI) o ácidos como el EDTA. El tratamiento químico de las fibras consistió en agitarlas por 48 horas en solución de hidróxido de sodio (NaOH) disuelto al 6 % w/v en agua destilada (pH cercano a 14) (Aziz y Ansell, 2004; Mwaikambo, 2002). Pasadas 48 horas, los tejidos se extrajeron de la solución de NaOH y se sometieron a neutralización del pH alcalino, sumergiendo las fibras en una solución de ácido acético al 1 % en volumen por una hora (Terpáková *et al.*, 2012). Tras este periodo, los tejidos fueron retirados y lavados con abundante agua desionizada hasta que el pH del baño fuera lo más neutro posible (Le-Troedec *et al.*, 2011). Seguidamente, los tejidos se secaron en un horno a 60 °C durante 24 horas, tras lo cual fueron empacados

en bolsas impermeables con cierre hermético (Ziploc®) y almacenados en un lugar fresco y seco (Sever *et al.*, 2012).

Los grupos funcionales presentes en la superficie de cada tipo de fibra antes y después del tratamiento se identificaron mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR, por su sigla en inglés) usando un equipo Perkin Elmer Spectrometer 100. Se empleó una pequeña cantidad de fibras, las cuales fueron cortadas y apiladas en pequeños montículos y luego presionadas hasta alcanzar un espesor cercano a 1 mm.

Se obtuvieron también imágenes de las fibras antes y después del tratamiento usando microscopía electrónica de barrido (SEM, por su sigla en inglés) para dilucidar posibles cambios morfológicos en las fibras inducidos por el tratamiento químico. Para ello se utilizó un equipo JEOL JSM-6490LV. Antes de las observaciones, las muestras fueron recubiertas por una fina capa de oro mediante un equipo de deposición al vacío Denton Vacuum Desk IV.

## RESULTADOS

Las fibras vegetales seleccionadas para este estudio fueron las de fique, yute, corteza de coco, lino y algodón. Los tejidos de fibra de fique fueron suministrados por la empresa Comercializadora de Empaques S y S S.A.S.; los de fibra de yute, por Agroempaques S.A. en forma de bolsas o costales; la lámina no tejida de fibras aglomeradas de corteza de coco fue adquirida en Textec de Colombia S.A.S., y los tejidos de fibras de lino y algodón (lona costeña) en Telas El Faisán S.A. Se encontró que la venta de tejidos de fibras vegetales autóctonas está focalizada en unos pocos negocios dentro de las centrales de abasto, en tiendas de artesanías, tiendas textiles, plazas de mercado, tiendas de productos ecológicos y a través de proyectos de emprendimiento como Textec de Colombia S.A.S e Hilco Fibras Naturales S.A. Las fibras vegetales de interés y dos de sus propiedades mecánicas están resumidas en la tabla 1.

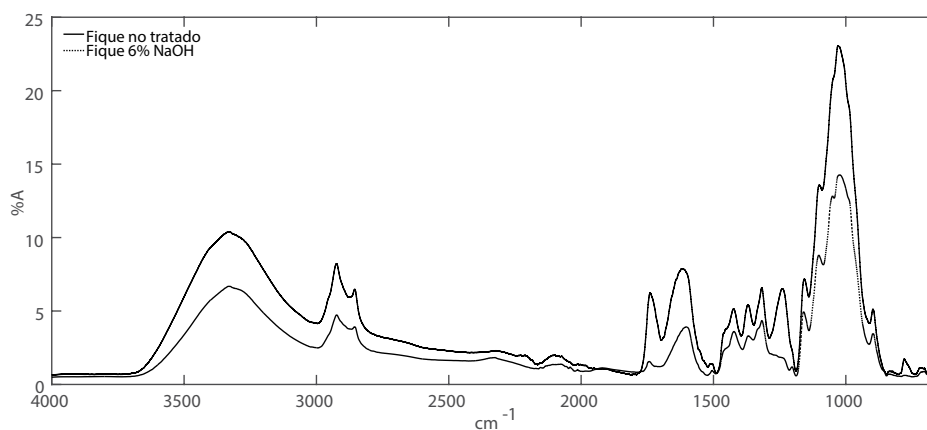
**Tabla 1.** Propiedades mecánicas de las fibras vegetales seleccionadas

Fibra vegetal	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo de Young [GPa]
Lino	450-1100	27,6
Algodón	287-800	5,5-12,6
Yute	393-773	13-26,5
Fique	511-635	9,4-22
Corteza de coco	131-175	4-6

**Fuente:** Kengkhetkit y Amornsakchai (2012); Chand y Fahim (2008).

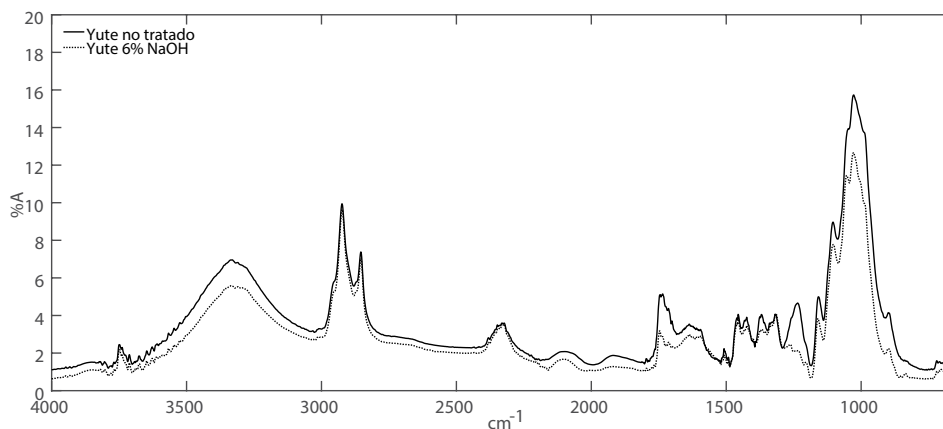
En las figuras 1 a 5 se aprecia el espectro infrarrojo de absorbancia de las muestras de fibras vegetales, donde una curva indica la fibra sin tratamiento químico y la restante la misma fibra tratada con la solución de NaOH al 6 % w/v. Las figuras 1, 2 y 3 corresponden a las fibras de fique, yute y corteza de coco.

La influencia del tratamiento químico es más notoria para el fique, el yute y el coco que en el caso del lino (figura 4) y el algodón (figura 5).



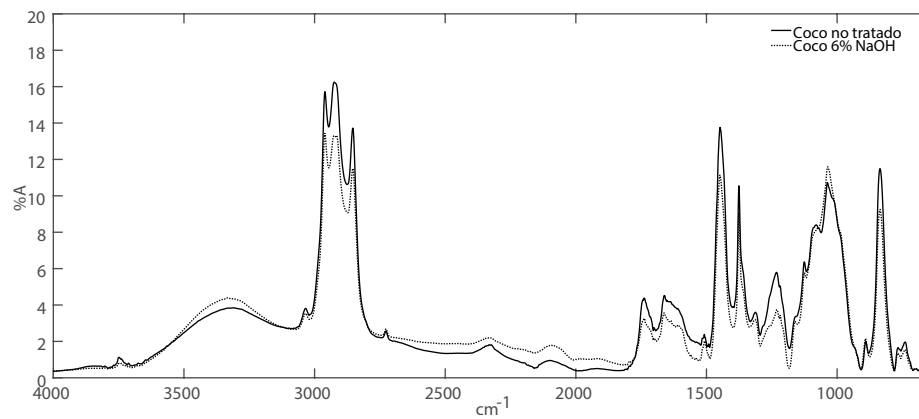
**Figura 1.** FTIR de fibras de fique con y sin tratamiento químico

**Fuente:** elaboración propia.



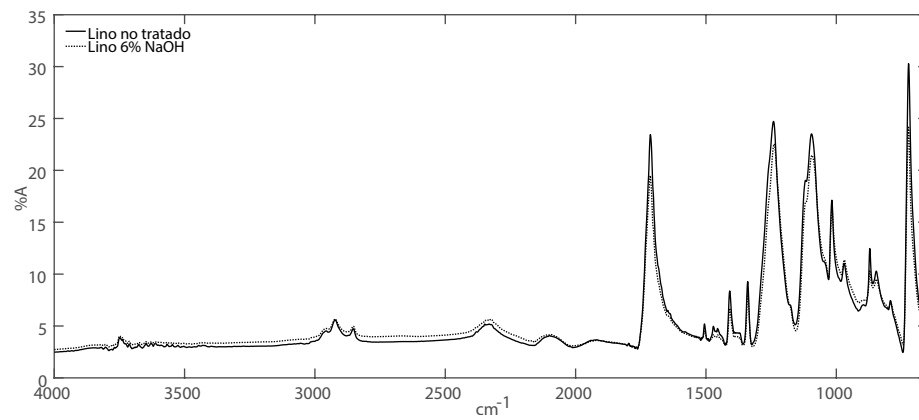
**Figura 2.** FTIR de fibras de yute con y sin tratamiento químico

**Fuente:** elaboración propia.



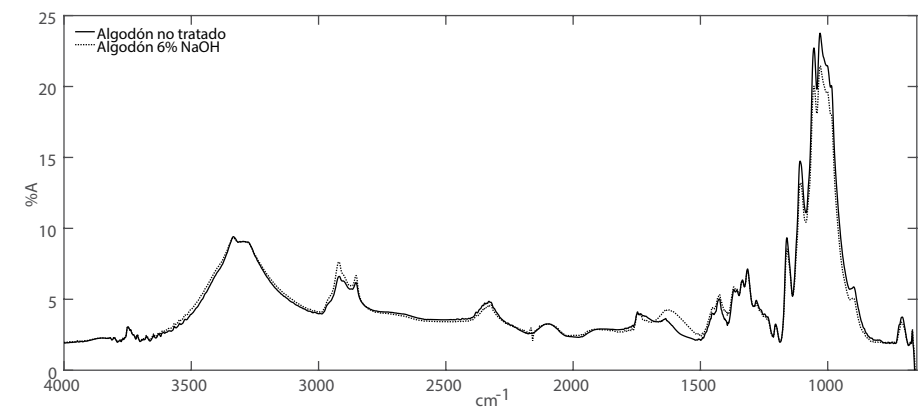
**Figura 3.** FTIR de fibras de corteza de coco con y sin tratamiento químico

Fuente: elaboración propia.



**Figura 4.** FTIR de fibras de lino con y sin tratamiento químico

Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.** FTIR de fibras de algodón con y sin tratamiento químico

Fuente: elaboración propia.

La tabla 2 presenta una comparación entre las tendencias obtenidas para cada tipo de fibra al tratarlas químicamente, donde "A, Y, L, F, C" corresponden con algodón, yute, lino, fique y corteza de coco, mientras que "A, =, D" indican que la concentración de los grupos funcionales correspondientes (absorbancia) aumenta, permanece igual y disminuye, respectivamente. Las figuras 6, 8, 9 y 10 presentan imágenes SEM de las fibras tratadas y no tratadas de algodón, corteza de coco, fique y yute, respectivamente.

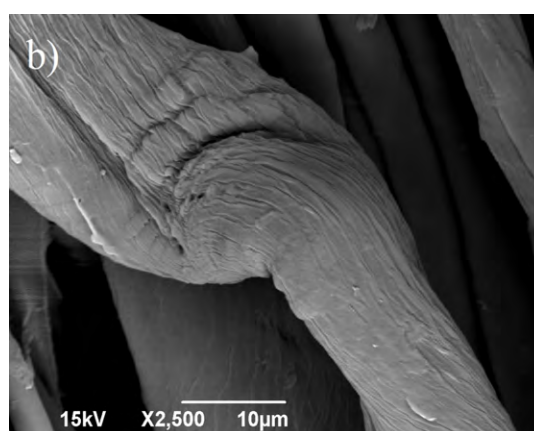
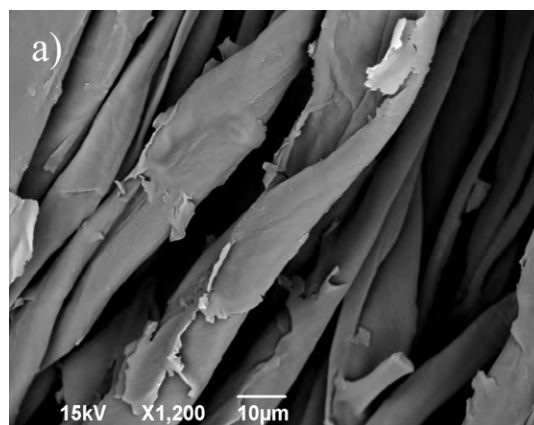
**Tabla 2.** Comparación entre tendencias propuestas por (Mwaikambo, 2002) y estudio actual

Frecuencia [cm <sup>-1</sup> ]	(Mwaikambo, 2002)	Al	Y	L	F	C
Ácidos grasos						
3200-3600	D	=	D	A	D	A
1736-1740	D	=	D	=	D	D
1596	D	A	D	D	D	D
Hemicelulosas						
1654	D	A	D	D	D	D
1000-1500	D	D	D	D	D	D
1245-1259	D	=	D	D	D	D
Ligninas						
1384	D	A	D	D	D	=
Enlaces β-glicosídicos						
898	D	D	D	A	D	=

**Fuente:** elaboración propia a partir de Mwaikambo (2002).

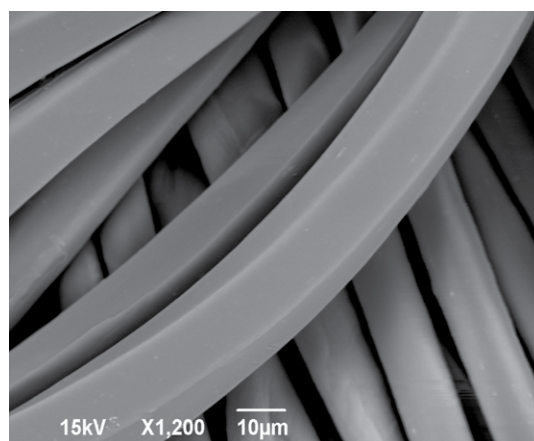
En la figura 6a se pretende mostrar el recubrimiento que envuelve a la fibra de algodón antes del tratamiento, mientras que en la figura 6b, la textura presente en la superficie.

En la figura 7 se aprecia una imagen SEM de fibras de lino no tratadas. Las fibras alcalinizadas presentan una apariencia muy similar y, por ello, no se presentan.



**Figura 6.** Imagen SEM de fibras de algodón: a) sin tratamiento y b) con tratamiento

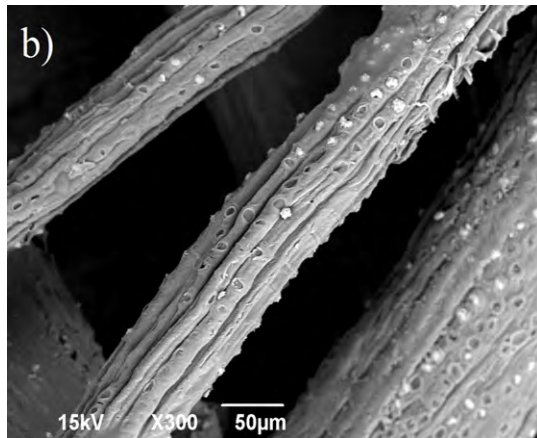
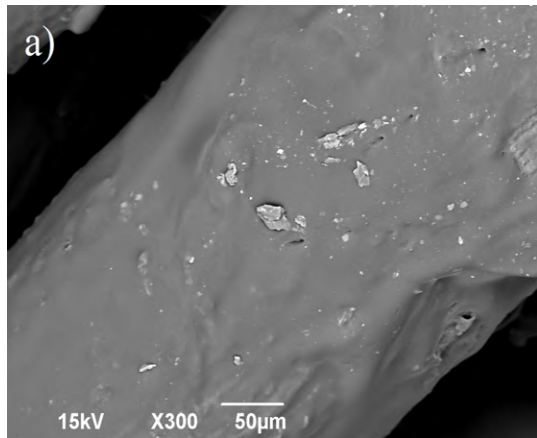
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 7.** SEM de fibras de lino sin tratamiento

**Fuente:** elaboración propia.

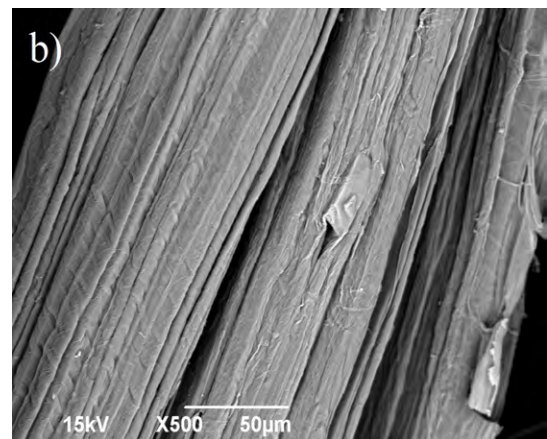
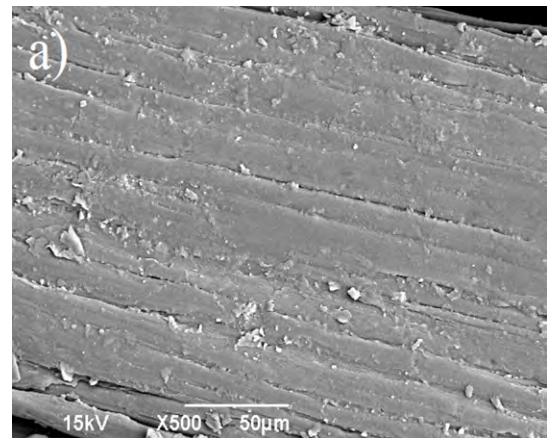
En la figura 8a se aprecia una fibra de corteza de coco completamente cubierta por impurezas, mientras que en la figura 8b observamos una superficie limpia y con una textura rugosa.



**Figura 8.** Imagen SEM de fibras de corteza de coco: a) sin tratamiento y b) con tratamiento

**Fuente:** elaboración propia.

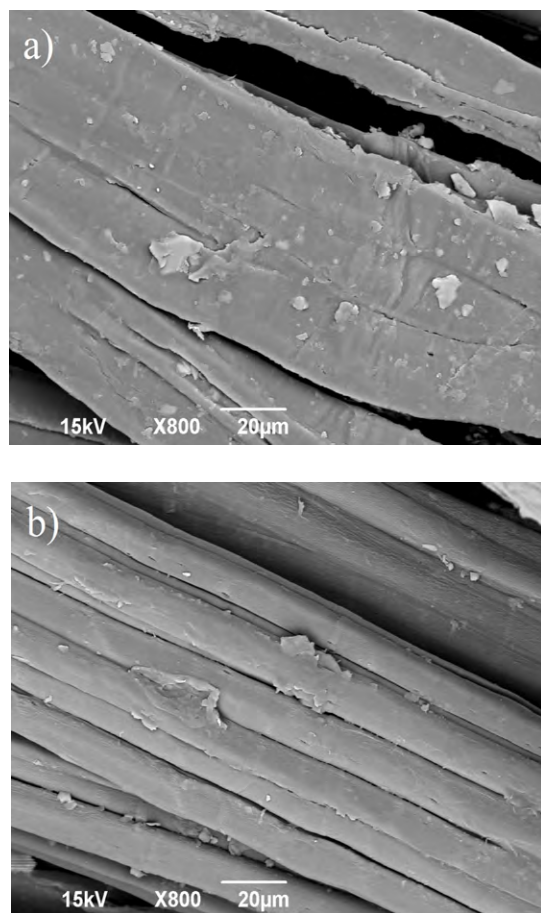
En la figura 9 también podemos apreciar la remoción de impurezas y aumento en la textura de la superficie de la fibra de fique con el tratamiento alcalino.



**Figura 9.** Imagen SEM de fibras de fique: a) sin tratamiento y b) con tratamiento

**Fuente:** elaboración propia.

El cambio en las fibras de yute se muestra en la figura 10. La limpieza de la superficie evidencia una subdivisión de cada fibra en otras fibras de menor diámetro y la creación de espacios interfibrilares.



**Figura 10.** Imagen SEM de fibras de yute: a) sin tratamiento y b) con tratamiento

**Fuente:** elaboración propia.

Las imágenes SEM presentadas evidencian los cambios morfológicos de la superficie de las fibras. La remoción de impurezas es más evidente en las figuras 8, 9 y 10, que corresponden a las fibras de corteza de coco, fique y yute, es decir, aquellas adquiridas en forma de tejidos para costales o de láminas no tejidas con fibras orientadas aleatoriamente, como en el caso del coco.

## CONCLUSIONES

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) permitió obtener los picos de absorbancia de interés para el estudio, que

corresponden a las frecuencias de los grupos hidroxilos (-OH), carboxilos, carbonilos, lignina y enlaces  $\beta$ -glicosídicos, los cuales han sido reportados en el estudio realizado por Mwaikambo (2002). Las tendencias con el tratamiento alcalino deberían ser las siguientes: reducción de grupos OH de las hemicelulosas debido a la reacción con el NaOH, que se evidencia a longitudes entre  $1.000$  y  $1.500$   $\text{cm}^{-1}$ . Reducción de ácidos grasos por la disminución de los picos entre  $3.200$  y  $3.600$   $\text{cm}^{-1}$ . Reducción de trazas de ácidos grasos (grupo carboxílico) por disminución de pico entre  $1.736$  y  $1.740$   $\text{cm}^{-1}$ . Reducción de hemicelulosas por disminución del pico alrededor de  $1.654$   $\text{cm}^{-1}$  (reducción de enlaces C=O). Reducción de ácidos grasos por disminución del pico en  $1.596$   $\text{cm}^{-1}$ . Reducción de ligninas y hemicelulosas debido a la disminución de los picos en  $1.384$  y entre  $1.245$  y  $1.259$   $\text{cm}^{-1}$ , respectivamente. Por último, la reducción de intensidad del pico en  $898$   $\text{cm}^{-1}$ , el cual indica la presencia de enlaces  $\beta$ -glicosídicos entre monosacáridos (azúcares simples). Al observar los resultados, tenemos que las fibras de fique, yute y coco presentan una mayor afinidad con los reactivos, seguidas del algodón y el lino. La poca variación entre los espectros infrarrojos de estos dos tipos de fibra puede presentarse como una evidencia de la influencia que tienen los tratamientos de estas fibras previos a su comercialización. El uso de ácidos, álcalis (como el NaOH), sales y agentes oxidantes son químicos de uso común para el descrude, blanqueo y teñido de fibras vegetales (Locuán, 2012).

Las imágenes SEM de las fibras de corteza de coco, fique y yute (figuras 8-10) muestran que el tratamiento cambia significativamente la morfología de la superficie. Se evidencia que el tratamiento remueve impurezas, de manera efectiva, lo cual genera un aspecto más limpio, con interfaces de separación entre fibrillas individuales y con una superficie aserrada en el caso del algodón, el coco y el fique. Con respecto a las fibras de lino, es posible que los tratamientos previos, comentados en el párrafo anterior, hayan removido la mayoría de



las grasas y azúcares, lo que evidenció un cambio nulo entre la imagen sin tratamiento (figura 10) y con tratamiento alcalino (no mostrada).

Con el tratamiento alcalino en solución de NaOH al 6 % w/v se consiguió remover ligninas, pectinas, hemicelulosas y otras impurezas de la superficie de las fibras vegetales. Por un lado, el tratamiento promueve la formación de enlaces entre materiales polares como la celulosa y la mayoría de polímeros termofijos (Rothon, 2016), mientras que, por otro, la exposición de rugosidades y creación de espacios interfibras favorece el mecanismo de anclaje del polímero a las fibras, beneficiando la transferencia de carga entre matriz y refuerzo durante la aplicación de cargas. En este sentido, el tratamiento alcalino sobre fibras vegetales supone mejorar las propiedades mecánicas de un compuesto elaborado con refuerzo de fibras tratadas en comparación con uno de fibras no tratadas (Le-Troedec *et al.*, 2011; Avella *et al.*, 1998). Las propiedades mecánicas de un compuesto podrían aprovechar las propiedades de más de un tipo de fibra vegetal.

## FINANCIAMIENTO

Los resultados presentados forman parte del proyecto “Estudio numérico y experimental para determinar los porcentajes de sustitución de fibras sintéticas por fibras vegetales autóctonas usadas como refuerzo de materiales compuestos empleados en la elaboración de aspas de aerogeneradores de eje vertical”. El proyecto ha sido financiado por la Universidad EIA.

## AGRADECIMIENTOS

Se reconoce gratamente el apoyo del personal del Laboratorio de Caracterización de Materiales para las mediciones FTIR, a la Universidad de Antioquia por la prestación del servicio SEM, y los recursos brindados por la Universidad EIA para el desarrollo del proyecto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amico, S.C.; Angrizani, C.C. y Drummond, M.L. (2010). Influence of the stacking sequence on the mechanical properties of glass/sisal hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(2), 179-189.
- Avella, M.; Casale, L.; Dell’erba, R.; Focher, B.; Martuscelli, E. y Marzetti, A. (1998). Broom fibers as reinforcing materials for polypropylene-based composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 1068-1077.
- Aziz, S.H. y Ansell, M.P. (2004). The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: part 2—cashew nut shell liquid matrix. *Composites Science and Technology*, 64, 1231-1238.
- Castaño T., J.O.; Robayo N., E. y Sánchez C., E.H. (2013). Materiales de construcción sostenibles. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros con cenizas volantes activadas alcalinamente. *Revista Tecnura*, 17(2), 79-89.
- Chand, N. y Fahim, M. (2008). *Tribology of natural fiber polymer composites*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
- Cuéllar, A. y Muñoz, I. (2010). Fibra de guadua como refuerzo de matrices poliméricas. *Dyna*, (162), 137-142.
- Gowda, T.M.; Naidu, A.C. y Chhaya, R. (1999). Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 30(3), 277-284.
- Hossain, M.R.; Islam, M.A.; Vuurea, A.V. y Verpoest, I. (2013). Effect of fiber orientation on the tensile properties of jute epoxy laminated composite. *Journal of Scientific Research*, 5(1), 43-53.
- Kengkhetkit, N. y Amornsakchai, T. (2012). Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement: 1. A novel extraction method for short pineapple leaf fiber. *Industrial Crops and Products*, 40, 55-61.
- Lamus B., F.A.; Plazas B., M.A. y Luna T., P. (2015). Resistencia de una conexión pernada solicitada a cizalladura doble paralela a la fibra para estructuras

- de guadua angustifolia. *Revista Tecnura*, 19(43), 52-62.
- Le-Troedec, M.; Rachini, A.; Peyratout, C.; Rossignol, S.; Max, E.; Kaftan, O.; ... Smith, A. (2011). Influence of chemical treatments on adhesion properties of hemp fibres. *Journal of Colloid and Interface Science*, 356, 303-310.
- Lockuán, F. (2012). Tintorería. En: F. Lockuán. *La industria textil y su control de calidad Versión 0.1*. Recuperado de: [https://issuu.com/fidel\\_lockuan/docs/vii\\_la\\_industria\\_textil\\_y\\_su\\_control\\_de\\_calidad](https://issuu.com/fidel_lockuan/docs/vii_la_industria_textil_y_su_control_de_calidad)
- Mejía, M.E. (2010). *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*. Tesis de Maestría. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Moreno, L.E. y Trujillo, E.E. (2007). Estudio de las características físicas de haces de fibra de Guadua Angustifolia. *Scientia et Technica*, (34), 613-617.
- Mwaikambo, L.Y. (2002). Chemical modification of Hemp, Sisal, Jute, and Kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, 84, 2222-2234.
- Rothon, R. (2016). Particulate fillers in thermoset plastics. En: S. Palsule (ed.). *Polymers and Polymeric Composites: A reference series* (pp. 1-15). Berlín: Springer.
- Sever, K.; Sarikanat, M.; Seki, Y.; Erkan, G.; Erdogan, U.H. y Erden, S. (2012). Surface treatments of jute fabric: The influence of surface characteristics on jute fabrics and mechanical properties of jute/polyester composites. *Industrial Crops and Products*, 35, 22-30.
- Shah, D.U.; Schubel, P.J. y Clifford, M.J. (2013). Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study. *Composites: Part B*, 52, 172-181.
- Shenouda, S.G. (1979). The structure of cotton cellulose. En: F. Happey (ed.). *Applied Fibre Science* (pp. 275-309). Vol. 3. Londres: Academic Press.
- Siva, W.; Sankar, I.; Amico, S.C. y Ravindran. (2013). Effect of fiber volume fraction on the mechanical properties of coconut sheath/USP composite. *Journal of Manufacturing Engineering*, 8(1), 60-63.
- Terpáková, E.; Kidalová, L.; Estoková, A.; Cigasová, J. y Stevulová, N. (2012). Chemical modification of hemp shives and their characterization. *Procedia Engineering*, 42, 931-941.

