

Physico-mechanical performance of an epoxy matrix biocomposite reinforced with *Agave angustifolia* Haw.

Desempeño físico-mecánico de un biocompuesto de matriz epóxica reforzado con fibra de *Agave angustifolia* Haw.

Jorge Colin-Torres¹; Marcos M. González-Peña²;
Martin Hidalgo-Reyes^{3*}; Artemio Pérez-López⁴

¹Universidad Autónoma Chapingo, Ingeniería Agrícola y uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. Carretera México- Texcoco km 38.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

³Universidad Autónoma Chapingo, Ingeniería Mecánica Agrícola. Carretera México- Texcoco km 38.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

⁴Universidad Autónoma Chapingo, Ingeniería Agroindustrial. Carretera México- Texcoco km 38.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: mhidalgor@chapingo.mx; tel.: +52 595 952 1680.

Abstract

Introduction: Biocomposites reinforced with natural fibers are important for the use of biodegradable and renewable waste.

Objective: The aim of this study was to evaluate the physical-mechanical performance of a laminar biocomposite developed with a low viscosity epoxy polymer matrix, reinforced with *Agave angustifolia* Haw. bagasse fibers.

Materials and methods: Twelve panels were prepared combining three fiber contents (18 %, 24 % and 30 %) with four lengths (1 mm, 3 mm, 6 mm and mixed). Mechanical tests were performed, and the results were compared with the control (pure resin). Three chemical treatments (sodium bicarbonate, vinyl triethoxy silane and sodium hydroxide) and their effect on physico-mechanical properties were evaluated at the fiber-matrix interface; in addition, hybridization with glass fiber was evaluated.

Results and discussion: Adding fiber reduced the ultimate tensile and flexural strength of the biocomposite by 15.27 %; however, the tensile and flexural moduli increased by up to 1/3 compared to the control. The best chemical treatment (sodium bicarbonate) increased the mechanical properties of the fibers (hardness [46 %] and tensile strength [6 %] and flexural strength [24 %]) and impact strength (38 %), while density and moisture resistance decreased 17 % and 11 %, respectively. The agave/glass fiber combination increased flexural strength up to 77.3 %.

Conclusions: *A. angustifolia* fibers have potential to be used in industry, because they improve the mechanical properties of the material; in addition, their use would represent an alternative for managing waste residues.

Keywords: agave bagasse; sodium bicarbonate; glass fiber; agroindustrial wastes; material strength.

Resumen

Introducción: Los biocompuestos reforzados con fibras naturales son importantes por el aprovechamiento de residuos biodegradables y renovables.

Objetivo: Evaluar el desempeño físico-mecánico de un biocompuesto laminar desarrollado con una matriz de polímero epóxica de baja viscosidad, reforzada con fibras de bagazo de *Agave angustifolia* Haw.

Materiales y métodos: Se elaboraron 12 paneles combinando tres contenidos de fibra (18 %, 24 % y 30 %) con cuatro longitudes (1 mm, 3 mm, 6 mm y mezcla). Se realizaron pruebas mecánicas y los resultados se compararon con un patrón (resina pura). En la interfaz fibra-matriz se evaluaron tres tratamientos químicos (bicarbonato de sodio, vinil triethoxy silano e hidróxido de sodio) y su efecto en las propiedades físico-mecánicas; además, se evaluó la hibridación con fibra de vidrio.

Resultados y discusión: La incorporación de fibra redujo 15.27 % la resistencia última a la tracción y flexión del biocompuesto; sin embargo, incrementaron hasta 1/3 los módulos de tracción y flexión con respecto al patrón. El mejor tratamiento químico (bicarbonato de sodio) incrementó las propiedades mecánicas de las fibras (dureza [46 %] y resistencia a la tracción [6 %] y flexión [24 %]) y la resistencia al impacto (38 %), mientras que la densidad y la resistencia a la humedad disminuyeron 17 % y 11 %, respectivamente. La combinación fibras agave/vidrio incrementó la resistencia a la flexión hasta 77.3 %.

Conclusiones: Las fibras de *A. angustifolia* tienen potencial para implementarlas en la industria, ya que mejoran las propiedades mecánicas del material; además, su uso representaría una alternativa de manejo de los residuos de desecho.

Palabras clave: bagazo de agave; bicarbonato de sodio; fibra de vidrio; residuos agroindustriales; resistencia de materiales.

Introduction

The use of natural fibers has become important worldwide because these materials are a renewable resource (animal or vegetable), with low density, high stiffness and are biodegradable (Luna & Lizarazo-Marriaga, 2022). Fibers such as sisal, flax, palm, fique, coconut and bamboo, mostly agro-industrial waste, have been used in the design of materials that could be used as reinforcement in polymeric matrices, because they offer advantages such as abundance, low cost, and good mechanical properties (Cuellar & Muñoz, 2010), in addition to their low density compared to other composites (Atiqah et al., 2019). Sectors such as aerospace, automotive, furniture and construction have shown great interest in biocomposites reinforced with natural fibers (Thomas et al., 2011; Uddin & Kalyankar, 2011) that, alone or in combination, could replace synthetic fibers, to create highly competitive green composites (Lalit et al., 2018).

Hybrid composites of natural polymers and glass fiber reinforced materials represent a promising area of research because they are renewable, economical, and environmentally friendly materials compared to synthetic composites (Ashik et al., 2018). On this regard, composites with reinforcing agents with more than one type and shape have been developed to compensate for deficiencies, achieving a positive hybrid effect (Kwon et al., 2014), as two types of fibers offer advantages over their individual use in a polymeric matrix. Studies on hybridization combining natural and glass fiber have been carried out to develop composites with superior mechanical properties than only using glass fiber (Jawaid & Khalil, 2011; Md Shah et al., 2021), resulting in materials with lower costs and weights (Pérez et al., 2016).

Other research has evaluated the use of *Agave tequilana* Weber bagasse fibers as a reinforcement of biocomposites to improve their properties, such is the case of Torres-Tello et al. (2017), who showed that the addition of agave residue fiber (30% weight) in polyhydroxybutyrate (PHB) and hydroxyvalerate P (HB-HV) matrices increased their tensile modulus between 50 and 80 %, flexural modulus increased between 36 and 41 %, while impact strength increased significantly between 44 and 66 %. On the other hand, Mysamy and Rajendran (2011) showed that alkali treatment of *A. tequilana* fibers increased mechanical properties of biocomposites (tensile, compression, flexural and impact)

Agave angustifolia Haw. is one of the most widely used plants to produce mezcal, a traditional Mexican beverage (Pérez Hernández et al., 2016; Rodríguez & de la Cerna, 2017). In Mexico, mezcal agave has been used

Introducción

El uso de fibras naturales ha tomado importancia a nivel mundial, debido a que estos materiales constituyen un recurso renovable (animal o vegetal), poseen densidad baja, rigidez alta y son biodegradables (Luna & Lizarazo-Marriaga, 2022). Las fibras como el sisal, lino, palma, fique, coco y bambú, la mayoría desechos agroindustriales, se han empleado en el diseño de materiales que podrían utilizarse como refuerzo en matrices poliméricas, ya que ofrecen ventajas como abundancia, costo bajo y buenas propiedades mecánicas (Cuéllar & Muñoz, 2010), además de su baja densidad comparada con otros compuestos (Atiqah et al., 2019). Sectores como el aeroespacial, automotriz, mobiliario y de la construcción han mostrado gran interés por los biocompuestos reforzados con fibras naturales (Thomas et al., 2011; Uddin & Kalyankar, 2011) que, solas o en combinación, pudiesen reemplazar a las fibras sintéticas, para obtener compuestos verdes altamente competitivos (Lalit et al., 2018).

Los compuestos híbridos de polímeros naturales y los materiales reforzados con fibra de vidrio representan un área de investigación prometedora por ser materiales renovables, económicos y amigables con el medio ambiente, comparados con los compuestos sintéticos (Ashik et al., 2018). Al respecto, se han desarrollado compuestos con agentes de refuerzo de más de un tipo y forma para compensar deficiencias, obteniendo un efecto híbrido positivo (Kwon et al., 2014), pues dos tipos de fibras ofrecen ventajas sobre su uso individual en una matriz polimérica. En este sentido, se han realizado estudios sobre la hibridación combinando fibra natural y de vidrio para la obtención de compuestos con propiedades mecánicas superiores que solo utilizando fibra de vidrio (Jawaid & Khalil, 2011; Md Shah et al., 2021), de tal forma que se obtienen materiales de costos y pesos menores (Pérez et al., 2016).

Otras investigaciones han evaluado el uso de las fibras del bagazo de *Agave tequilana* Weber como refuerzo de biocompuestos para mejorar sus propiedades, tal es el caso de Torres-Tello et al. (2017), quienes mostraron que la adición de fibra de residuos de agave (30 % en peso) en matrices de polihidroxibutirato (PHB) e hidroxivalerato P (HB-HV) aumentó su módulo de tracción entre 50 y 80 %, el módulo de flexión incrementó entre 36 y 41 %, mientras que la resistencia al impacto incrementó significativamente entre 44 y 66 %. Por otra parte, Mysamy y Rajendran (2011) mostraron que el tratamiento con álcali en fibras de *A. tequilana* incrementó las propiedades mecánicas de los biocompuestos (tracción, compresión, flexión e impacto).

Una de las plantas más utilizadas para producir mezcal, bebida tradicional mexicana, es *Agave angustifolia* Haw.

for approximately 400 years in many rural areas from the north in Tamaulipas and Sonora to Oaxaca in the south (Aguirre & Eguiarte, 2013). During the grinding of the maguey segments, a residue called bagasse is generated, a process in which 15 to 20 kg are obtained on a wet basis for each liter of mezcal (Jacques et al., 2007). Data from the Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM, 2022) indicate that during 2021, about 160 000 t of bagasse were generated from the production of 8 099 591 L of mezcal.

Bagasse fibers are considered waste because they have no industrial demand; consequently, they have no cost and cause pollution problems because they are deposited directly on the ground without any process. Therefore, in order to achieve an integral use of bagasse, studies have been carried out for its chemical, morphological (Hidalgo et al., 2015) and mechanical characterization (Silva et al., 2009), which show that bagasse fibers have similar characteristics to other lignocellulosic fibers and could have several applications in the field of biocomposites.

The present study aims to evaluate the physical-mechanical performance of laminar biocomposites developed in a low viscosity epoxy polymer matrix, using *A. angustifolia* bagasse fiber as reinforcement, to improve the impact and flexural strength of the material, considering the length and fiber content, three chemical treatments and a hybridization with glass fiber.

Materials and Methods

This study was divided into three phases: a) material selection; b) biocomposite development; and c) physical-mechanical characterization in three stages (Figure 1).

Material selection

A low viscosity epoxy composite resin (N-15) with a density of $1.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, supplied by Epolyglas, was used as matrix. The bagasse of *A. angustifolia* was collected from a mezcal processing plant. Agave fibers were obtained from the bagasse and conditioned for use as reinforcement. Table 1 shows the main properties of *A. angustifolia*.

The bagasse was washed with water to remove residues, pulp and soil. The samples were then placed in a greenhouse-type solar dehydrator for 36 h at an average temperature of $45 \text{ }^\circ\text{C}$ to obtain fibers. To reduce their size, the fibers were cut in a paper guillotine and then chopped in a Wiley mill using grain sizes 10, 14, 20 and 30 with mesh openings of 2.00, 1.41, 0.84 and 0.59 mm, respectively.

(Pérez Hernández et al., 2016; Rodríguez & de la Cerna, 2017). En México, el agave mezcalero se utiliza desde hace aproximadamente 400 años en muchas zonas rurales del norte en Tamaulipas y Sonora hasta Oaxaca en el sur (Aguirre & Eguiarte, 2013). Durante la molienda de los gajos de maguey se genera un residuo denominado bagazo, proceso en el cual se obtienen de 15 a 20 kg en base húmeda por cada litro de mezcal (Jacques et al., 2007). Datos del Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM, 2022) indican que durante el 2021 se generaron cerca de 160 000 t de bagazo derivados de la producción de 8 099 591 L de mezcal.

Las fibras del bagazo se consideran desechos por no tener demanda industrial, en consecuencia, no tienen costo y repercuten en problemas de contaminación, pues se depositan directamente en el suelo sin algún proceso. Por ello, para lograr un aprovechamiento integral del bagazo, se han realizado estudios para su caracterización química, morfológica (Hidalgo et al., 2015) y mecánica (Silva et al., 2009), los cuales demuestran que las fibras del bagazo poseen características similares a otras fibras lignocelulósicas y que podrían tener varias aplicaciones en el campo de los biocompuestos.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño físico-mecánico de biocompuestos laminares desarrollados en una matriz de polímero epóxico de baja viscosidad, utilizando fibra de bagazo de *A. angustifolia* como refuerzo, para mejorar la resistencia al impacto y flexión del material, considerando la longitud y contenido de fibra, tres tratamientos químicos y una hibridación con fibra de vidrio.

Materiales y métodos

El trabajo se dividió en tres fases: a) selección de materiales; b) elaboración de biocompuestos y c) caracterización físico-mecánica en tres etapas (Figura 1).

Selección de materiales

Se utilizó como matriz una resina epóxica para *composite* de baja viscosidad (N-15) con una densidad de $1.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, suministrada por la empresa Epolyglas. El bagazo de *A. angustifolia* se recolectó en una planta procesadora de mezcal. Las fibras de agave se obtuvieron del bagazo y se acondicionaron para utilizarse como refuerzo. El Cuadro 1 presenta las propiedades principales de *A. angustifolia*.

El bagazo se lavó con agua para la eliminación de residuos, pulpa y tierra. Enseguida, las muestras se ingresaron a un deshidratador solar tipo invernadero durante 36 h a una temperatura promedio de $45 \text{ }^\circ\text{C}$, para la obtención de fibras. Para reducir su tamaño, las fibras se cortaron en una guillotina para papel, posteriormente se trozaron en un molino tipo Wiley

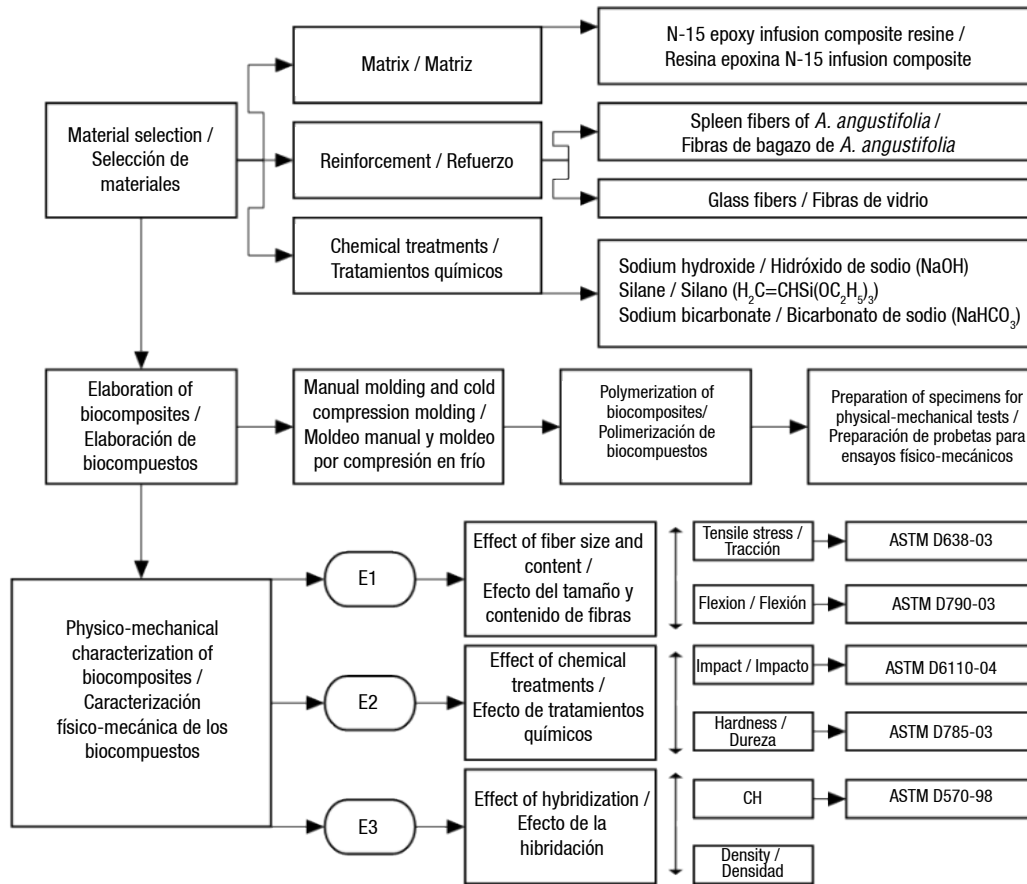


Figure 1. Methodology to determine the physical-mechanical performance of biocomposites developed in a low viscosity epoxy polymer matrix, using *Agave angustifolia* bagasse fiber as reinforcement.

Figura 1. Metodología para determinar el desempeño físico-mecánico de biocompuestos desarrollados en una matriz de polímero epóxico de baja viscosidad, utilizando fibra de bagazo de *Agave angustifolia* como refuerzo.

Table 1. Mechanical and chemical properties of *Agave angustifolia*.

Cuadro 1. Propiedades mecánicas y químicas de *Agave angustifolia*.

Component/ Componente	UTS*/RUT* (MPa)	MOE*/MOE* (GPa)	Elongation/ Alargamiento (%)	Cellulose/ Celulosa (%)	Hemicellulose/ Hemicelulosa (%)	Lignin/ Lignina (%)	Source/ Fuente
Leaves/ Hojas	332-421	18-20	1.9-2.4				Silva et al. (2009)
Bagasse/ Bagazo	42.6-144	0.56-1.54	0.25-0.62	48.04	34.08	20.69	Hidalgo et al. (2015)

*UTS: Ultimate tensile strength. MOE: Modulus of elasticity.

*RUT: Resistencia última a la tracción. MOE: Módulo de elasticidad.

Before chopping, the fibers were dehydrated in an oven at 60 °C for 12 h; then, the cuttings were sieved in a Fritsch vibrating machine for 2 min with sieves number 30, 40 and 60 of 0.59, 0.42 and 0.25 mm, respectively. Finally, the fibers were dehydrated for 12 h at 60 °C until moisture content of approximately 6 %.

Chemical treatments

The fibers were modified by implementing the chemical treatments used by Cisneros et al. (2016)

utilizando las granulometrías de número 10, 14, 20 y 30 con apertura de las mallas 2.00, 1.41, 0.84 y 0.59 mm, respectivamente.

Antes de trozar las fibras, estas se deshidrataron en una estufa a 60 °C durante 12 h; después, los cortes se tamizaron en un equipo vibratorio Fritsch durante 2 min con las cribas número 30, 40 y 60 de 0.59, 0.42 y 0.25 mm, respectivamente. Finalmente, las fibras se deshidrataron durante 12 h a 60 °C hasta obtener humedad aproximada de 6 %.

and Fiore et al. (2018), who found an increase in the mechanical properties of composites reinforced with natural fibers chemically treated with sodium bicarbonate (NaHCO_3), vinyl triethoxy silane ($\text{H}_2\text{C}=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$) and sodium hydroxide (NaOH).

Mercerization was the first chemical treatment performed on the agave fibers, for 24 h in a 5 % NaOH solution at room temperature. It was also used as a pretreatment for the other chemical treatments (vinyl triethoxy silane and sodium bicarbonate), placing the fibers for 15 min in 2 % NaOH at room temperature to activate the hydroxyl groups.

The second treatment was vinyl triethoxy silane ($\text{H}_2\text{C}=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$), which was dissolved at 5 % in an ethanol-water mixture with a 95:5 weight ratio. To ensure hydrolysis, the solution was stirred for 1 h adding acetic acid to maintain the pH between 3.5 and 4. Subsequently, the *A. angustifolia* fibers were immersed in the solution for 90 min at room temperature. Finally, the hydroxyl silane reaction was placed in an oven at 100 °C for 30 min.

Finally, the third treatment consisted of immersing the fibers in a 10 % NaHCO_3 solution at room temperature for 120 h.

The treatments were carried out in a washing solution with a solvent-fiber ratio of 10:1 and mixed in a VWR® magnetic stirrer. At the end, the fibers were rinsed with water to remove residual reagents and recovered by vacuum filtration until the solution was neutralized.

Biocomposite preparation

Twelve 110 mm x 200 mm x 3 mm panels were fabricated using a combination of hand lay-up and cold compression molding techniques (Betelie et al., 2019; Salleh et al., 2018). The matrix was prepared from the epoxy infusion resin and its catalyst with a 10:1 weight ratio. The catalyst was added to the resin by mixing until the substance was homogenized; the required percentage of agave fiber was added and mixed until the fibers were completely wetted. The mixture was poured into a mold coated with release wax and covered with a steel plate also coated with wax to facilitate its removal and to obtain a good surface finish. Simulated pressing of the panel was done with a 20 kg load and allowed to cure for 24 h at room temperature. Figure 2 shows the mechanism used in the molding of the biocomposite panels. For polymerization, the panel was placed in an oven at 45 °C for 4 h.

The molded boards were cut into rectangular strips according to D790-17 (ASTM, 2017) using an OMGA 500 radial saw, to obtain the specimens for the ultimate tensile strength (UTS), impact and three-point ultimate

Tratamientos químicos

Las fibras se modificaron implementando los tratamientos químicos utilizados por Cisneros et al. (2016) y Fiore et al. (2018), quienes obtuvieron un incremento en las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con fibras naturales tratadas químicamente con bicarbonato de sodio (NaHCO_3), vinil triethoxy silano ($\text{H}_2\text{C}=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$) e hidróxido de sodio (NaOH).

La mercerización fue el primer tratamiento químico realizado a las fibras de agave, durante 24 h en una solución de NaOH al 5 % a temperatura ambiente. También se utilizó como pretratamiento para los otros tratamientos químicos (vinil triethoxy silano y bicarbonato de sodio), colocando las fibras durante 15 min en NaOH al 2 % a temperatura ambiente para activar los grupos hidroxilo.

Como segundo tratamiento se utilizó vinil triethoxy silano ($\text{H}_2\text{C}=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$), el cual se disolvió al 5 % en una mezcla etanol-agua con una relación en peso 95:5. Para asegurar la hidrólisis, la solución se agitó durante 1 h agregando ácido acético para mantener el pH entre 3.5 y 4. Posteriormente, las fibras de *A. angustifolia* se sumergieron en la solución durante 90 min a temperatura ambiente. Por último, la reacción hidroxilo-silano se introdujo en un horno a 100 °C durante 30 min.

Finalmente, el tercer tratamiento consistió en la inmersión de las fibras en una solución de NaHCO_3 al 10 %, a temperatura ambiente durante 120 h.

Los tratamientos se realizaron en una solución de lavado con una relación disolvente-fibra de 10:1 y se mezclaron en un agitador magnético VWR®. Al final, las fibras se enjuagaron con agua para eliminar los reactivos residuales y se recuperaron con filtración por vacío hasta neutralizar la solución.

Elaboración de biocompuestos

Doce paneles de 110 mm x 200 mm x 3 mm se elaboraron utilizando una combinación de las técnicas de moldeo de laminación manual (*hand lay up*) y compresión en frío (Betelie et al., 2019; Salleh et al., 2018). La matriz se preparó a partir de la resina epóxica para infusión y su catalizador con una relación en peso 10:1. El catalizador se añadió a la resina mezclando hasta homogeneizar la sustancia; el porcentaje de fibra de agave requerido se agregó y se mezcló hasta que las fibras se humedecieron completamente. La mezcla se vertió en un molde recubierto con cera desmoldante y se tapó con una placa de acero también cubierta con cera para facilitar su extracción y obtener un buen acabado de la superficie. La simulación del prensado

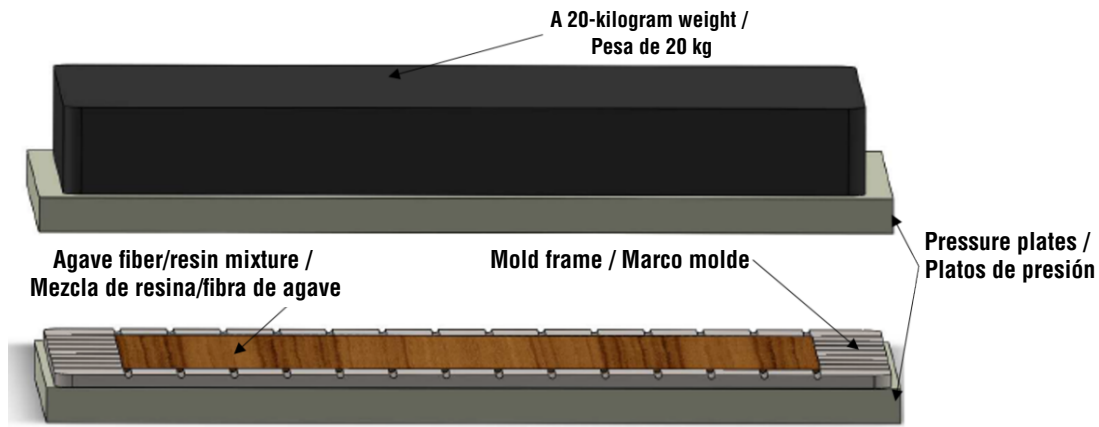


Figure 2. Mechanism to produce panels from a low viscosity epoxy polymer matrix, using *Agave angustifolia* bagasse fiber as reinforcement.

Figura 2. Mecanismo para la elaboración de paneles a partir de una matriz de polímero epóxico de baja viscosidad, utilizando fibra de bagazo de *Agave angustifolia* como refuerzo.

flexural strength (UFS) mechanical tests. The strips had the following measurements: 175 mm x 19 mm x 3.8 mm for UTS test, 127 mm x 8 mm x 3.8 mm for the impact test and 85 mm x 15 mm x 3.8 mm for UFS; subsequently, the UTS test strips were machined on computerized numerical control equipment to obtain type I specimens. To remove excess, all specimens were roughened with 240 grit sandpaper.

Three-stage physico-mechanical characterization

Effect of size and fiber content (E1)

Mechanical tests were performed on 12 combinations derived from four lengths (1, 3, 6 mm, and a mixture in equal proportion) and three fiber contents (18, 24 and 30 %), and compared with a control of resin panels without fiber, for the selection of the biocomposite with the best mechanical performance.

Mechanical properties were determined with an INSTRON-3282 universal testing machine equipped with a 100 kN and 500 W load cell with digital loading software, using specimens for the UTS and MOE tests.

Effect of chemical treatment (E2)

To increase the strengths (mechanical and impact) of the fiber-matrix interface, the samples were immersed for 12 h in NaHCO_3 , $\text{H}_2\text{C}=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ and NaOH , before and then washed with water (Benkhelladi et al., 2020). Impact resistance was measured with an INSTRON-CEAST 9050 machine equipped with a 1 J Charpy hammer.

del panel se hizo con una carga de 20 kg y se dejó curar durante 24 h a temperatura ambiente. La Figura 2 muestra el mecanismo utilizado en el moldeo de las placas del biocompuesto. Para su polimerización, el panel se ingresó en un horno a 45 °C durante 4 h.

Las placas moldeadas se cortaron en tiras rectangulares según la norma D790-17 (ASTM, 2017) con una sierra radial OMGA 500, para obtener las probetas de los ensayos mecánicos de resistencia última a la tracción (RUT), impacto y resistencia última a la flexión en tres puntos (MOR). Las tiras tuvieron las medidas siguientes: 175 mm x 19 mm x 3.8 mm para el ensayo RUT, 127 mm x 8 mm x 3.8 mm para la prueba a impacto y 85 mm x 15 mm x 3.8 mm para MOR; posteriormente, las tiras para ensayo RUT se maquinaron en un equipo de control numérico computarizado para obtener probetas tipo I. Para eliminar excedentes, todas las probetas se desbastaron con una lija de agua número 240.

Caracterización físico-mecánica en tres etapas

Efecto del tamaño y contenido de fibra (E1)

Se realizaron pruebas mecánicas a 12 combinaciones derivadas de cuatro longitudes (1, 3, 6 mm, además de una mezcla en igual proporción) y tres contenidos de fibra (18, 24 y 30 %), y se compararon con un testigo de paneles de resina sin fibra, para la selección del biocompuesto con mejor desempeño mecánico.

Las propiedades mecánicas se determinaron con una máquina de ensayos universal INSTRON-3282 equipada con una celda de carga de 100 kN y 500 W con un

The specimens were subjected to hardness tests to know the effect of the treatments on the mechanical properties of the material and to determine the differences in penetration resistance. A 6.35 mm ball indenter Mitutoyo-ARK equipment was used to determine the Rockwell hardness on the surface of the material; in addition, a morphological analysis was included, using scanning electron microscopy (QUANTA 504), to observe the fracture surface of the specimens. Finally, the influence of the treatments on the density of the specimens was determined.

Effect of hybridization on flexural strength (E3)

For the MOE test, the agave fiber content of the panel was set at 30 % weight added with five percentages of glass fiber (10, 15, 20, 25 and 30 %), based on the best combination of the first experiment.

Glass fiber, mainly composed of silica (SiO_2), is one of the main reinforcements used in biocomposite technology that improves properties compared to conventional materials, as it stands out for its low cost, as well as its resistance to fatigue and deformation (Tanzi et al., 2019), whose values range from 70 to 80 GPa and 1700 to 2200 MPa, respectively; in addition, they resist temperatures above 1700 °C (Park & Seo, 2011).

Table 2 shows the tests carried out at each stage according to the standards, dimensions, number of samples and parameters of each test.

Statistical Analysis

The physico-mechanical properties of the biocomposite were analyzed with a completely randomized experimental design, comparing, for each treatment, the data of UTS, UFS, impact, hardness, tensile (TMO) and flexural modulus (FMO), density and moisture resistance.

The first experiment was conducted with a 4 x 3 factorial arrangement (four percentages and three fiber sizes). The second experiment was under a one-factor design with three chemical treatments. The third experiment was carried out with one factor (hybridization) with five percentages of glass fiber.

The results were examined by an ANOVA with SAS v. 9.0 (Statistical Analysis System, 2002). The *F* test was used to determine the level of significance in each treatment, while significant differences between means were identified with the Tukey test ($P = 0.05$).

Results and Discussion

Samples cut with the mesh (number 14) and sieved on the sieve (number 30) measured 6 mm in length (Figure 3).

software de carga digital, utilizando probetas para las pruebas RUT y MOR.

Efecto del tratamiento químico (E2)

Para incrementar las resistencias (mecánica y al impacto) de la interfaz fibra-matriz, las muestras se sumergieron durante 12 h en NaHCO_3 , $\text{H}_2\text{C}=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ y NaOH , antes y después lavarlas con agua (Benkhelladi et al., 2020). La resistencia al impacto se midió con una máquina INSTRON-CEAST 9050 equipada con un martillo Charpy de 1 J.

Los ejemplares se sometieron a pruebas de dureza para conocer el efecto de los tratamientos sobre las propiedades mecánicas del material y determinar las diferencias en la resistencia a la penetración. Para obtener la dureza Rockwell en la superficie del material se utilizó un equipo Mitutoyo-ARK con indentador de bola de 6.35 mm; además, se incluyó un análisis morfológico, mediante microscopía electrónica de barrido (QUANTA 504), para observar la superficie de fractura de las probetas. Finalmente, se determinó la influencia de los tratamientos en la densidad de los ejemplares.

Efecto de la hibridación en la resistencia a la flexión (E3)

Para efectuar el ensayo MOR, el contenido de fibra de agave del panel se estableció en 30 % en peso adicionado con cinco porcentajes de fibra de vidrio (10, 15, 20, 25 y 30 %), con base en la mejor combinación del primer experimento.

La fibra de vidrio, compuesta principalmente de sílice (SiO_2), es uno de los principales refuerzos utilizados en la tecnología de biocompuestos que mejora las propiedades en comparación con los materiales convencionales, pues destaca por su bajo costo, así como por su resistencia a la fatiga y deformación (Tanzi et al., 2019), cuyos valores oscilan entre 70 a 80 GPa y 1700 a 2200 MPa, respectivamente; además, resisten temperaturas superiores a 1700 °C (Park & Seo, 2011).

El Cuadro 2 presenta los ensayos desarrollados en cada etapa con respecto a las normas, dimensiones, número de muestras y parámetros de cada prueba.

Análisis estadístico

Las propiedades físico-mecánicas del biocompuesto se analizaron con un diseño experimental completamente aleatorio, comparando, por cada tratamiento, los datos de RUT, MOR, impacto, dureza, módulos de tracción (MOT) y flexión (MOF), densidad y resistencia a la humedad.

El primer experimento se realizó con un arreglo factorial 4 x 3 (cuatro porcentajes y tres tamaños de fibra). El segundo experimento se hizo bajo un diseño

Table 2. Physical-mechanical tests performed on the biocomposites developed in a low viscosity epoxy polymer matrix with *Agave angustifolia* bagasse fiber as reinforcement.

Cuadro 2. Ensayos físico-mecánicos realizados en los biocompuestos desarrollados en una matriz de polímero epóxico de baja viscosidad con fibra de bagazo de *Agave angustifolia* como refuerzo.

Stage	Test/Ensayo	Standard/ Norma	Treatment/ Tratamiento	Replication/ Repetición	Total	Dimension/ Dimensión (mm)	Parameter/ Parámetro
E1	Tensile/ Tracción	D638-22 (ASTM, 2022)	13	6	78	Tipo I	3.85 mm·min ⁻¹ 23 °C
E1	Flexure/ Flexión	D790-17 (ASTM, 2017)	13	8	104	85 x 15 x 3.8	1.85 mm·min ⁻¹ 23 °C
E2	Tensile/ Tracción	D638-22 (ASTM, 2022)	4	8	32	Tipo I	3.85 mm·min ⁻¹ 23 °C
E2	Flexure/ Flexión	D790-17 (ASTM, 2017)	4	10	40	85 x 15 x 3.8	1.85 mm·min ⁻¹ 23 °C
E2	Impact/ Impacto	D6110-18 (ASTM, 2018)	5 x 2	10 x 2	100	127 x 8 x 3.8	3.4 m·s ⁻¹ 23 °C
E2	Hardness/ Dureza	D785-23 (ASTM, 2023)	5	8	32	2 x 2 x 2	960 h 23 °C
E2	Moisture absorption/ Absorción de humedad	D570-22 (ASTM, 2022)	4	10	40	85 x 15 x 3.8	960 h, 22 °C
E2	Density/ Densidad	-	5	10	50	85 x 15 x 3.8	Geometrical method/ Método geométrico
E2	Fracture/ Fractura	-	4	5	20	3 x 3.8 x 0.5	15 kV, 23 °C
E3	Flexure/ Flexión	D790-17 (ASTM, 2017)	5	10	50	85 x 15 x 3.8	1.85 mm·min ⁻¹ 23 °C

The fiber cut and sieved with the mesh (number 20) and the sieve (number 40) measured 3 mm on average, while the size of the fiber cut with the mesh (number 30) and sieved on the sieve (number 60) was 1 mm (Figure 3).

Effect of fiber size and fiber content on tensile and flexural strength

The significant effect of fiber size and fiber content, in addition to their interaction with the biocomposite, was detected, deducing the influence of these factors on the mechanical properties (Figure 4). Fiber content reduced UTS and UFS values, while TMO and FMO increased.

Mechanical strength decreased with the incorporation of agave fibers to biocomposite. The highest value was recorded in the 1mm18 configuration (1 mm length and 18 % fiber), where the UTS was 30.5 MPa compared to 36 MPa in the pure epoxy resin (PR) matrix, while the other variants showed no significant difference. UFS decreased in all treatments; the highest values were found in 1mm18 and 1mm24 with 42 MPa and 41.5 MPa, respectively, compared to 61.26 MPa in RP. For 3mm30 TMO (4.5 GPa) was higher compared to RP (3.2 GPa), as well as FMO = 3.96 GPa compared to FMO = 2.93 GPa in RP.

unifactorial de tres tratamientos químicos. El tercer experimento se realizó con un factor (hibridación) con cinco porcentajes de fibra de vidrio.

Los resultados se examinaron mediante análisis de varianza con SAS v. 9.0 (Statistical Analysis System, 2002). La prueba *F* se utilizó para determinar el nivel de significancia en cada tratamiento, mientras que las diferencias significativas entre medias se identificaron con la prueba Tukey ($P = 0.05$).

Resultados y discusión

Las muestras cortadas con la malla número 14 y tamizadas en la criba número 30 midieron 6 mm de longitud (Figura 3). La fibra cortada y tamizada con la malla número 20 y la criba número 40 midió 3 mm en promedio, mientras que el tamaño de la fibra cortada con la malla 30 y tamizada en la criba 60 fue de 1 mm (Figura 3).

Efecto del tamaño y contenido de fibra sobre la tracción y flexión

Se detectó el efecto significativo del tamaño y contenido de fibra, además de su interacción con el biocompuesto, deduciendo así la influencia de estos factores en las

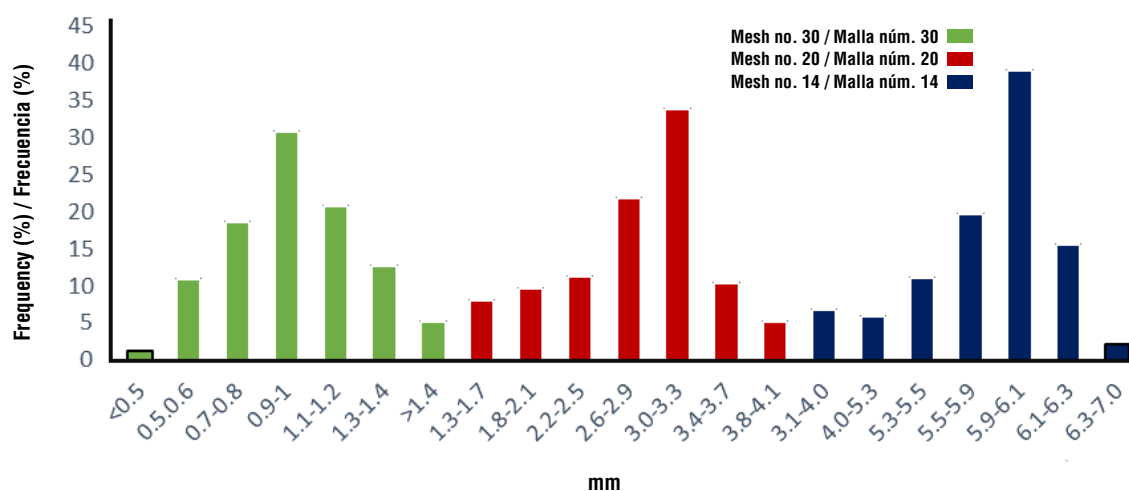


Figure 3. Fiber length of *Agave angustifolia* based on the number of mesh used for cutting.

Figura 3. Longitud de fibras de *Agave angustifolia* con base en el número de malla empleada para el corte.

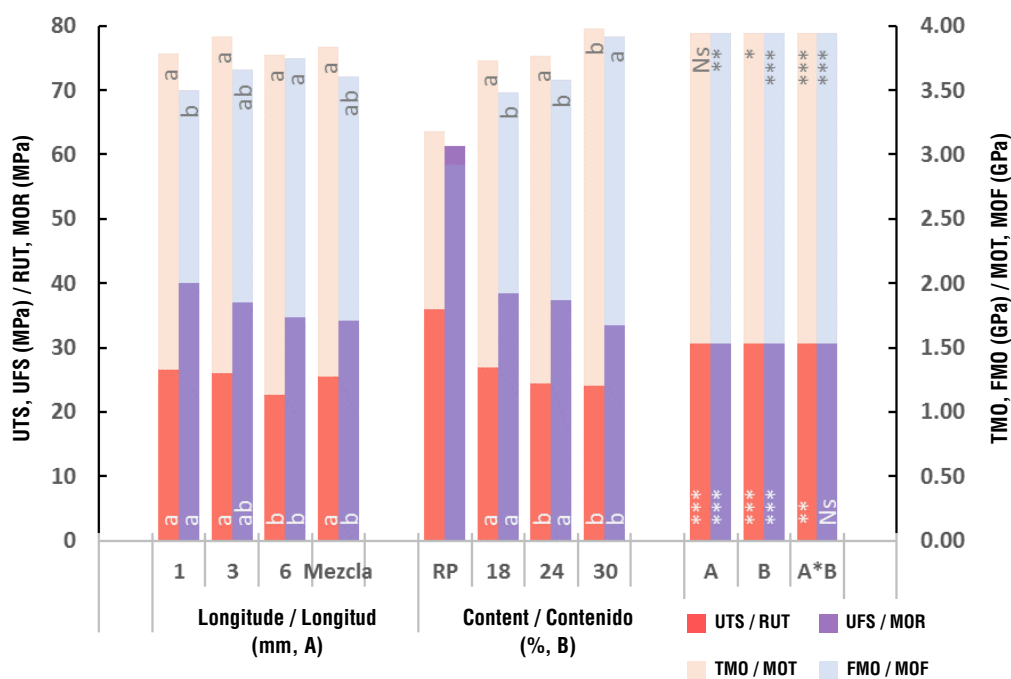


Figure 4. Biocomposite properties in relation to the length and fiber content of *Agave angustifolia*. Different letters between levels of each factor indicate statistically significant difference: ***P < 0.001, **P < 0.01, *P < 0.05, ns = non-significant. UTS: ultimate tensile strength, UFS: ultimate flexural strength TMO: tensile modulus and FMO: flexural modulus.

Figura 4. Propiedades del biocompuesto respecto a la longitud y contenido de fibra del bagazo de *Agave angustifolia*. Letras diferentes entre niveles de cada factor indican diferencia estadísticamente significativa: ***P < 0.001, **P < 0.01, *P < 0.05, ns = no significativo. RUT: resistencia última a la tracción, MOR: resistencia última a la flexión MOT: módulo de tracción y MOF: módulo de flexión.

The improvement in TMO is due to the incorporation of a rigid phase (fiber) in the matrix, as indicated by Cisneros et al. (2016) and Yan et al. (2012), who had similar results. Mysamy and Rajendran (2011) found that equilibrium in mechanical properties with *Agave americana* L. fibers was observed in 3-mm samples and a fiber-resin ratio of 3:7.

propiedades mecánicas (Figura 4). En general, el contenido de fibra redujo los valores de RUT y MOR, mientras que los MOT y MOF incrementaron.

La resistencia mecánica disminuyó con la incorporación de fibras de agave al biocompuesto. El valor más alto se obtuvo en la configuración 1mm18 (1 mm de

For UTS, in the Tukey test analysis, the means of the treatments were compared with a critical value of the studentized range of 4.8632 and 4.8118, and a minimum significant difference (MSD) of 7.0231 and 10.781, while for UFS the same critical value was used, but with an MSD of 0.8316 and 0.4330.

Effect of chemical treatment on physical and mechanical properties

Hardness and Density

The hardness values of the chemical treatments versus RP, incorporating the treated fibers, increased significantly in contrast to the untreated fiber composites (UFC). The NaHCO_3 -treated fiber (FBIC) treatment increased 46.4 %, followed by mercerized fiber surface (MERF) treatment with 34.7 % and fiber treated with vinyl triethoxy silane (FSIL) with 16.7 % compared to UFC, given the good affinity between the fiber-matrix interface, which allowed a better distribution of the fibers and decreased the formation of holes and defects in the material (Cisneros et al., 2016). Koffi et al. (2021) reported 24 % increases in the strength of a high-density polyethylene matrix reinforced with birch fiber treated with maleic anhydride.

According to Mahfoudh et al. (2013), good contact between the fiber-matrix interface should increase the density of biocomposites; however, in this study, the incorporation of treated fibers reduced this parameter. This could be attributed to the fiber surface treatment that modifies its properties (Cisneros et al., 2016; Fiore et al., 2018); for example, NaHCO_3 treatment removes a portion of hemicellulose, lignin and waxy substances covering the outer surface of the fiber (Fiore et al., 2018). FBIC treatment reduced 11 % density regarding CFU and 17 % regarding RP.

Moisture content

Moisture absorption of the developed biocomposites was evaluated as the difference between dry and wet weight of the samples. When determining the weight gain according to time, the materials reinforced with treated fiber had higher moisture compared to CFU, exhibiting the highest percentage in FSIL (6.5 %) and FBIC (11 %), due to the elimination of extractive substances and waxes during the treatment (Pérez et al., 2014). Cisneros et al. (2016) reported similar results in *A. tequilana* fibers treated with silane, with an increase in moisture content of 8 %.

For the MERF treatment, from 2 h of immersion in water, a lower weight gain was observed compared to UFC, since 6 % less water absorption was recorded. This

longitud y 18 % de fibra), donde la RUT fue 30.5 MPa respecto a los 36 MPa en la matriz de resina epóxica pura (RP), mientras que las demás variantes no mostraron diferencia significativa. La MOR disminuyó en todos los tratamientos; los valores más altos se obtuvieron en 1mm18 y 1mm24 con 42 MPa y 41.5 MPa, respectivamente, contra 61.26 MPa en RP. Para 3mm30 se obtuvo MOT (4.5 GPa) superior que en RP (3.2 GPa), así como MOF = 3.96 GPa con respecto a MOF = 2.93 GPa en RP.

La mejora en MOT se debe a la incorporación de una fase rígida (fibra) en la matriz, tal como indican Cisneros et al. (2016) y Yan et al. (2012), quienes obtuvieron resultados similares. Mysamy y Rajendran (2011) encontraron que el equilibrio en las propiedades mecánicas con fibras de *Agave americana* L. se obtuvo en muestras de 3 mm y una relación fibra-resina de 3:7.

Para RUT, en el análisis de la prueba Tukey, las medias de los tratamientos se compararon con un valor crítico del rango estudentizado de 4.8632 y 4.8118, y una diferencia mínima significativa (DSM) de 7.0231 y 10.781, mientras que para MOR se utilizó el mismo valor crítico, pero con una DSM de 0.8316 y 0.4330.

Efecto del tratamiento químico sobre las propiedades físicas y mecánicas

Dureza y densidad

Los valores de dureza de los tratamientos químicos versus RP, incorporando las fibras tratadas, incrementaron significativamente a diferencia de los compuestos de fibra sin tratamiento (FST). El tratamiento de fibra tratada con NaHCO_3 (FBIC) incrementó 46.4 %, seguido del tratamiento superficial de fibra mercerizada (FMER) con 34.7 % y fibra tratada con vinil triethoxy silano (FSIL) con 16.7 % en comparación con FST, dada la buena afinidad entre la interfaz fibra-matriz, la cual permitió una mejor distribución de las fibras y disminuyó la formación de huecos y defectos en el material (Cisneros et al., 2016). Koffi et al. (2021) señalaron incrementos del 24 % en la dureza de una matriz de polietileno de alta densidad reforzada con fibra de abedul tratada con anhídrido maleico.

De acuerdo con Mahfoudh et al. (2013), el buen contacto entre la interfaz fibra-matriz debería incrementar la densidad de los biocompuestos; sin embargo, en el presente estudio, la incorporación de fibras tratadas redujo este parámetro. Esto podría atribuirse al tratamiento superficial de la fibra que modifica sus propiedades (Cisneros et al., 2016; Fiore et al., 2018); por ejemplo, el tratamiento con NaHCO_3 elimina una porción de hemicelulosa, lignina y sustancias ceras que cubren la superficie externa de la fibra (Fiore et al.,

trend was maintained until 960 h; that is, this treatment presented better compatibility between the fiber-matrix interface, which made the biocomposite more hydrophobic, increased moisture resistance and gave greater applications to the material (Zhang et al., 2013).

Tensile strength

The reinforced biocomposites had a slight increase in UTS compared to UFC, indicating an improvement in the fiber-matrix interface; in particular, the FBIC treatment had a minimum increase of 6 % compared to RP. Despite the positive effect that the treatments had on UTS, they affected the TMO of the material, showing 34.3 % less than UFC and 14.7 % less than RP, because the adhesion mechanism gave a ductile profile to the interface, as reported by Zhou et al. (2022), who reported similar results in wood and plastic composites.

Flexural strength

The reinforced biocomposites showed a slight increase in flexural strength compared to UFC. In particular, the FBIC treatment generated a maximum increase of 24 % versus RP, while FMO was 34.7 % lower than UFC and 9.3 % lower than RP.

Impact resistance

Impact resistance for UFC increased 2 % compared to RP and significant increases were found in biocomposites with treated fiber; FBIC increased 36 % compared to UFC and up to 38 % compared to RP. Recent studies show that NaOH treatment plays an important role in the bonding of concrete composites because it improves the mechanical properties of natural fiber reinforced materials (Shah et al., 2021).

Fracture analysis

The impact tested specimens were observed under a scanning electron microscope to analyze the behavior of the treated fiber-matrix interface. Fiber pullout due to low interfacial bonding, as well as the presence of holes due to the manufacturing process of the materials, were identified as major factors of impact fracture (Figure 5).

The UFC and FSIL biocomposites showed a failure mode comprising pulled-out fibers, as well as less breakage and presence of holes (Figures 5a-b). This indicates lower interfacial adhesion; in addition, FSIL exhibited signs of crack propagation at the end of the sample. Figure 5d shows the fracture mode of FBIC biocomposites, which presented a higher number of breaks than MERF (Figure 5c), as well as less presence of holes, indicating better interaction at the interface and better fiber distribution.

2018). El tratamiento FBIC redujo 11 % la densidad con respecto a FST y 17 % respecto a RP.

Contenido de humedad

La absorción de humedad de los biocompuestos desarrollados se evaluó como la diferencia entre el peso seco y húmedo de las muestras. Al determinar la ganancia de peso en función del tiempo, los materiales reforzados con fibra tratada tuvieron humedad mayor que las FST, presentando el mayor porcentaje en FSIL (6.5 %) y FBIC (11 %), debido a la eliminación de sustancias extractivas y ceras durante el tratamiento (Pérez et al., 2014). Cisneros et al. (2016) señalaron resultados similares en fibras de *A. tequilana* tratadas con silano, con incremento en la humedad del 8 %.

En el tratamiento FMER se observó, desde las 2 h de inmersión en agua, una ganancia menor de peso que con FST, ya que se obtuvo 6 % menor absorción de agua. Tal tendencia se mantuvo hasta las 960 h; es decir, este tratamiento presentó mejor compatibilidad entre la interfaz fibra-matriz, lo cual hizo más hidrófobo al biocompuesto, incrementó la resistencia a la humedad y otorgó mayores aplicaciones al material (Zhang et al., 2013).

Tracción

Los biocompuestos reforzados tuvieron ligero incremento en RUT comparado con FST, indicando una mejora en la interfaz fibra-matriz; en particular, el tratamiento FBIC tuvo incremento mínimo del 6 % comparado con RP. A pesar del efecto positivo que tuvieron los tratamientos en RUT, estos afectaron el MOT del material, mostrando 34.3 % menos que FST y 14.7 % menos que RP, debido a que el mecanismo de adhesión otorgó un perfil dúctil a la interfaz, tal como reportaron Zhou et al. (2022), quienes obtuvieron resultados similares en compuestos de madera y plástico.

Flexión

Los biocompuestos reforzados mostraron ligero incremento en la resistencia a la flexión comparados con FST. En particular, el tratamiento FBIC generó aumento máximo de 24 % frente a RP, mientras que el MOF fue 34.7 % menor que FST y 9.3 % menor que RP.

Resistencia al impacto

La resistencia al impacto para FST aumentó 2 % comparada con RP y se encontraron incrementos importantes en los biocompuestos con fibra tratada; FBIC aumentó 36 % con respecto a FST y hasta 38 % en comparación con RP. Estudios recientes demuestran que el tratamiento con NaOH juega un papel importante en la adhesión de los compuestos de concreto, debido a

Chaitanya and Singh (2018) had similar results on sisal fibers treated with NaHCO_3 and NaOH . On the other hand, Cisneros et al. (2016) and Robledo et al. (2020) worked with fiber reinforcements treated with maleic anhydride grafted polyethylene as a compatibilizer to improve adhesion and dispersion of the materials.

Effect of moisture on mechanical properties

After immersing the biocomposites in water, the FBIC treatment showed the widest range of reduction in tensile strength, flexural strength, and impact strength with 47, 50 and 27 %, respectively (Figure 6). The deterioration of mechanical properties is due to insufficient tensile transfer in the biocomposites affected by sample immersion (Alomayri et al., 2014), which decreased the fiber-matrix interface interaction (Haameem et al., 2016).

Effect of hybridization on flexural strength

UFS was higher in the RP panel compared to the panel with only agave fiber (30FA-0GF); however, it increased

que mejora las propiedades mecánicas de los materiales reforzados con fibras naturales (Shah et al., 2021).

Análisis de fractura

Las probetas ensayadas a impacto se observaron en un microscopio electrónico de barrido para analizar el comportamiento de la interfaz fibra tratada-matriz. El arranque de fibras debido a una baja unión interfacial, así como la presencia de huecos por el proceso de fabricación de los materiales, se identificaron como factores principales de fractura por impacto (Figura 5).

Los biocompuestos FST y FSIL exhibieron un modo de falla que comprende fibras extraídas, así como menor rotura y presencia de huecos (Figuras 5a-b). Esto indica una menor adhesión interfacial; además, FSIL exhibió signos de propagación de grietas en el extremo de la muestra. La Figura 5d muestra el modo de fractura de los biocompuestos FBIC, los cuales presentaron mayor número de roturas que con FMER (Figura 5c), además de menor presencia de huecos, indicando mejor interacción en la interfaz y mejor distribución de las fibras.

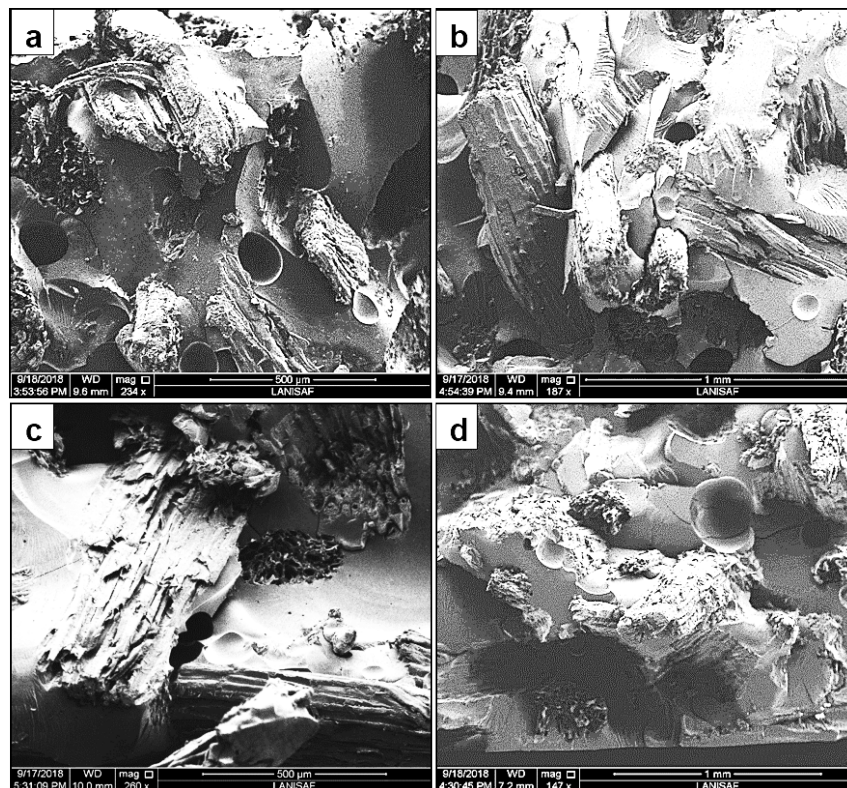


Figure 5. Fractographies of impact on panels developed from low viscosity epoxy polymer with *Agave angustifolia* bagasse fiber subjected to chemical treatments: a) untreated fiber (UFC), b) fiber treated with vinyl triethoxy silane (FSIL), c) mercerized fiber (MERF), and d) fiber treated with sodium bicarbonate (FBIC).

Figura 5. Fractografías de impacto en paneles desarrollados de polímero epóxico de baja viscosidad con fibra de bagazo de *Agave angustifolia* sometida a tratamientos químicos: a) fibra sin tratamiento (FST), b) fibra tratada con vinil triethoxy silano (FSIL), c) fibra mercerizada (FMER) y d) fibra tratada con bicarbonato de sodio (FBIC).

with the gradual addition of 5 % glass fiber, reaching its maximum value at 30FA-25GF (30 % agave fiber and 25 % glass fiber), higher by 6 % and 77.3 % than RP and 30FA-0GF, respectively. Zhou et al. (2022a) reported similar behaviors, where flexural strength, impact strength and peak impact strength of the hybrid composites were higher than that only with the bamboo fiber composite.

The agave fiber content increased MOE, reaching its maximum value in 30FA-25GF with 65 and 62 % higher compared to RP and 30FA-0GF, respectively. Zhou et al. (2022a) also found this trend when glass fiber was added.

Conclusions

Laminar biocomposites, developed in a low viscosity epoxy polymer matrix, improve their physical-mechanical performance when reinforced with *Agave angustifolia* fibers. These biocomposites could represent

Chaitanya y Singh (2018) obtuvieron resultados similares en fibras de sisal tratadas con NaHCO_3 y NaOH . Por otra parte, Cisneros et al. (2016) y Robledo et al. (2020) trabajaron con refuerzos de fibras tratadas con polietileno injertado de anhídrido maleico como compatibilizador para mejorar la adherencia y dispersión de los materiales.

Efecto de la humedad en las propiedades mecánicas

Después de sumergir los biocompuestos en agua, el tratamiento FBIC mostró el rango más amplio de reducción de la resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y resistencia al impacto con 47, 50 y 27 %, respectivamente (Figura 6). El deterioro de las propiedades mecánicas se debe a la transferencia insuficiente de tracción en los biocompuestos afectados por la inmersión de las muestras (Alomayri et al., 2014), lo cual disminuyó la interacción de la interfaz fibra-matriz (Haameem et al., 2016).

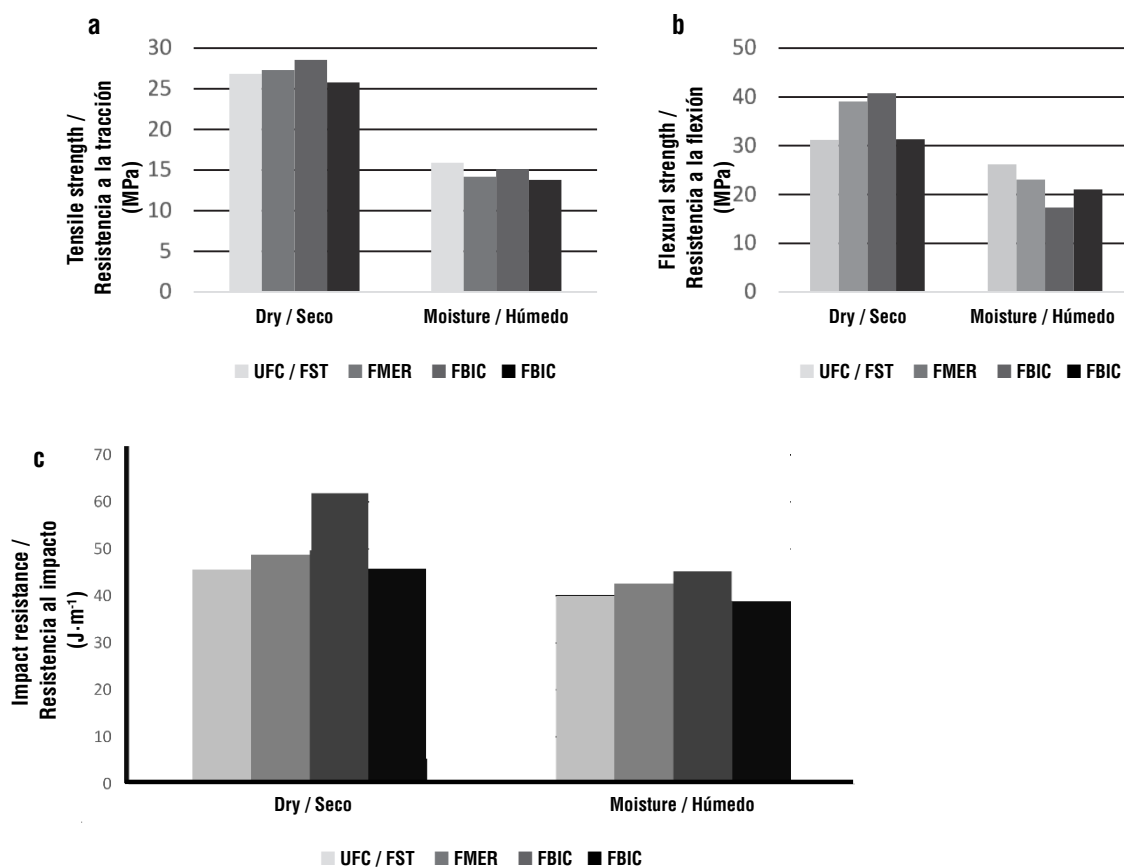


Figure 6. Mechanical properties of biocomposites reinforced with *Agave angustifolia* bagasse fiber subjected to chemical treatments, before and after immersion in water ($P = 0.05$). UFC = untreated fiber, FSIL = fiber treated with vinyl triethoxy silane, MERF = mercerized fiber con NaOH , and FBIC = fiber treated with sodium bicarbonate.

Figura 6. Propiedades mecánicas de los biocompuestos reforzados con fibra de bagazo de *Agave angustifolia* sometida a tratamientos químicos, antes y después de sumergirlos en agua ($P = 0.05$). FST = fibra sin tratamiento, FSIL = fibra tratada con vinyl triethoxy silano, FMER = fibra mercerizada con NaOH y FBIC = fibra tratada con bicarbonato de sodio.

an alternative for industrial applications and fibers would be an option to be used. The physical-mechanical improvements of the biocomposites were observed by combining length, size, and chemical treatments to the agave fibers. The tensile modulus, impact strength and flexural strength of the biocomposite increased when varying the length and fiber content. Also, chemical treatment with sodium bicarbonate increased the mechanical properties and impact resistance of the fibers but decreased the material density and moisture resistance. On the other hand, agave/glass hybridization increased up to 2/3 the impact strength and flexural modulus compared to the agave or pure resin mixture.

Acknowledgments

Jorge Colin Torres thanks the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) for its support and funding to develop this research. Marcos Miguel González Peña thanks Dr. J. R. Robledo-Ortiz for his disposition for the use of the impact test instrument.

End of English version

References / Referencias

- Aguirre, D. X., & Eguiarte, L. E. (2013). Genetic diversity, conservation and sustainable use of wild *Agave cupreata* and *Agave potatorum* extracted for mezcal production in Mexico. *Journal of Arid Environments*, 90, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.018>
- Alomayri, T., Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2014). Effect of water absorption on the mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2(3), 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.05.005>
- American Society for Testing and Materials (ASTM International). (2017). *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials* (ASTM D790-17). doi.org/10.1520/D0790-17
- American Society for Testing and Materials (ASTM International). (2018). *Standard test method for determining the Charpy impact resistance of notched specimens of plastics* (ASTM D6110-18). doi.org/10.1520/D6110-18
- American Society for Testing and Materials (ASTM International). (2022). *Standard test method for tensile properties of plastics* (ASTM D638-22). doi.org/10.1520/D0638-22
- American Society for Testing and Materials (ASTM International). (2022). *Standard test method for water absorption of plastics* (ASTM D570-22). doi.org/10.1520/D0570-98R10E01
- American Society for Testing and Materials (ASTM International). (2023). *Standard test method for Rockwell hardness of plastics and electrical insulating materials* (ASTM D785-23). doi.org/10.1520/D0785-23
- Ashik, K. P., Sharma, R. S., & Guptha, V. L. J. (2018). Investigation of moisture absorption and mechanical properties of natural /

Efecto de la hibridación en la resistencia a la flexión

La resistencia MOR fue superior en el panel RP que en el panel con solo fibra de agave (30FA-OGF); sin embargo, incrementó con la adición gradual del 5 % de fibra de vidrio, llegando a su valor máximo en 30FA-25GF (30 % de fibra de agave y 25 % de fibra de vidrio), superior en 6 % y 77.3 % a RP y 30FA-OGF, respectivamente. Comportamientos similares reportaron Zhou et al. (2022a), donde la resistencia a la flexión, resistencia al impacto y fuerza de impacto máxima de los compuestos híbridos fueron superiores que solo con el compuesto de fibra de bambú.

Asimismo, el contenido de fibra de agave incrementó MOE obteniendo su valor máximo en 30FA-25GF con 65 y 62 % más comparado con RP y 30FA-OGF, respectivamente. Zhou et al. (2022a) también encontraron esta tendencia cuando adicionaron fibra de vidrio.

Conclusiones

Los biocompuestos laminares, desarrollados en una matriz de polímero epóxico de baja viscosidad, mejoran su desempeño físico mecánico al ser reforzados con fibras de *Agave angustifolia*. Estos biocompuestos podrían representar una alternativa para aplicaciones industriales y las fibras tendrían una opción de aprovechamiento. Las mejoras físico-mecánicas de los biocompuestos se observaron al hacer combinaciones de longitud, tamaño y tratamientos químicos a las fibras de agave. Los módulos de tracción, de resistencia al impacto y de flexión del biocompuesto incrementaron al variar la longitud y contenido de fibra. Asimismo, el tratamiento químico con bicarbonato de sodio incrementó las propiedades mecánicas y la resistencia al impacto de las fibras, pero disminuyó la densidad del material y la resistencia a la humedad. Por otra parte, la hibridación agave/vidrio incrementó hasta 2/3 la resistencia al impacto y el módulo de flexión, en comparación con la mezcla de agave o de resina pura.

Agradecimientos

Jorge Colin Torres agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo y financiamiento para desarrollar esta investigación. Marcos Miguel González Peña agradece al Dr. J. R. Robledo-Ortiz por su disposición para el uso del instrumento de pruebas de impacto.

Fin de la versión en español

- glass fiber reinforced polymer hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 3000–3007. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.099>
- Atiqah, A., Jawaid, M., Sapuan, S. M., Ishak, M. R., Ansari, M. N. M., & Ilyas, R. A. (2019). Physical and thermal properties of treated sugar palm/glass fiber reinforced thermoplastic polyurethane hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3726–3732. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.032>
- Betelie, A. A., Sinclair, A. N., Kortschot, M., Li, Y., & Redda, D. T., (2019). Mechanical properties of sisal-epoxy composites as functions of fiber-to-epoxy ratio. *AIMS Materials Science*, 6(6), 985–996. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2019.6.985>
- Benkhelladi, A., Laouici, H., & Bouchoucha, A. (2020). Tensile and flexural properties of polymer composites reinforced by flax, jute and sisal fibers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(3), 895–916. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05427-2>
- Chaitanya, S., & Singh, I. (2018). Sisal fiber-reinforced green composites: Effect of ecofriendly fiber treatment. *Polymer Composites*, 39(12), 4310–4321. <https://doi.org/10.1002/pc.24511>
- Cisneros, L. E. O., Pérez, F. A. A., Fuentes-Talavera, F. J., Anzaldo, J., González, N. R., Rodrigue, D., & Robledo, O. J. R. (2016). Rotomolded polyethylene-agave fiber composites: Effect of fiber surface treatment on the mechanical properties. *Polymer Engineering and Science*, 56(8), 856–865. <https://doi.org/10.1002/pen.24314>
- Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM). (2022). *Informe estadístico*. https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2022/06/INFORME-2022_II_-SINTESIS.pdf
- Cuéllar, A., & Muñoz, I. (2010). Bamboo fiber reinforcement for polymer matrix. *DYNA*, 77(162), 137–142. https://www.researchgate.net/publication/262438249_Bamboo_fiber_reinforcement_for_polymer_matrix
- Fiore, V., Scalici, T., & Valenza, A. (2018). Effect of sodium bicarbonate treatment on mechanical properties of flax-reinforced epoxy composite materials. *Journal of Composite Materials*, 52(8), 1061–1072. <https://doi.org/10.1177/0021998317720009>
- Haameem, J. A. M., Abdul Majid, M. S., Afendi, M., Marzuki, H. F. A., Hilmi, E. A., Fahmi, I., & Gibson, A. G. (2016). Effects of water absorption on Napier grass fiber/polyester composites. *Composite Structures*, 144, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.067>
- Hidalgo-Reyes, M., Caballero, C. M., Hernández-Gómez, L. H., & Urriolagoitia, C. G. (2015). Chemical and morphological characterization of *Agave angustifolia* bagasse fibers. *Botanical Sciences*, 93(4), 807–817. <https://doi.org/10.17129/botsci.250>
- Jacques, H. C., Herrera Pérez, O., & Ramírez de León, J. (2007). El maguey mezcalero y la agroindustria del mezcal en Tamaulipas. In P. C. García Marín, A. Larqué Saavedra, L. E. Eguiarte, & D. Zizumbo-Villarreal (Eds.), *En lo ancestral hay futuro: Del tequila, los mezcales y otros agaves* (1.ª ed., pp. 287–317). Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Jawaid, M., & Abdul Khalil, H. P. S. (2011). Cellulosic/synthetic fiber reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>
- Koffi, A., Koffi, D., & Toubal, L. (2021). Mechanical properties and drop-weight impact performance of injection-molded HDPE/birch fiber composites. *Polymer Testing*, 93, 106956. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106956>
- Kwon, H. J., Sunthornvarabhas, J., Park, J. W., Lee, J. H., Kim, H. J., Piyachomkwan, K., Sriroth, K., & Cho, D. (2014). Tensile properties of kenaf fiber and corn husk flour reinforced poly (lactic acid) hybrid bio-composites: Role of aspect ratio of natural fibers. *Composites Part B: Engineering*, 56, 232–237. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.003>
- Lalit, R., Mayank, P., & Ankur, K. (2018). Natural fibers and biopolymers characterization: A future potential composite material. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 68(1), 33–50. <https://doi.org/10.2478/scjme-2018-0004>
- Luna, P., & Lizarazo-Marriaga, J. M. (2022). Fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica. *MOMENTO*, (65), 65–79. <https://doi.org/10.15446/mo.n65.103151>
- Mahfoudh, A., Cloutier, A., & Rodrigue, D. (2013). Characterization of UHMWPE/wood composites produced via dry-blending and compression molding. *Polymer Composites*, 34(4), 510–516. <https://doi.org/10.1002/pc.22455>
- Md Shah, A. U., Sultan, M. T., & Jawaid, M. (2021). Sandwich-structured bamboo powder/glass fiber-reinforced epoxy hybrid composites – Mechanical performance in static and dynamic evaluations. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(1), 47–64. <https://doi.org/10.1177/1099636218822740>
- Mylsamy, K., & Rajendran, I. (2011). Influence of alkali treatment and fiber length on mechanical properties of short Agave fiber reinforced epoxy composites. *Materials and Design*, 32(8-9), 4629–4640. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.029>
- Park, S. J., & Seo, M. K. (2011). Element and processing. In S. J. Park & M. K. Seo (Eds.), *Interface science and technology* (vol. 18, pp. 431–499). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375049-5.00006-2>
- Pérez, F. A. A., Arellano, M., Rodrigue, D., González, N. R., & Robledo, O. J. R. (2016). Effect of coupling agent content and water absorption on the mechanical properties of coir-agave fibers reinforced polyethylene hybrid composites. *Polymer Composites*, 37(10), 3015–3024. <https://doi.org/10.1002/pc.23498>
- Pérez, F. A. A., Robledo, O. J. R., Ramírez-Arreola, D. E., Ortega, G. P., Rodrigue, D., & González-Núñez, R. (2014). Effect of hybridization on the physical and mechanical properties of high density polyethylene-(pine/agave) composites. *Materials and Design*, 64, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.025>
- Pérez Hernández, E., Chávez-Parga, M. D. C., & González Hernández, J. C. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 148–164. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>
- Robledo, O. J. R., González, L. M. E., Rodrigue, D., Gutiérrez, R. J. F., Prezas, L. F., & Pérez, F. A. A. (2020). Improving the compatibility and mechanical properties of natural fibers/green polyethylene biocomposites produced by rotational molding. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(3), 1040–1049. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01667-1>

- Rodríguez, C. A., & de la Cerna, H. C. (2017). The mezcal, its production and waste treatment. *Alianzas y Tendencias, BUAP*, 2(8), 10–14. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5083893>
- Salleh, Z., Yunus, S., Masdek, N. R. N. M., Taib, Y. M., Azhar, I. I. S., & Hyie, K. M. (2018). Tensile and flexural test on kenaf hybrid composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 328(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/328/1/012018>
- Shah, I., Jing, L., Fei, Z. M., Yuan, Y. S., Farooq, M. U., & Kanjana, N. (2021). A review on chemical modification by using sodium hydroxide (NaOH) to investigate the mechanical properties of sisal, coir and hemp fiber reinforced concrete composites. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 1–19. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1875359>
- Silva S., L., Hernández Gómez, L. H., Caballero C., M., & López Hernández, I. (2009). Tensile strength of fibers extracted from the leaves of the *Agave angustifolia* Haw. in function of their length. *Applied Mechanics and Materials*, 15, 103–108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.15.103>
- Tanzi, M. C., Farè, S., & Candiani, G. (2019). Organization, structure, and properties of materials. In M. C. Tanzi, S. Farè, & G. Candiani (Eds.), *Foundations of biomaterials engineering* (pp. 3–103). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101034-1.00001-3>
- Thomas, S., Paul, S. A., Pothan, L. A., & Deepa, B. (2011). Natural fibers: Structure, properties and applications. In S. Kalia, B. Kaith, & I. Kaur (Eds.), *Cellulose fibers: bio- and nano-polymer composites* (pp. 3–42). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7_1
- Torres-Tello, E. V., Robledo-Ortíz, J. R., González-García, Y., Pérez-Fonseca, A. A., Jasso-Gastinel, C. F., & Mendizábal, E. (2017). Effect of agave fiber content in the thermal and mechanical properties of green composites based on polyhydroxybutyrate or poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate). *Industrial Crops and Products*, 99, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.035>
- Uddin, N., & Kalyankar, R. R. (2011). Manufacturing and structural feasibility of natural fiber reinforced polymeric structural insulated panels for panelized construction. *International Journal of Polymer Science*, Article ID 963549 <https://doi.org/10.1155/2011/963549>
- Yan, L., Chouw, N., & Yuan, X. (2012). Improving the mechanical properties of natural fiber fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(6), 425–437. <https://doi.org/10.1177/0731684412439494>
- Zhang, Z., Chen, S., & Zhang, J. (2013). Blends of poly(vinyl chloride) with α -methylstyrene-acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer: Thermal properties, mechanical properties, and morphology. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 19(1), 1–10. <https://doi.org/10.1002/vnl.20326>
- Zhou, H., Li, W., Hao, X., Zong, G., Yi, X., Xu, J., Ou, R., & Wang, Q. (2022). Recycling end-of-life WPC products into ultra-high-filled, high-performance wood fiber/polyethylene composites: A sustainable strategy for clean and cyclic processing in the WPC industry. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.091>
- Zhou, S., Li, J., Kang, S., Zhang, D., Han, Y., & Ma, P. (2022a). Impact properties analysis of bamboo/glass fiber hybrid composites. *Journal of Natural Fibers*, 19(1), 329–338. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1745114>