

Methods of Surface Treatment and its effect on the Physical and Mechanical Properties of Guadua Fibers

Métodos de Tratamiento Superficial y su efecto en las Propiedades Físico Mecánicas de Fibras de Guadua

M. L. Sánchez-Cruz , W. A. Patiño-Castro ; J W. Cárdenas-Pulido 

Abstract— *Abstract—* The use of vegetable fibers as reinforcement of polymeric composites for application in civil engineering requires the implementation of surface modification methods. In this paper the evaluation of the effect of the surface modification on the properties of fibers extracted from the top of Guadua bamboo culm is presented. The fibers were obtained by means of a mechanical crushing process. Surface modification was carried out using two treatment methods: alkaline and plasma treatment. To observe the chemical composition of the fibers and their morphology, images were obtained by means of scanning electron microscopy (SEM). The roughness of the untreated fibers was determined by atomic force microscopy (AFM). The crystallinity index was determined by X-ray diffraction (XRD). The mechanical characterization focused on tensile tests. The results of physical and mechanical characterization allow to verify that when carrying out a superficial treatment it is possible to partially remove the lignin, the hemicellulose and other impurities, which contributes to increase the strength and the roughness of the fibers promoting a better adherence with the resins usually used in the elaboration of composite materials. Fibers treated by plasma showed an increase on the strength and their stiffness values. Results show that by using of this type of treatment is an increase nearest to 25% on the tensile strength of fibers, it is possible.

Index Terms — Composite materials; mechanical properties; physical properties; surface treatments; vegetal fibers.

Resumen— El uso de fibras vegetales como refuerzo de compuestos poliméricos de aplicación en ingeniería civil requiere la implementación de métodos de modificación de su superficie. En este trabajo se presenta la evaluación del efecto de la modificación de la superficie en las propiedades de fibras extraídas del varillón de culmos de bambú Guadua Angustifolia Kunth. La obtención de las fibras se realizó por medio de un proceso de trituración mecánica. La modificación superficial se realizó utilizando dos métodos de tratamiento: alcalino y tratamiento con plasma. Para observar la composición química de las fibras y su morfología fueron obtenidas imágenes por medio de microscopía electrónica

de barrido (MEB). La rugosidad de las fibras sin tratamiento fue determinada mediante microscopía de fuerza atómica (AFM). El índice de cristalinidad fue determinado mediante Difracción de Rayos X (XRD). La caracterización mecánica se centró en ensayos de resistencia a tensión. Los resultados de la caracterización física y mecánica permiten comprobar que al realizar un tratamiento superficial es posible remover parcialmente la lignina, la hemicelulosa y otras impurezas, lo cual contribuye a incrementar la resistencia y la rugosidad de las fibras promoviendo una mejor adherencia con las resinas usadas habitualmente en la elaboración de materiales compuestos. Fibras tratadas con plasma mostraron un incremento en su resistencia y rigidez.

Los resultados obtenidos demuestran que al emplear este tipo de tratamiento, es posible incrementar la resistencia a tensión de las fibras hasta en un 25%.

Palabras clave— Materiales compuestos; propiedades mecánicas; propiedades físicas; tratamientos superficiales; fibras vegetales.

I. INTRODUCCIÓN

La aplicación de materiales compuestos reforzados con fibras vegetales se ha incrementado de manera significativa en el área de la construcción. La combinación de fibras vegetales y una resina polimérica para la elaboración de compuestos, promueve el desarrollo de materiales alternativos, competitivos en términos de resistencia mecánica y durabilidad y contribuye a la reducción de los niveles de toxicidad generados el empleo de fibras sintéticas, mitigando el impacto ambiental generado por el empleo de refuerzos convencionales [1-5].

Las fibras vegetales son menos densas que la mayoría de las fibras sintéticas utilizadas como refuerzo de materiales compuestos [6-8]. Esta propiedad hace que este tipo de refuerzo sea una opción viable desde el punto de vista económico y

This manuscript was sent on Jan 25, 2019 and accepted on March 12, 2020.

This work was supported by group in Structures and seismic, faculty of Engineering of the Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

Res

Martha L. Sánchez professor and research of the Civil engineering Program at Universidad Militar Nueva Granada, Carrera 11 # 101-80, Bogotá, Colombia (martha.sanchez@unimilitar.edu.co).

William Patiño Young research at the Universidad Militar Nueva Granada, Carrera 11 # 101-80, Bogotá, Colombia (u1101753@unimilitar.edu.co).

Jhon W. Cárdenas research associate at the Universidad Militar Nueva Granada,

Carrera 11 # 101-80, Bogotá, Colombia (u1100907@unimilitar.edu.co).



técnico, fundamentalmente para aquellas aplicaciones en las que se requiere el uso de materiales ligeros, resistentes y duraderos. No obstante, es importante considerar que, por tratarse de un material de origen natural, sus propiedades pueden variar considerablemente en función de su procedencia y del método de extracción empleado para su obtención [8]. Adicionalmente la presencia en la planta de lignina, hemicelulosa, ceras y otras sustancias extraíbles puede ocasionar problemas asociados a falta de adherencia, dando como resultado el desarrollo de una interface fibra-matriz débil y poco resistente.

Existen varios procedimientos para la extracción de fibras vegetales [7]. Uno de los métodos más empleados por su rapidez, sencillez y economía es el método de extracción mecánica. Estudios recientes han demostrado que con el empleo de métodos de extracción mecánica se obtienen haces de fibras cuya textura irregular requiere la realización de un tratamiento superficial que permita la remoción de impurezas que pueden afectar su rendimiento como refuerzo de materiales compuestos poliméricos [7].

Los métodos de modificación superficial habitualmente empleados para realizar la remoción de las sustancias que quedan adherida a la pared de las fibras después del proceso de extracción mecánica pueden clasificarse en dos categorías de acuerdo a la metodología empleada: métodos de modificación física y métodos de modificación química [8-16]. Entre los métodos de modificación física se destacan el tratamiento corona y el tratamiento por plasma, los cuales permiten modificar la rugosidad de la superficie y la cristalinidad de las fibras, sin provocar grandes cambios en la estructura química de las fibras [10-12]. Por su parte, los métodos de modificación química están enfocados en mejorar la adherencia de las fibras con la matriz del compuesto mediante el uso de reactivos entre los que se destacan el silano, el hidróxido de sodio y el empleo de procesos de acetilación [13-16].

Este trabajo presenta la evaluación del efecto del tratamiento superficial en las propiedades de fibras extraídas del varillón de culmos de bambú de la especie *Guadua Angustifolia* Kunth. El estudio se centró en el empleo de dos procedimientos de modificación superficial: modificación mediante inmersión en solución alcalina y tratamiento con plasma frío generado a partir de la combinación de dos gases: metano y argón. La caracterización experimental fue realizada mediante estudios de microscopía, determinación de propiedades físicas y evaluación de la resistencia a tensión de las fibras. Los resultados obtenidos son comparados con resultados encontrados en la literatura técnica para otros tipos de fibras vegetales.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el trabajo experimental, se utilizaron fibras con una edad promedio de tres años, extraídas del varillón del bambú de la especie *Guadua Angustifolia* Kunth. Los culmos fueron inmunizados mediante una técnica de inmersión en bórax y sales de ácido bórico a una concentración del 3% [17]. La extracción de las fibras se realizó utilizando un triturador

mecánico. Se obtuvieron fibras de 0,5 m de largo y luego se cortaron en carpintería hasta alcanzar una longitud de a 0,015 m. Para analizar la microestructura de las fibras (ancho y sección transversal), se usó un estereomicroscopio.

La modificación de la superficie de las fibras se llevó a cabo usando dos procedimientos: un tratamiento alcalino y un tratamiento con plasma. Ambos tratamientos mejoran la adherencia de la superficie de la fibra, eliminando parcialmente la lignina, la hemicelulosa y algunas impurezas presentes en el material [12]. Para el tratamiento con plasma, las fibras se sometieron a la combinación de un plasma frío de metano y argón durante 10 minutos utilizando una presión de trabajo de aproximadamente 27 Pa y un potencial de CC de -700 V, con un flujo de gas de 10 sccm y una temperatura entre 18°C y 26 ° C. Este método se puede considerar como un proceso limpio capaz de modificar la superficie de las fibras generando menos contaminantes que los tratamientos químicos convencionales [12].

Para el tratamiento alcalino las fibras fueron sumergidas en una solución de hidróxido de sodio con concentración de 10% por un periodo de 48 horas a temperatura de 20°C. La proporción entre la solución alcalina y la masa de fibras fue de un litro de solución por cada 100 gramos de fibra vegetal. Una vez finalizado el tratamiento, las fibras fueron lavadas con agua destilada y secadas en horno a 50°C hasta masa constante.

Para la determinación de las propiedades de las fibras fueron definidos tres grupos de estudios: fibras sin tratamiento, fibras con tratamiento alcalino y fibras con tratamiento con plasma. Para cada grupo de estudio fue determinado el índice de cristalinidad con el empleo de difracción por rayos X (XRD).

La composición química y la morfología de las fibras fue analizada por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB). La densidad, la absorción efectiva y el contenido de humedad fueron evaluadas de acuerdo a las recomendaciones de la ASTM D3800-16 [18]. La resistencia a tensión de las fibras fue determinada utilizando las especificaciones de la ASTM 1554-14 [19].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos de caracterización realizados sobre las fibras de bambú sin tratamiento y con el tratamiento alcalino y de plasma. A partir de los resultados obtenidos se examinaron las tendencias correspondientes, y para lograr un mejor entendimiento de la influencia de los tratamientos utilizados sobre atributos de las fibras, los resultados obtenidos se comparan con modelos e investigaciones similares.

A. Rugosidad de las Fibras no Tratadas

La micrografía de superficie para una muestra representativa de fibra de bambú sin tratamiento se presenta en la Fig. 1, la cual indica una rugosidad promedio de 1886 nm.

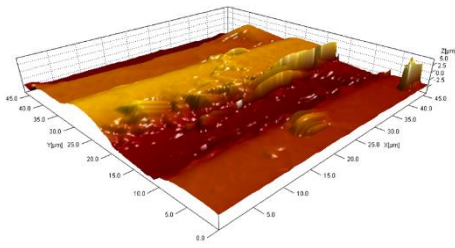


Fig.1. Micrografía de rugosidad para la fibra de bambú sin tratamiento.

B. Efecto del Tratamiento Superficial en la Cristalinidad de las Fibras

Los difractogramas para fibras representativas sin tratamiento y fibras con tratamiento alcalino y tratamiento de plasma se muestran en la Fig. 2. Utilizando el método de Segal, fueron calculados los índices de cristalinidad (IC) para cada una de las fibras estudiadas, esto es, fibras sin tratamiento y fibras con tratamientos alcalino y de plasma. Para el cálculo del índice de cristalinidad fue considerado que el valor de intensidad máxima ($I_{máx}$) se encuentra localizado entre los ángulos de dispersión (2θ) 22-23°, y el valor de la intensidad mínima ($I_{mín}$) se considera que ocurre típicamente entre las orientaciones (2θ) 18-19°. Analizando la altura de los picos es posible determinar el índice de cristalinidad (IC) mediante el empleo de la ecuación 1 [20]:

$$IC = \frac{(I_{máx} - I_{mín})}{I_{máx}} 100 \quad (1)$$

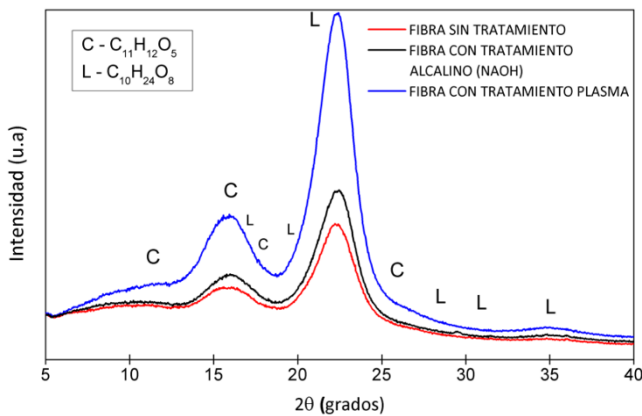


Fig. 2 Difractogramas para fibras de Guadua

En la Fig. 2 pudieron identificarse dos picos típicos de compuestos identificados como C₁₀H₂₄O₈ y C₁₁H₁₂O₅, usualmente asociados a la presencia cristales de celulosa, en muestras orgánicas. Los resultados de los índices de cristalinidad (I.C.) obtenidos para cada uno de los tipos de fibra se muestran en la Tabla I y permiten comprobar que a aplicar un tratamiento con plasma en la superficie de las fibras es posible aumentar el índice de cristalinidad de las fibras en hasta un 20 %. Variaciones en el índice de cristalinidad de las fibras por debajo del 10% son observadas al realizar el tratamiento alcalino.

TABLA I
INDICE DE CRISTALINIDAD

Tipo de fibra	I.C. método Segal (%)
Sin tratamiento	62,95
Con tratamiento alcalino	66,76
Con tratamiento de plasma	76,10

C. Efecto del Tratamiento Superficial en la Morfología y Composición Elemental de las Fibras

Para observar la morfología de las fibras, micrografías representativas fueron obtenidas mediante el empleo de un microscopio electrónico de barrido marca HITACHI S-570 a un voltaje de aceleración de 40 kV (ver Fig. 3, 4 y 5). La composición química de las fibras fue determinada por medio de la espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS). Los resultados son presentados en la Tabla 2.

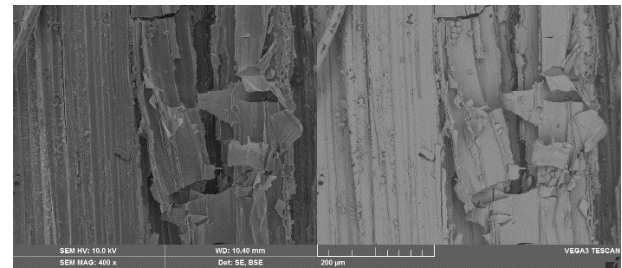


Fig. 3. Morfología de fibras sin tratamiento

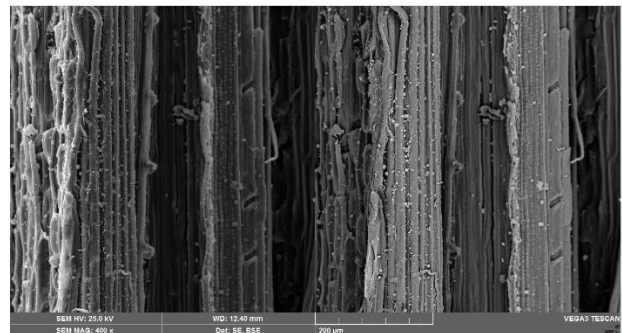


Fig. 4. Morfología de fibras con tratamiento alcalino

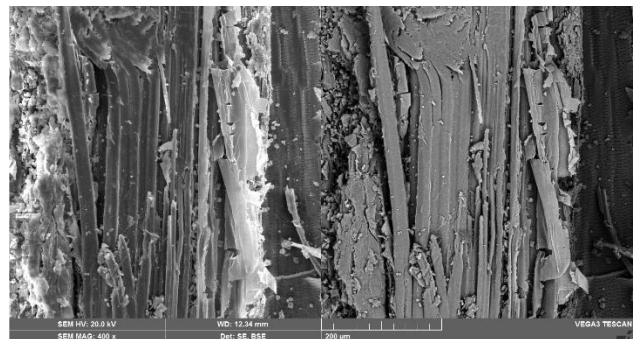


Fig. 5. Morfología de fibras con tratamiento alcalino

TABLA II
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS FIBRAS

Tipo de fibra	C (%)	O (%)	Si (%)
Sin tratamiento	48,76	40,56	11,04
Con tratamiento alcalino	57,89	40,58	-
Con tratamiento de plasma	54,28	37,18	8,52

De acuerdo con la Fig. 3, la micrografía de la fibra sin tratamiento exhibe una superficie que consta de algunas irregularidades atribuidas principalmente a la presencia de materiales no celulósicos (hemicelulosa y constituyentes de la lignina) [21]. Cuando son aplicados los tratamientos alcalinos (NaOH) y de plasma sobre las fibras de bambú es evidente que la irregularidad de las superficies de las fibras disminuye y presentan una apariencia más homogénea y más limpia esto debido a que los tratamientos alcalinos NaOH (Fig. 4) y de plasma (Fig. 4) sirven como agentes limpiadores de la fibra, eliminando gran parte del material no celulósico de las cavidades en las superficies de las fibras [21]. Durante el ensayo, fue observado que las fibras con tratamiento de plasma presentaban una superficie más homogénea en comparación con las fibras tratadas alcalinamente, lo que proporciona evidencia de una mayor remoción de material no celulósico e impurezas en las fibras tratadas con plasma. Fue también reportado que la microestructura de las fibras de bambú se subdividía en microfibras por causa de los tratamientos superficiales [22], lo cual coincide con los resultados del presente estudio al comparar la morfología de las fibras sin tratamiento con la morfología de las fibras con el tratamiento alcalino y de plasma. Asimismo, la rugosidad de estas fibras con tratamientos es probable sea mayor en comparación a la rugosidad de las fibras sin tratamiento, aún más para las fibras con plasma dado que sobre estas últimas se obtuvo evidencia de una mayor remoción de material no celulósico o impurezas (Fig. 5). En este sentido, el incremento en la rugosidad de las fibras de bambú por la eliminación de materiales no celulósicos les podría permitir una mayor adherencia a resinas poliméricas y ser aptas para conformar materiales compuestos como paneles reforzados y otras interfaces con una capacidad mecánica incrementada en comparación los mismos compuestos fabricados con fibras sin tratamientos de este tipo.

Analizando la composición química presentada en la Tabla II, pudo observarse que la relación Si/C de la fibra inicial sin tratamiento disminuyó con el tratamiento alcalino y de plasma, lo cual indica la remoción de la sílice de la fibra de bambú, un componente principal del bambú [22]. También pudo ser observado que la relación C/O se incrementó entre un 20 – 40% con la aplicación de los tratamientos superficiales evaluados en el presente estudio, esto debido a la remoción de materiales no celulósicos e impurezas adheridas a las fibras, incrementando la concentración de materiales celulósicos de las mismas.

D. Efecto del Tratamiento Superficial en las Propiedades Físicas de las Fibras

Con el objetivo de verificar la eficiencia del tratamiento empleado para la modificación de la superficie de las fibras, la absorción efectiva, el contenido de humedad y la densidad relativa de fibras no tratadas y tratadas fue determinada. Los resultados son presentados en la Tabla III. A partir de los resultados puede notarse que con la modificación de la superficie de las fibras la densidad de las mismas disminuye en aproximadamente en un 35% al realizar el tratamiento con plasma. No obstante, un incremento en el valor de la densidad de 9% demuestra que al tratar las fibras con solución de hidróxido de sodio. Resultados similares fueron presentados por Das y Chakraborty [23] para tratamientos realizados con baja concentración de hidróxido de sodio (inferior al 5%), y pueden ser atribuidos al efecto de la solución en el empaquetamiento de las microfibrillas de celulosa. Igualmente es posible percibir que la absorción efectiva de las fibras aumenta entre un 30 a un 50% con el tratamiento superficial. El aumento de la absorción de las fibras puede relacionarse al apareamiento de las fibras de microporos debido a la remoción de resinas, ceras y otras sustancias extraíbles y debe ser considerado durante la etapa de elaboración del compuesto, para no afectar el desempeño mecánico del mismo.

TABLA III
PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS

Tipo de fibras	Contenido de humedad (%)	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)
No Tratada	9,0±0,04	1,1±0,03	55,4±0,19
Alcalino	10,0±0,09	1,2±0,09	83,4±0,13
Plasma	11,1±0,06	0,7±0,08	73,1±0,09

E. Efecto del Tratamiento Superficial en la Resistencia a Tensión de las Fibras

El efecto del tratamiento en las propiedades mecánicas de las fibras fue verificado mediante un ensayo de resistencia a tensión. El ensayo se realizó en la máquina universal de ensayos WP300 y son presentados en la Tabla IV. Analizando los resultados de la Tabla IV es posible notar que al aplicar en la superficie de las fibras un tratamiento alcalino se reduce la resistencia a tensión de las fibras en aproximadamente un 20%. Sin embargo, tratamientos con plasma incrementan la resistencia a tensión en un 25%.

El efecto del tratamiento físico en la resistencia a tensión de fibras de Guadua puede ser comparado con resultados reportados en la literatura técnica para otras fibras vegetales tratadas con plasma en condiciones similares de tratamiento (tiempo, temperatura y presión). Los resultados muestran la eficiencia del tratamiento con plasma para mejorar el desempeño mecánico de las fibras vegetales y son presentados en la Tabla V.

TABLA IV
RESISTENCIA A TENSIÓN DE LAS FIBRAS

Tipo de fibras	Resistencia a tensión (MPa)	Coefficiente de variación (%)
No Tratada	178,83	22
Alcalino	142,45	31
Plasma	222,38	39

TABLA V
EFECTO DEL TRATAMIENTO CON PLASMA EN LA RESISTENCIA A TENSIÓN DE FIBRAS VEGETALES

Tipo de Tratamiento	Resistencia a tensión (MPa)		
	Guadua	Sisal [24]	Lana [25]
No Tratada	178,83	197	225
Plasma	222,38	278	260

IV. CONCLUSIONES

En este artículo fue analizada la influencia de la modificación superficial de las fibras en las propiedades de fibras extraídas del varillón de culmos de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth. Los resultados presentados demuestran que al realizar la remoción de la lignina, la hemicelulosa, ceras y otras impurezas que quedan adheridas en la fibra producto del proceso de extracción mecánica, no solo se afecta la rugosidad de las fibras, sino también su morfología, composición química y cristalinidad. Independiente del tipo de tratamiento empleado, variaciones en la densidad y un aumento significativo de la absorción efectiva de las fibras puede ocurrir. Los resultados obtenidos demuestran que al tratar las fibras de guadua con plasma es posible incrementar su resistencia a tensión hasta en un 25%. Estos factores deben ser considerados en el diseño de compuestos naturales por cuanto pueden afectar tanto su desempeño mecánico como su estabilidad dimensional.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo es un producto derivado del proyecto (INV-ING-2623) financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, vigencia (2018).

REFERENCIAS

- [1]. M. Ramesh, K. Palanikumar, K. Reddy. "Mechanical property evaluation of sisal- jute glass fibre reinforced polyester composites", *Composites Part B*, vol 48, pp. 1–9, 2013. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.12.004.
- [2]. D. Ray, S. Sengupta, A.K. Mohanty, M. Misra. "A study of the mechanical and fracture behaviour of jute-fabric-reinforced clay-modified thermoplastic starch-matrix composites". *Macromolecular Materials and Engineering*, vol 292 pp.1075–84, 2007. DOI: 10.1002/mame.200700111
- [3]. K.G. Satyanarayana, J.I. Guimaraes, F. Wypych. "Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications". *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, vol 38, num 7, pp.1694–1709, 2007. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.02.006.
- [4]. A. Pietak, S. Korte, E. Tan, A. Downard, M.P. Staiger. "A novel technique for characterizing the surface of natural fibres". *Applied Surface Science*, vol 253, pp.3627–3635, 2007.

- [5]. S. Leduc, J.R.G. Urena, R. Gonzalez-Nunez, J.R. Quirarte, B. Riedl, D. Rodriguez. "LDPE/ Agave fibre composites: effect of coupling agent and weld line on mechanical and morphological properties". *Polymers & Polymer Composites*, vol 16, pp.115–24, 2008. DOI: 10.1177/096739110801600204.
- [6]. J. Moran, A. Vera, V. Alvaraz, P. Cyras, A. Vasquez. "Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers". *Cellulose*, vol 15, pp 149– 159, 2008. DOI: 10.1007/s10570-007-9145-9.
- [7]. P. Bhijit, M. Deshpande, R. Bhaskar, R. Lakshmana. "Extraction of bambu fibers and their use as reinforcement in polymeric composites". *Journal of applied polymer science*, vol 76, pp. 83–92, 2000. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(20000404)76:1<83::AID-APP11>3.0.CO;2-L.
- [8]. J. Gassan, V.S. Gutowski. "Effects of corona discharge and UV treatment on the properties of jute-fibre epoxy composites". *Composites Science and Technology*, vol 60, pp.857–863, 2000. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00168-8.
- [9]. M. Ragoubi, D. Bienaime, S. Molina, B. George, A. Merlin. "Impact of corona treated hemp fibres onto mechanical properties of polypropylene composites made thereof". *Industrial Crops and Products*, vol 31, pp. 344–349, 2010. DOI: 10.1016/j.indcrop.2009.12.004.
- [10]. S. Marais, F. Gouanve, A. Bonnesoeur, J. Grenet, F.Poncin-Epaillard, C. Morvan, M. Metayer. "Unsaturated polyester composites reinforced with flax fibers: effect of cold plasma and autoclave treatments on mechanical and permeation properties". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol 36, pp. 975–986, 2005. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.11.008
- [11]. A.R. Martin, S. Manolache, L.H.C. Mattoso, R.M. Rowell, F. Dense. "Plasma modification of sisal and high-density polyethylene composites: effect on mechanical properties". *In: Natural polymers and composites proceedings*, pp. 431–436, 2000.
- [12]. E. Sinha, S. Panigrahi. "Effect of plasma treatment on structure, wettability of jute fiber and flexural strength of its composite". *Journal of Composite Materials*, vol 43, pp. 1791–1802, 2009. DOI: 10.1177/0021998309338078.
- [13]. E.T.N. Bisanda. "The effect of alkali treatment on the adhesion characteristics of sisal fibres". *Applied Composite Material*, vol 7, pp. 331–339, 2000. DOI: 10.1016/j.sajce.2017.04.005.
- [14]. D. Ray, B.K. Sakar, A.K. Rana, N.R. Bose. "The mechanical properties of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibres". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, pp. 119–127, 2001. DOI: 10.1016/S1359-835X(00)00101-9
- [15]. C. Qin, N. Soykeabkaew, Y. Xiu, T. Peijs. "The effect of fibre volume fraction and mercerization on the properties of all-cellulose composites". *Carbohydrate Polymers*, vol 71, pp.458–467, 2008. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.06.019.
- [16]. A.I.S. Brigida, V.M.A. Calado, L.R.B. Gonçalves, M.A.Z. Coelho. "Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber". *Carbohydrate Polymers*, vol 79, pp. 832–838, 2010. DOI: 10.1016/j.carbpol.2009.10.005.
- [17]. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Preservación y secado del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth (NTC5301). ICONTEC, Bogotá, 2007.
- [18]. ASTM D3800–16. Standard test method for density of high-modulus fibers. Annual Book of ASTM Standards, 2016.
- [19]. ASTM C1557-14. Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. Annual Book of ASTM Standards, 2014.
- [20]. P. Ahvenainen, I. Kontro, K. Svedstrom. "Comparison of sample crystallinity determination methods by X-ray diffraction for challenging cellulose I materials". *Cellulose*, vol 23, pp. 1073–1086, 2016. DOI: 10.1007/s10570-016-0881-6.
- [21]. P. Luna, M.J. Lizarazo, A. Marinho. "Guadua angustifolia bamboo fibers as reinforcement of polymeric matrices: an exploratory study". *Construction and Building Materials*, vol 116, pp. 93–97, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.139.
- [22]. R.A. Tolosa, G. Jimenez, N.P. Arias, C.A. Cardona, O. Giraldo. "Cementitious materials reinforcement using *Angustifolia kunth* bamboo fiber covered with nanostructured manganese oxide". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol.53 (20), pp. 8452–8463, 2014. DOI: 10.1021/ie403958y.
- [23]. M. Das, D. Chakraborty. "Evaluation of improvement of physical and mechanical properties of bamboo fibers due to alkali treatment". *Journal of Applied Polymer Science*, vol 107, pp.522-527, 2008. DOI: 10.1002/app.26155.

- [24]. B. Barra, P. Bergo, C. Alves, H. Savastano, K. Ghavami. "Effects of Methane Cold Plasma in Sisal Fibers". *Key Engineering Materials*, vol 517 (2012), pp. 458-468, 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.517.458.
- [25]. A. Ceria, F. Rombaldoni, G. Rovero, G. Mazzuchetti, S. Sicardi." The effect of an innovative atmospheric plasma jet treatment on physical and mechanical properties of wool fabrics". *Journal of Materials Processing Technology*, vol 210 (2010), pp. 720-726, 2010. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.12.006.



Martha Lissette SánchezCruz received the degree of Civil Engineering in 1989 from the Instituto Superior Politecnico Jose Antonio Echeverria, Cuba, Master in Civil Engineering (area of structures) in 2002 from the Pontificia Universidade Catholica do Rio de Janeiro, Brazil, and Doctor of Science in 2008 from

Instituto Tecnológico de Aeronáutica in Brazil. He is currently professor associate in the Department of Civil Engineering at UMNG.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4718-0569>



William Alberto Patiñov Castro received the degree of Civil Engineering in 2017 from the Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7999-5367>.



Jhon Wilmar. Cárdenas Pulido received the degree of Civil Engineering in 2013 from the Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Colombia, and Master in Civil Engineering (area of structures and earthquakes) in 2017 from the Universidad de los Andes, Colombia.

He is currently research associate in the Department of Civil Engineering at UMNG.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4698-4896>