

Research

Influence of the Type of Fibers and their Surface Treatment on the Properties of Biocomposite Panels

Influencia del tipo de fibras y de su tratamiento superficial en las propiedades de paneles biocompuestos

Martha Lissette Sánchez-Cruz¹  *, Gil Capote-Rodríguez²  and Juan Pablo Patiño-Quiazua¹ 

¹Universidad Militar Nueva Granada (Bogotá, Colombia).

²Universidad Nacional de Colombia (Bogotá, Colombia).

Abstract

Context: The concern for mitigating the environmental impact generated by the use of synthetic fibers as reinforcement of traditional composite materials has encouraged the design and characterization of alternative composites. However, despite their multiple advantages as construction materials, it is necessary to thoroughly determine the effect of design parameters on their mechanical performance.

Method: The objective of this study is to determine the effect of design parameters (i.e., type of fibers and their superficial treatment) on the properties of biocomposite panels. To elaborate the composite, two types of fibers were used: *Arundo donax* L. (Caña Brava) and *Guadua angustifolia* Kunth (Guadua). Short, randomly distributed fibers and a polymer matrix of castor oil were used for manufacturing. To evaluate the influence of the treatment on the properties of the biocomposite, three conditions were considered: fibers without treatment, fibers treated with mercerization, and fibers treated with plasma. Their density in anhydrous state, effective absorption capacity, surface absorption, swelling percentage, breaking modulus, and apparent elastic modulus were experimentally determined. Based on the results, an analysis of the response surface was carried out through the implementation of a central compound design, using commercial software.

Results: An analysis of the response surface was carried out. Pareto diagrams and contour graphs were obtained for each of the properties under study. Based on the statistical results, it was possible to establish equations that allow predicting the properties of the compound according to the type of fiber and the treatment applied on its surface.

Conclusions: The results allowed verifying the effect of the type of fibers and their surface modification on the physical properties of compounds made with materials of plant origin. Other parameters such as orientation of the fibers, as well as variables associated with the manufacture process (pressure and compaction time), can influence the properties of the material, and will be evaluated in future works.

Acknowledgments: This paper is a product of project (INV-ING-3188) financed by the Research Vice-Rectorate of Universidad Militar Nueva Granada, 2020 term. Keywords: accelerometer, hot-wire anemometer, Bluetooth, wind power, wind tunnel.

Keywords: biocomposites, physical properties, mechanical properties

Article history

Received:
27nd /Nov/2021

Modified:
4th /Oct/2022

Accepted:
22nd /Nov/2022

Ing., vol. 28,
no. suppl, 2023.
e18852

©The authors;
reproduction
right holder
Universidad
Distrital
Francisco José de
Caldas.

Open access



*  **Correspondence:** martha.sanchez@unimilitar.edu.co

Resumen

Contexto: La preocupación por la mitigación del impacto ambiental generado por el uso de fibras sintéticas como refuerzo de los materiales compuestos tradicionales ha promovido el diseño y caracterización de compuestos alternativos. No obstante, a pesar de sus múltiples ventajas como materiales de construcción, es necesario determinar minuciosamente el efecto de los parámetros de diseño en su desempeño mecánico.

Método: Este estudio tiene como objetivo determinar el efecto de los parámetros de diseño (tipo de fibras y su tratamiento superficial) en las propiedades de paneles biocompuestos. Para la elaboración del compuesto, se utilizaron dos tipos de fibras: de *Arundo donax* (caña brava) y de *Guadua angustifolia* Kunth (guadua). Para la manufactura, se trabajaron fibras cortas aleatoriamente distribuidas y una matriz polimérica de aceite de ricino. Para evaluar la influencia del tratamiento en las propiedades del biocompuesto, se consideraron tres condiciones: fibras sin tratamiento, fibras tratadas mediante mercerización y fibras tratadas con plasma. La densidad en estado anhidro, la capacidad de absorción efectiva, la absorción superficial, el porcentaje de hinchamiento, el módulo de rotura y el módulo de elasticidad aparente se determinaron experimentalmente. A partir de los resultados, se analizó la superficie de respuesta mediante la implementación de un diseño central compuesto, utilizando un programa comercial.

Resultados: Se analizó la superficie de respuesta. Para cada una de las propiedades estudiadas, se obtuvieron diagramas de Pareto y gráficos de contorno. A partir de los resultados estadísticos, fue posible establecer ecuaciones que permitieran predecir las propiedades del compuesto en función del tipo de fibra y el tratamiento aplicado en su superficie.

Conclusiones: Gracias a los resultados, se pudo verificar el efecto del tipo de fibras y de su modificación superficial en las propiedades físicas de compuestos elaborados con materiales de origen vegetal. Otros parámetros como orientación de las fibras y variables asociadas a su manufactura (presión y tiempo de compactación) pueden influir en las propiedades del material y serán abordadas en trabajos futuros.

Agradecimientos: Este artículo es un producto derivado del proyecto INV-ING-3188, financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, vigencia 2020.

Palabras clave: biocompuestos, propiedades físicas, propiedades mecánicas

Tabla de contenidos

		3. Resultados y discusión	5
	Página	4. Conclusiones	11
1. Introducción	3	5. Contribución de autores	11
2. Materiales y métodos	4	Referencias	11

1. Introducción

El uso de fibras vegetales en varias aplicaciones de ingeniería ha aumentado en los últimos años. Propiedades como su amplia disponibilidad, su bajo costo, su elevada resistencia y su biodegradabilidad promueven su uso en la manufactura de materiales compuestos alternativos (1). Sin embargo, estas pueden verse limitadas por algunos factores, entre los que se destacan su sensibilidad a la humedad, su compleja composición química, la variación de sus propiedades y su baja compatibilidad con la mayoría de las resinas que son frecuentemente empleadas como matriz de compuestos convencionales, aspectos que pueden perjudicar tanto el desempeño mecánico del compuesto como su durabilidad (1–4).

Investigaciones recientes han demostrado que el desempeño mecánico de materiales biocompuestos depende sustancialmente de las características de la superficie de las fibras (5,6). Por este motivo, es pertinente la realización de tratamientos superficiales mediante los cuales se puedan remover parcialmente las impurezas adheridas a la superficie de las fibras, y así mejorar su adherencia con la matriz del compuesto (7–10).

Uno de los métodos más frecuentes en la modificación de la superficie de las fibras vegetales es la mercerización. Resultados publicados en los últimos años han demostrado que, al sumergir las fibras en una solución alcalina durante un periodo determinado, es posible modificar su índice de cristalinidad y eliminar parcialmente la lignina, la hemicelulosa y otros compuestos presentes en su superficie. De otra parte, se ha comprobado que este tratamiento actúa sobre los grupos hidroxilos presentes en las regiones amorfas del material, lo cual mejora su reacción con el aglutinante. No obstante, la eficiencia de este tratamiento, se ha verificado que, al someter el material a altas concentraciones de la solución química o a tiempos de tratamiento prolongados, puede ocurrir una degradación de las fibras, lo cual afecta la resistencia y la durabilidad del compuesto (11–17).

En los últimos años, las tecnologías de plasma frío han encontrado numerosas aplicaciones en la limpieza y en el procesamiento de materiales. La implementación de estas técnicas está relacionada con su capacidad para cambiar las propiedades de la superficie de un material; es decir, actúa sobre sus capas más externas sin modificar sus propiedades volumétricas (18). Los métodos de tratamientos mediante la aplicación de plasma se caracterizan por un bajo consumo de productos químicos y de energía; así, reduce el impacto ambiental generado a partir de dichos tratamientos químicos (18–25).

En este artículo, se ha evaluado el efecto de dos de los parámetros que intervienen en la manufactura de compuestos reforzados con fibras aleatoriamente distribuidas y resina vegetal. Para la elaboración del compuesto se han utilizado fibras de *Arundo donax* (caña brava) y fibras de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth (guadua). Para modificar la superficie de las fibras, se trabajaron dos tratamientos: uno alcalino (10 % de solución de hidróxido de sodio durante 24 h) y otro con plasma frío de metano. Como matriz del compuesto se usó una resina vegetal

obtenida del procesamiento del aceite de ricino. Para evaluar el efecto de los parámetros de diseño se adelantó un diseño central compuesto.

2. Materiales y métodos

Para la elaboración del biocompuesto se recurrió a dos tipos de fibras: las obtenidas de la sobrecasa de culmos de *Arundo donax* (caña brava), y de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth (guadua). Las fibras se obtuvieron mediante extracción mecánica. Sus propiedades físicas (densidad (D) y capacidad de absorción (CA)) se lograron a partir de los procedimientos descritos en las normas internacionales (26, 27). La resina utilizada como matriz fue un poliuretano termoestable, derivado del aceite de ricino. Sus propiedades se presentan en la tabla I. Para la

Tabla I. Propiedades de la resina vegetal

Propiedades físicas y mecánicas	
Densidad (kg/m ³)	1220
Resistencia en compresión (MPa)	14,2±0,8
Deformación en compresión (%)	69,1±0,4
Módulo de elasticidad en compresión (MPa)	1,21±0,03
Resistencia en tensión (MPa)	4,5±0,3
Deformación en tensión (%)	51,6±0,6
Módulo de elasticidad en compresión (MPa)	10±0,5

modificación de la superficie de las fibras se aplicaron dos tratamientos superficiales: uno físico (con plasma frío de metano) y otro químico (mercerización). Para el primero se adoptó un sistema DC-pulsado PECVD, con una presión de trabajo igual a 25 Pa durante 15 min, un potencial DC de -700 V, una corriente igual a 0,05 A y un flujo de gas de 10 sccm. El segundo consistió en la inmersión de las fibras en una solución de 10 % de hidróxido de sodio durante 24 h, seguido de un lavado con agua destilada y secado a temperatura ambiente durante 72 h. Las propiedades físicas de las fibras antes y después de cada tratamiento se presentan en la tabla II.

Tabla II. Propiedades físicas de las fibras

Tipos de fibras	D (kg/m ³)	CA (%)
Fibras de <i>Arundo donax</i> L. sin tratamiento	551±5	37,6±1,9
Fibras de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin tratamiento	696±7	53,7±2,4
Fibras de <i>Arundo donax</i> L. tratadas con plasma	450±4	20,13±2,9
Fibras de <i>Arundo donax</i> L. tratadas con solución alcalina	780±12	31,73±3,8
Fibras de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth tratadas con plasma	540±8	25,75±4
Fibras de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth tratadas con solución alcalina	910±15	68,42±9

Para la manufactura del biocompuesto se trabajó 70 % de volumen de fibras y 30 % de resina. Se fabricaron paneles de 0,3 m de ancho; 0,3 m de longitud, y 0,007 m de espesor, a partir del

método de compresión a temperatura ambiente. Se aplicó una fuerza de compresión de 120 kN durante 18 h. Una vez retirados del molde, los paneles se curaron durante 7 d a temperatura ambiente.

La densidad anhidra (DA), la capacidad de absorción efectiva (AE), la absorción superficial (AS) y el porcentaje de hinchamiento (H) de los paneles se determinaron siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM D4442-20 (28), ASTM D2395-17 (29) y ASTM D8171-18 (30). El módulo de rotura (MOR) y el módulo de elasticidad aparente (MOE) se calcularon mediante el procedimiento establecido en la ASTM D1037-12 (31).

Para el análisis de la superficie de respuesta fue recurrió a un programa comercial (*Minitab*). Se implementó un diseño central compuesto de dos factores, para lo cual se consideraron como variables de diseño el tipo de fibras (A) y el tipo de tratamiento (B). Se realizaron 14 corridas de manera aleatoria. La nomenclatura para la identificación de los paneles se presenta en la tabla III. La codificación empleada, el orden estadístico y el orden de corrida se detallan en la tabla IV.

Tabla III. Identificación del tipo de panel

Tipo de panel	Nomenclatura
Paneles reforzados con fibras de <i>Arundo donax</i> L. sin tratamiento	ADST
Paneles reforzados con fibras de <i>Arundo donax</i> L. tratadas con solución alcalina	ADAT
Paneles reforzados con fibras de <i>Arundo donax</i> L. tratadas con plasma	ADPT
Paneles reforzados con fibras de guadua sin tratamiento	GST
Paneles reforzados con fibras de guadua tratadas con solución alcalina	GAT
Paneles reforzados con fibras de guadua tratadas con plasma	GAP

Para analizar la influencia de las variables de diseño y su interacción, se obtuvieron las gráficas de Pareto para cada una de las propiedades estudiadas. Para visualizar la relación entre las variables estudiadas se trabajaron las gráficas de contorno. A partir del análisis de varianza se recurrió a ecuaciones que arrojan una estimación de las propiedades de los paneles en función del tipo de fibras y del tratamiento aplicado.

3. Resultados y discusión

Para analizar el efecto de las variables de diseño en las propiedades físicas del biocompuesto se obtuvieron experimentalmente los valores de densidad anhidra (DA), absorción efectiva (AE), absorción superficie (AS) y porcentaje de hinchamiento (H). Los resultados de este ejercicio se presentan en las figuras 1 y 2.

Tras analizar los resultados de la figura 1, se observa que al trabajar los tratamientos superficiales se provoca una reducción en la densidad del material. Esta reducción fue de aproximadamente 18 % para compuestos reforzados con fibras de *Arundo donax* L., y menor al 5 % para compuestos reforzados con fibras de guadua. De otra parte, hubo una reducción

Tabla IV. Codificación utilizada para el análisis de la superficie de respuesta

Orden estadístico	Orden de corrida	A	B	Tipo de panel
7	1	0,00	0,00	GPT
1	2	-1,00	-1,00	ADPT
5	3	0,00	0,00	GPT
3	4	-1,00	1,00	ADAT
6	5	0,00	0,00	GPT
2	6	1,00	-1,00	GPT
4	7	1,00	1,00	GAT
11	8	0,00	1,41	GST
13	9	0,00	0,00	GPT
9	10	1,41	0,00	GPT
14	11	0,00	0,00	GPT
12	12	0,00	0,00	GPT
10	13	0,00	-1,41	GAT
8	14	-1,41	0,00	ADPT

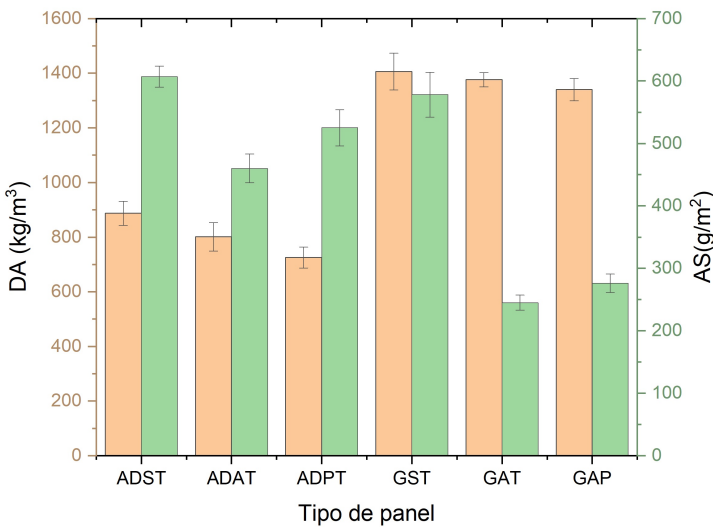


Figura 1. Influencia del tipo de fibras y del tratamiento superficial de las fibras en la densidad anhidra y en la absorción superficial

en los valores de absorción superficial en todos los paneles elaborados con fibras tratadas. Particularmente, en paneles elaborados con fibras de guadua tratadas con plasma se presentó una reducción significativa de la absorción superficial (mayor al 50 %), lo cual permite demostrar la eficiencia de este tratamiento en el incremento de las propiedades físicas de este compuesto. De forma similar, a partir de los resultados de la figura 2 se percibe una reducción que osciló entre el 30 % y el 45 % en los valores de absorción efectiva, y entre el 26 % al 65 % para los de porcentaje de hinchamiento.

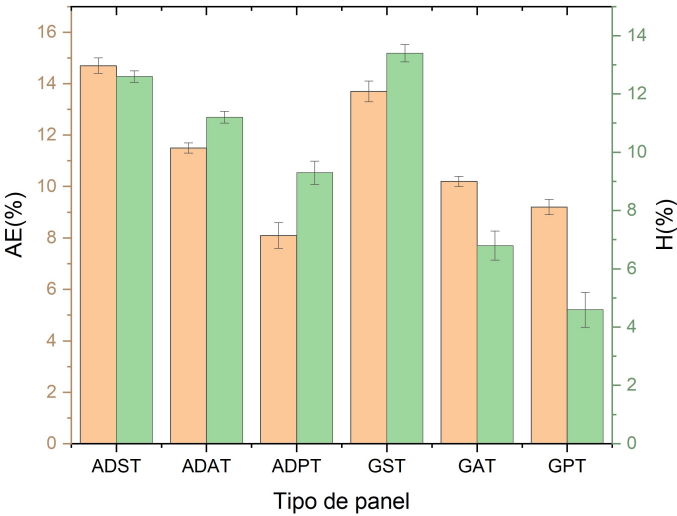


Figura 2. Influencia del tipo de fibras y del tratamiento superficial de las fibras en la capacidad de absorción efectiva y en el porcentaje de hinchamiento

Para el estudio de la influencia de las variables de estudio en las propiedades mecánicas del compuesto se alcanzaron experimentalmente los valores del MOR y del MOE. Los resultados se ilustran en la figura 3.

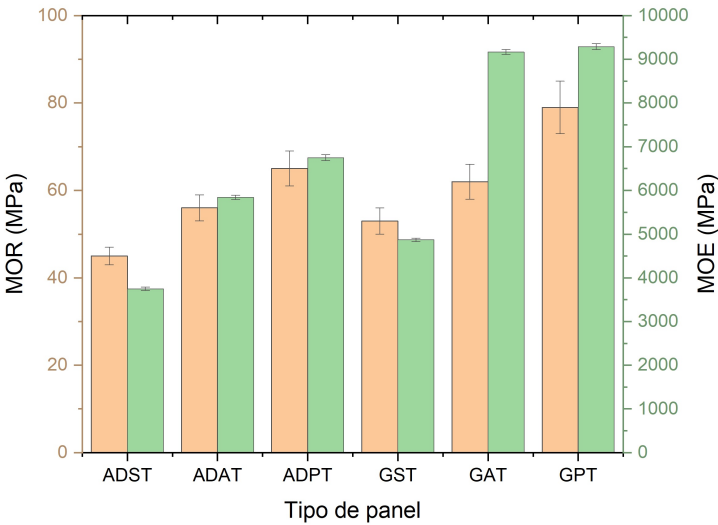


Figura 3. Influencia del tipo de fibras y del tratamiento superficial en los valores de módulo de rotura y módulo de elasticidad aparente

Tras los resultados de la figura 3, se aprecia un incremento en la resistencia a flexión de los paneles reforzados con fibras a las que se les aplicó un tratamiento superficial de plasma

frío de metano. Este incremento es más notorio en los paneles reforzados con fibras de guadua (aproximadamente 33%). Adicionalmente, se evidencia un incremento en la rigidez de los paneles, tras analizar los valores para el MOE. En este caso, los resultados experimentales indican una diferencia menor al 15% en los valores del MOE para compuestos reforzados con fibras tratadas con hidróxido de sodio y con plasma.

Para evaluar el efecto de la variación del tipo de fibras y del tipo de tratamiento superficial, así como la significancia de su interacción en cada una de las propiedades de los paneles, se realizaron los diagramas de Pareto. Los resultados se ilustran en las figuras 4, 5 y 6. En los diagramas A representan el tipo de fibras; B, el tipo de tratamiento, y AB, la interacción entre las variables.

Analizando los resultados presentados en las figuras 4(a) y 4(b), se percibe que el tipo de fibras ejerce un efecto significativo en la densidad y en la absorción superficial del compuesto; sin embargo, los tratamientos implementados no afectan significativamente estas propiedades físicas del material. A partir de los resultados obtenidos no se identifica una interacción entre las variables de diseño.

Observando las figuras 5(a) y 5(b), se percibe el efecto significativo del tratamiento aplicado en la absorción efectiva y en el porcentaje de hinchamiento de los paneles. En el caso de la primera, la interacción entre los factores de diseño puede afectar significativamente la respuesta del material. Además, el tipo de fibras sí impacta de manera representativa el valor del porcentaje de hinchamiento del compuesto.

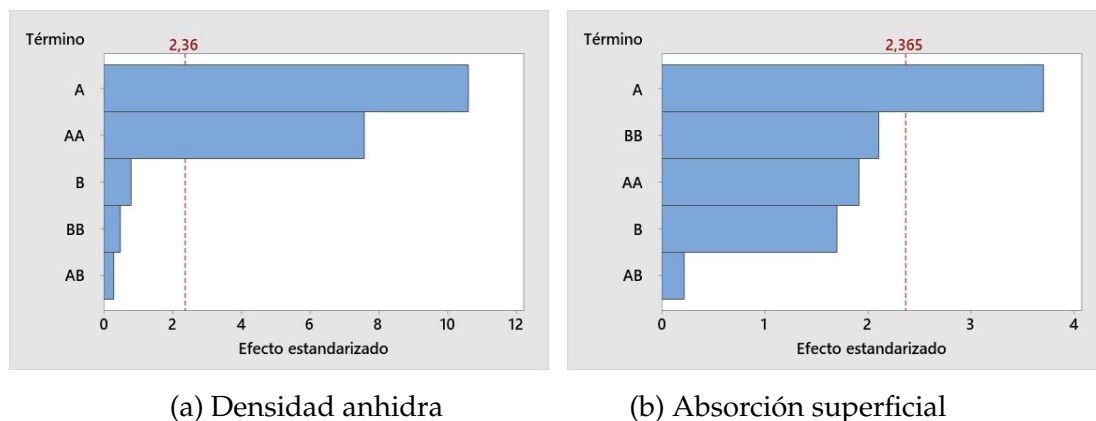
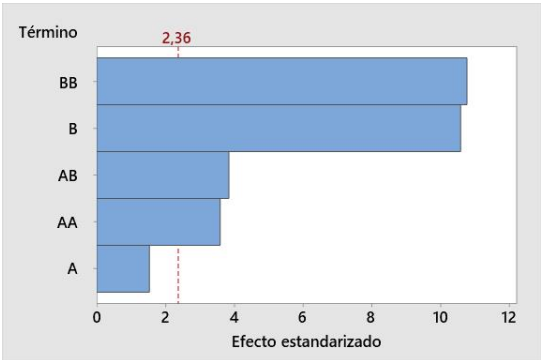


Figura 4. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para las propiedades físicas (DA y AS)

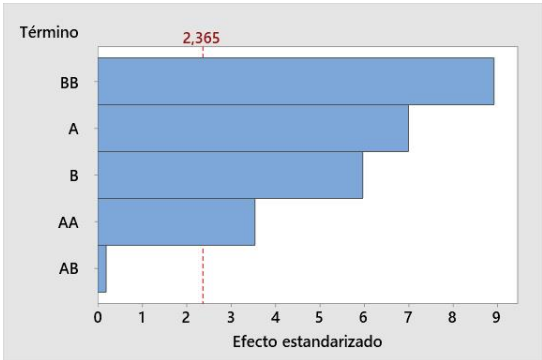
En las figuras 6(a) y 6(b), se observa el efecto significativo de las variables de diseño en los valores del MOR y del MOE. La relación entre las variables de estudio puede visualizarse en las gráficas de contorno (figuras 7, 8 y 9).

Una vez trabajados los resultados del análisis de la superficie de respuesta, se obtuvieron ecuaciones que permiten predecir las propiedades físicas y mecánicas del material, donde A

representa el tipo de fibras; B , el tipo de tratamiento, y AB , representa la interacción entre las variables.

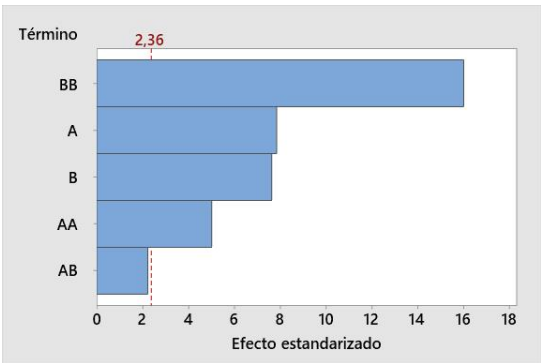


(a) Absorción efectiva

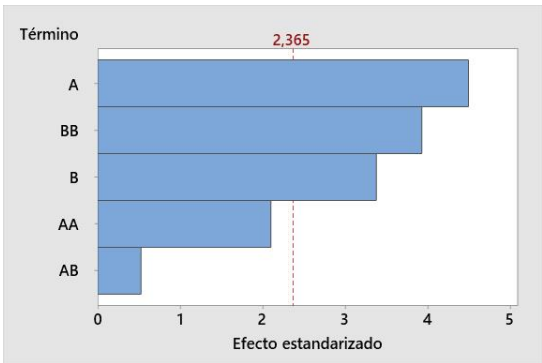


(b) Porcentaje de hinchamiento

Figura 5. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para las propiedades físicas (AE y H)

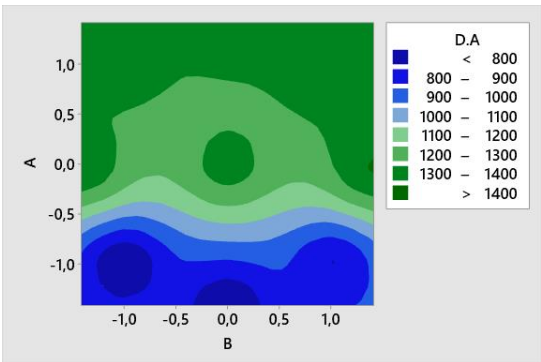


(a) Módulo de rotura

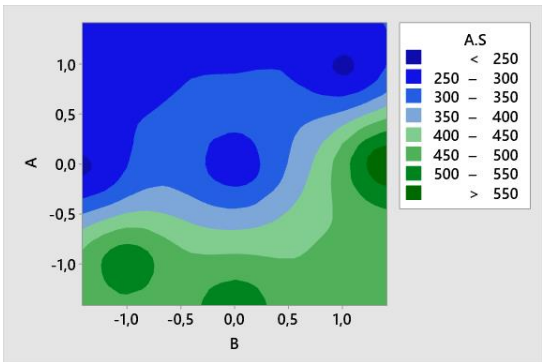


(b) Módulo de elasticidad aparente

Figura 6. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para las propiedades mecánicas del compuesto



(a) Densidad anhidra



(b) Absorción superficial

Figura 7. Gráfica de contorno para las propiedades físicas (DA y AS)

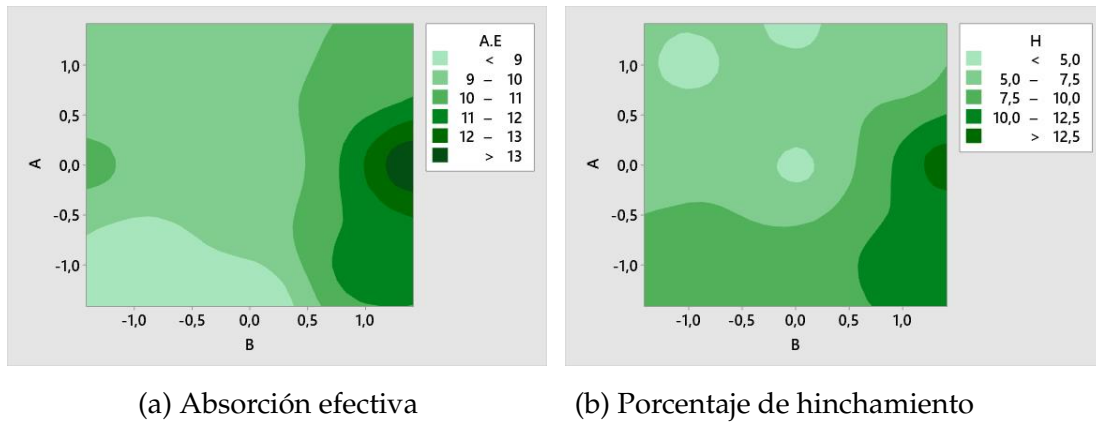


Figura 8. Gráfica de contorno para las propiedades físicas (AE y H).

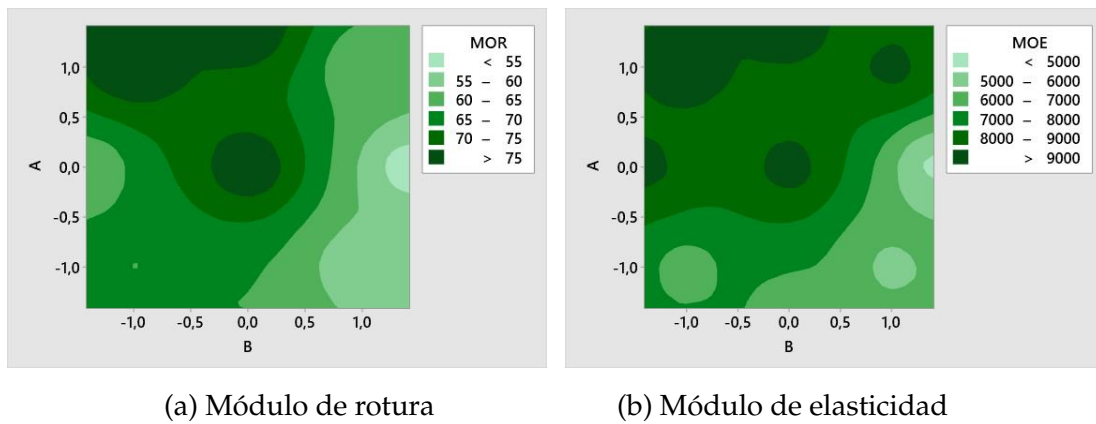


Figura 9. Gráfica de contorno para las propiedades mecánicas (MOR y MOE)

$$DA = 1340 + 258A + 19B - 192A^2 - 12B^2 - 10AB \quad (1)$$

$$AS = 276 - 102A + 47B + 55A^2 - 60B^2 + 9AB \quad (2)$$

$$AE = 9,2 + 0,17A + 1,17B - 0,41A^2 + 1,24B^2 - 0,6AB \quad (3)$$

$$H = 4,6 - 1,97A + 1,7B + 1,04A^2 + 2,61B^2 + 0,08AB \quad (4)$$

$$MOR = 79 + 5A - 4,8B - 3,3A^2 - 10,6B^2 - 2AB \quad (5)$$

$$MOE = 9291 + 1182A - 889B - 574A^2 - 1076B^2 + 196AB \quad (6)$$

4. Conclusiones

En este trabajo se evaluó la influencia del tipo de fibras y de su tratamiento superficial en las propiedades de paneles biocompuestos. Se realizó un análisis de superficie de respuesta mediante un diseño central compuesto para evaluar los efectos principales de las variables de diseño y su interacción. Los principales hallazgos se describen a continuación:

- La selección del tipo de fibras y el tipo de tratamiento aplicado para el acondicionamiento de su superficie afectan de manera significativa la resistencia, la rigidez y la estabilidad dimensional de estos compuestos.
- El tratamiento alcalino es un método económico, de fácil aplicación, que permite eliminar parcialmente la lignina y otras impurezas adheridas a la superficie de las fibras; así, mejora la adherencia mecánica con la resina vegetal. Por este motivo, compuestos reforzados con fibras tratadas con solución de hidróxido de sodio muestran mejor desempeño mecánico que aquellos elaborados con fibras no tratadas.
- Según los resultados, se pudo comprobar que paneles elaborados con fibras de guadua tratadas con plasma registran mejor desempeño mecánico y menor capacidad de absorción.
- Igualmente, fue posible obtener ecuaciones que permiten predecir las propiedades físicas y mecánicas de los paneles compuestos, en función del tipo de fibra vegetal y de su tratamiento superficial.

5. Contribución de autores

Martha Lissette Sánchez Cruz: conceptualización, metodología, análisis, redacción y administración del proyecto. Gil Capote Rodríguez: metodología, investigación, análisis y validación de resultados formal. Juan Pablo Patiño Quiazua: investigación y análisis.

Referencias

- [1] M. J. John, "Environmental degradation in biocomposites," in *Biocomposites for High-Performance Applications*, D. Ray, ed., Sawston: Woodhead Publishing, 2017, pp. 181-194. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100793-8.00007-7> ↑3
- [2] C. Baley, M. Gomina, J. Breard, A. Bourmaud, S. Drapier, M. Ferreira, A. Le Duigou, P. J. Liotier, P. Ouagne, D. Soulat, and P. Davies, "Specific features of flax fibres used to manufacture composite materials," *Int. J. Mater. Form*, vol. 12, no. 6, pp. 1023-1052, 2018. Available: <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1455-y> ↑3
- [3] A. Mancino, G. Marannano, and B. Zuccarello, "Implementation of eco-sustainable biocomposite materials reinforced by optimized agave fibers," *Procedia Struct. Integr*, vol. 8, pp. 526-538, 2018. Available: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.12.052> ↑3

- [4] M. Sood and G. Dwivedi, "Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review," *Egypt. J. Pet.*, vol. 27, no. 4, pp. 775-783, 2018. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.11.005> ↑3
- [5] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552-1596, 2012. Available: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003> ↑3
- [6] A. Le Duigou, D. Correa, M. Ueda, R. Matsuzaki, and M. Castro, "A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites," *Mater. Des.*, vol. 194, p. 108911, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108911> ↑3
- [7] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of Polymer Matrix Composites: A review and prospective," *Compos. B. Eng.*, vol. 110, pp. 442-458, 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034> ↑3
- [8] E. Uitterhaegen, J. Parinet, L. Labonne, T. Mérian, S. Ballas, T. Véronèse, O. Merah, T. Talou, C. V. Stevens, F. Chabert, and P. Evon, "Performance, durability and recycling of thermoplastic biocomposites reinforced with coriander straw," *Compos. Part A Appl. Sci.*, vol. 113, pp. 254-263, 2018. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.07.038> ↑3
- [9] M. L. Sánchez, W. A. Aperador, and G. Capote, "Influence of the delignification process on the properties of panels made with Guadua fibers and plant resin," *Ind Crops Prod.*, vol. 125, pp. 33-40, 2018. Available: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.084> ↑3
- [10] H. Yaghoobi and A. Fereidoon, "Preparation and characterization of short kenaf fiber-based biocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes," *Compos. B. Eng.*, vol. 162, pp. 314-322, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.015> ↑3
- [11] Y. Li, S. Moyo, Z. Ding, Z. Shan, and Y. Qiu, "Helium plasma treatment of ethanol-pretreated ramie fabrics for improving the mechanical properties of Ramie/polypropylene composites," *Ind Crops Prod.*, vol. 51, pp. 299-305, 2013. Available: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.028> ↑3
- [12] H. Gu, "Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after naoh treatment," *Mater Des.*, vol. 30, no. 9, pp. 3931-3934, 2009. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.035> ↑3
- [13] M. Bosquetti, A. L. da Silva, E. C. Azevedo, and L. F. Berti, "Analysis of the mechanical strength of polymeric composites reinforced with sisal fibers," *J. Nat. Fibers.*, vol. 18, no. 1, pp. 105-110, 2019. Available: <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1612310> ↑3
- [14] M. Rokbi, H. Osmani, A. Imad, and N. Benseddiq, "Effect of chemical treatment on flexure properties of natural fiber-reinforced polyester composite," *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 2092-2097, 2011. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.346> ↑3
- [15] A. Orue, A. Jauregi, U. Unsuain, J. Labidi, A. Eceiza, and A. Arbelaiz, "The effect of alkaline and silane treatments on mechanical properties and breakage of sisal fibers and poly(lactic acid)/sisal fiber composites," *Compos. Part A Appl. Sci.*, vol. 84, pp. 186-195, 2016. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.01.021> ↑3

- [16] V. Fiore, G. di Bella, and A. Valenza, "The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites," *Compos. B. Eng.*, vol. 68, pp. 14-21, 2015. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.025> ↑3
- [17] M. L. Sánchez, G. Capote, and J. Carrillo, "Composites reinforced with Guadua fibers: Physical and mechanical properties," *Constr Build Mater.*, vol. 228, p. 116749, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116749> ↑3
- [18] A. I. S. Brígida, V. M. A. Calado, L. R. B. Gonçalves, and M. A. Z. Coelho, "Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber," *Carbohydr. Polym.*, vol. 79, no. 4, pp. 832-838, 2010. Available: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.005> ↑3
- [19] F. R. Oliveira, L. Erkens, R. Fanguero, and A. P. Souto, "Surface modification of banana fibers by DBD plasma treatment," *Plasma Chem.*, vol. 32, no. 2, pp. 259-273, 2012. Available: <https://doi.org/10.1007/s11090-012-9354-3> ↑3
- [20] C. X. Wang, M. Du, J. C. Lv, Q. Q. Zhou, Y. Ren, G. L. Liu, D. W. Gao, and L. M. Jin, "Surface modification of aramid fiber by plasma induced vapor phase graft polymerization of acrylic acid. I. Influence of plasma conditions," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 349, pp. 333-342, 2015. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.036> ↑3
- [21] M. Fazeli, J. P. Florez, and R. A. Simão, "Improvement in adhesion of cellulose fibers to the thermoplastic starch matrix by plasma treatment modification," *Compos. B. Eng.*, vol. 163, pp. 207-216, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.048> ↑3
- [22] G. J. Wang, Y. W. Liu, Y. J. Guo, Z. X. Zhang, M. X. Xu, and Z. X. Yang, "Surface modification and characterizations of basalt fibers with non-thermal plasma," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 201, no. 15, pp. 6565-6568, 2007. Available: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.09.069> ↑3
- [23] D. Liu, P. Chen, M. Chen, and Z. Liu, "Surface modification of high performance PBO fibers using radio frequency argon plasma," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 206, no. 16, pp. 3534-3541, 2012. Available: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.02.033> ↑3
- [24] L. Ferreira, M. B. Evangelista, M. C. Martins, P. L. Granja, J. L. Esteves, and M. A. Barbosa, "Improving the adhesion of poly(ethylene terephthalate) fibers to poly(hydroxyethyl methacrylate) hydrogels by ozone treatment: Surface characterization and pull-out tests," *Polymer*, vol. 46, no. 23, pp. 9840-9850, 2005. Available: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.08.033> ↑3
- [25] M. L. Sánchez, W. Patiño, and J. Cárdenas, "Physical-mechanical properties of bamboo fibers-reinforced biocomposites: Influence of surface treatment of fibers," *J. Build. Eng.*, vol. 28, p. 101058, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101058> ↑3
- [26] *Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials*, ASTM International-Standards Worldwide. [Online]. Available: https://www.astm.org/d5229_d5229m-14.html ↑4
- [27] *Standard test method for density of high-modulus fibers*, ASTM International-Standards Worldwide. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d3800-16.html> ↑4

-
- [28] *Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials*, ASTM International-Standards Worldwide. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d4442-16.html> ↑5
- [29] *Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials*, ASTM International-Standards Worldwide. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d2395-17.html> ↑5
- [30] *Standard test methods for density determination of flax fiber*, ASTM International-Standards Worldwide. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d8171-18.html> ↑5
- [31] *Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*, ASTM International-Standards Worldwide. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d1037-12r20.html> ↑5
-

Martha Lissette Sánchez Cruz

Doctora en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Aeronáutica, en São José dos Campos (Brasil). Maestría en Ingeniería Civil de la Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, en Brasil. Ingeniera civil e hidráulica del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, en La Habana (Cuba). Profesora asistente e integrante del grupo de investigación Estructuras y Sísmica, de la Universidad Militar Nueva Granada.

Email: martha.sanchez@unimilitar.edu.co

Gil Capote Rodríguez

Doctor en Ciencias, Física, en la Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro (Brasil). Maestría en Física y Matemáticas: Área Física Nuclear en la Universidad de San Petersburgo (Rusia). Físico de la Universidad de San Petersburgo (Rusia). Profesor titular e integrante del grupo de investigación Ciencia de Materiales y Superficies (GCMS), de la Universidad Nacional de Colombia.

Email: gcapoter@unal.edu.co

Juan Pablo Patiño Quiazua

Ingeniero civil en la Universidad Militar Nueva Granada, en Bogotá (Colombia). Ingeniero residente en SAIN Ingenierías S. A. S. y estudiante de maestría en la Universidad Militar Nueva Granada.

Email: juan.patino.quiazua@gmail.com

