

Elaboración y caracterización físico – mecánica de biocompuestos a base de harina de arroz y fibra de bagazo de caña

Preparation and physical – mechanical characterization of biocomposites based on rice flour and cane bagasse fiber

Yumari Díaz Herrera¹, Carlos Alberto Villaseñor Perea^{1*}, Artemio Pérez López², Arturo Mancera Rico³, María del Rosario Venegas Ordóñez⁴, Araceli Ramírez Jaspeado⁵

¹ Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral de Agua, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México- Texcoco, 56230, Estado de México, México.

² Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México- Texcoco, 56230, Estado de México, México

³ Posgrado en Tecnología de Granos y Semillas, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro No. 1923, Buenavista, 25315, Saltillo Coahuila, México.

⁴ Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México- Texcoco, 56230, Estado de México, México.

⁵ Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad - Producción de Semillas, Colegio de Postgraduados, km 36.5 Carretera México- Texcoco, 56230, Estado de México, México.

RESUMEN

Los materiales biocompuestos fabricados con matrices poliméricas biodegradables y reforzadas con fibras naturales son una propuesta ecológica para diversos sectores de aplicación. El objetivo de esta investigación fue dilucidar las propiedades físicas y mecánicas, así como la degradabilidad en el suelo de materiales elaborados a base de almidón de arroz y fibra de bagazo de caña. Se elaboraron seis biocompuestos de longitudes diferentes, que consideraron la aplicación o no de un tratamiento alcalino, que fueron sometidos a pruebas mecánicas de tracción, flexión y compresión, así como pruebas de absorción de agua y biodegradabilidad en el suelo. Los resultados mostraron que la resistencia mecánica del material fue afectada por el tratamiento alcalino de la fibra y la longitud de esta. La pérdida de peso de los seis biocompuestos, atribuible a su biodegradabilidad en el suelo, fue superior al 70 % después de cuatro semanas. El biocompuesto con longitud de fibra de 0.25 mm y con tratamiento alcalino mostró la mayor resistencia en todas las pruebas mecánicas y representa una propuesta ecológica prometedora para diversas aplicaciones.

Palabras clave: Matriz polimérica biodegradable, tratamiento alcalino, tamaño de fibra, propiedades mecánicas, biodegradabilidad.

ABSTRACT

Biocomposite materials made with biodegradable polymeric matrices and reinforced with natural fibers are an ecological alternative for various application sectors. The objective of this research was to elucidate the physical and mechanical properties, as well as the soil degradability, of materials made from rice starch and cane bagasse fiber. Six biocomposites of different lengths were elaborated, which considered whether or not to apply an alkaline treatment,

and were subjected to mechanical tests of tensile, flexural and compression, as well as tests of water absorption and soil biodegradability. The results showed that the mechanical resistance of the material was affected by the alkaline treatment of the fiber and its length. The weight loss of the six biocomposites, attributable to their soil biodegradability, was greater than 70 % after four weeks. The 0.25mm fiber length biocomposite treated with alkaline, showed the highest strength in all mechanical tests and represents a promising ecological proposal for various applications.

Keywords: Biodegradable polymer matrix, alkaline treatment, fiber size, mechanical properties, biodegradability.

INTRODUCCIÓN

Los materiales de origen sintético derivados del petróleo son ampliamente utilizados por ser económicos, por su fácil manipulación industrial, su resistencia a la corrosión, a la intemperie y a diversos factores biológicos y químicos. Sin embargo, el uso desmedido de dichos materiales en la industria, aunado a que su incorporación al ciclo biológico es muy lenta (100 a 1,000 años aproximadamente), ha despertado serias preocupaciones debido a su acumulación en los vertederos que carecen de regulación sanitaria, en ríos y océanos, amenazando el medio ambiente y sus ecosistemas (Ubaque y Fernando, 2018; Bahl *et al.*, 2021; Qin *et al.*, 2021). De acuerdo con las estimaciones de la ONU (2019), ocho millones de toneladas de plástico terminan en los océanos anualmente afectando a más de 600 especies de fauna marina. Por otra lado, la quema de los materiales plásticos produce gases tóxicos, como los furanos y dioxinas, los cuales son gases de efecto invernadero. Las dioxinas pueden ocasionar problemas a la salud humana y la contaminación del suelo (Wilcox *et al.*, 2015; Bahl *et al.*, 2021).

*Autor para correspondencia: Carlos Alberto Villaseñor Perea
Correo electrónico: carlosvillaseñor660@gmail.com

Recibido: 30 de marzo de 2021

Aceptado: 10 de noviembre de 2021

Con el objetivo de mitigar esta situación se ha propuesto el desarrollo de materiales conocidos como biocompuestos, los cuales presentan ventajas ecológicas al emplear materiales renovables en su elaboración y presentan una biodegradación en el suelo considerablemente más rápida. El uso de fibras naturales utilizadas como refuerzo en la fabricación de compuestos poliméricos utilizados para diversos fines se ha intensificado en los últimos años (Wang *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2019). A pesar de que la fabricación de biocompuestos sigue siendo costosa, el uso de fibras naturales en la creación de polímeros biodegradables es una excelente opción para lograr el equilibrio entre el costo y el impacto ambiental (Mazzanti *et al.*, 2019).

Un material alternativo para el refuerzo de biopolímeros es el bagazo de caña, éste es el residuo derivado del proceso agroindustrial en la obtención de azúcar. Al extraer el jugo de los tallos de la caña, la parte sólida llamada bagazo se utiliza tradicionalmente como material combustible en las calderas de los ingenios y como materia prima para la fabricación de papel y paneles aglomerados. Sin embargo, a pesar de sus diversos usos, en países en vías de desarrollo comúnmente son dispersados en vertederos o reducidos a cenizas, provocando problemas de contaminación ambiental (Cabrera *et al.*, 2016).

Becerra *et al.* (2016) mencionan que el bagazo representa el 30 % de la caña molida. En el año 2020, en México, se generaron 16.1 millones de toneladas de bagazo de caña (SIAP, 2020), por lo que se considera un material abundante y disponible en gran parte del país, ya que actualmente operan 50 ingenios distribuidos en 15 estados de la República Mexicana (Tabla 1).

A pesar de que se han realizado investigaciones en donde se ha empleado fibras de yute, sisal, palma datilera, lino, okra y bagazo de caña como refuerzo de biopolímeros, poco se conoce acerca del efecto que produce el tamaño de

Tabla 1. Número de ingenios azucareros por estado en México.

Table 1. Number of sugar mills by state in México.

Estado	Cantidad de ingenios
Campeche	1
Chiapas	2
Colima	1
Jalisco	6
Michoacán	3
Morelos	2
Nayarit	2
Oaxaca	3
Puebla	2
Quintana Roo	1
San Luis Potosí	4
Sinaloa	1
Tabasco	2
Tamaulipas	2
Veracruz	18

la fibra en la resistencia mecánica del material (Tamayo *et al.*, 2017; Xie *et al.*, 2018). Por otro lado, los polímeros extraídos de biomasa, especialmente del almidón, han llamado mucho la atención de los investigadores debido a que son un material abundante, de bajo costo, renovable y completamente biodegradable (Wang *et al.*, 2017; Guleria *et al.*, 2018). Tal es el caso del almidón contenido en el grano de arroz quebrado obtenido como subproducto de la molienda, que dependiendo de la calidad del grano y la maquinaria de molienda se puede obtener hasta un 40 % de subproducto (Loubes y Tolaba, 2013). Esto lo convierte en un recurso altamente disponible, además que su producción se extiende a todos los continentes (FAO, 2017).

La creciente preocupación por la conservación de los recursos no renovables y el daño generado al medio ambiente por la utilización desmedida de materiales de origen sintético ha motivado a buscar alternativas ecológicas que emplean en su fabricación los subproductos de la agroindustria. Con estos antecedentes el objetivo de este trabajo fue dilucidar las propiedades físicas y mecánicas, así como la degradabilidad en el suelo de biocompuestos elaborados a base de almidón de arroz y fibra de bagazo de caña considerando el efecto que produce la longitud y la aplicación del tratamiento alcalino de la fibra.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Se utilizó bagazo de caña donado por el ingenio azucarero de Casasano "La abeja" y arroz quebrado adquirido en el molino de arroz "Buenavista", ambos ubicados en Cuautla, Morelos, México. Se utilizó glicerina con 99.5 % de pureza como plastificante, hidróxido de sodio (NaOH) con peso molecular de 40.00 para el tratamiento alcalino, ácido acético glacial con 99.7 % de pureza para neutralizar la fibra después del tratamiento alcalino y ácido oléico utilizado como desmoldante del biocompuesto (*i.e.*, Reactivos Química Meyer).

Lugar de experimentación

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales Biológicos del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. El bagazo de caña y el arroz quebrado se almacenaron a una temperatura de 4 °C hasta su uso y todas las etapas del experimento se realizaron a temperatura ambiente, 22 ± 2 °C.

Preparación de la fibra

El desmedulado del bagazo de caña se realizó por el método de suspensión (Lois, 1982) utilizando un tamiz de malla de 4 mm, colocando los haces fibrosos en un recipiente para su secado a temperatura ambiente hasta peso constante. Una vez seca, se separó la porción de fibras a las que se les aplicó el tratamiento alcalino, éstas fueron sumergidas en una solución acuosa de NaOH al 5 % a 90 °C por 3 horas (Ibrahim *et al.*, 2014) y enseguida se enjuagaron repetidas veces hasta que las fibras alcanzaron un pH de 7. Previo a los

últimos enjuagues, se sumergieron en ácido acético al 5 % para retirar cualquier residuo de NaOH de la superficie de las fibras, posteriormente la fibra tratada se secó a temperatura ambiente hasta peso constante.

Las fibras con tratamiento alcalino (CTA) y sin tratamiento alcalino (STA) se trituraron con un molino para café KRUPS F203 (KRUPS, Solingen, Alemania) y se colocaron sobre un tamiz vibratorio RETSCH AS 200 (RETSCH, Haan, Alemania) a una frecuencia de 70 Hz durante 10 minutos para obtener las diferentes longitudes de fibra (1.00, 0.50 y 0.25 mm).

Preparación del arroz quebrado

El arroz quebrado se molió en un molino de muestras Tecator Cyclotec 1093 Sample mill (Foss, Hilleroed, Dinamarca) y posteriormente se colocó en un tamiz vibratorio RETSCH AS 200 (RETSCH, Haan, Alemania) a una frecuencia de 70 Hz durante 10 minutos para obtener un tamaño de partícula de 250 μm .

Elaboración del biocompuesto

Se mezclaron agua (50 mL) y glicerina (2 mL) en un agitador magnético con calentamiento CIMAREC+ SP88857100 (Thermo Scientific, Waltham, USA) a 150 °C y 300 rpm, durante 5 minutos aproximadamente hasta observarse evaporación en el líquido. Posteriormente se agregó a la mezcla el polvo de arroz (36 g) y una vez que ésta alcanzó el punto de gel se añadieron 5 g de fibra de bagazo de caña y se mezcló hasta que ambos componentes se integraron completamente. Se colocó la mezcla en moldes de aluminio previamente recubiertos con ácido oleico para facilitar el desmolde, y se introdujo en un horno de aire caliente RIOSSA H-33 (Riossa, Monterrey, México) a 100 °C durante 60 minutos. Posteriormente, se aplicó sobre los moldes una presión de 30 kPa a temperatura ambiente (20 ± 2 °C) durante 24 horas para compactar la probeta. Finalmente se colocaron los moldes en el horno a una temperatura de 100 °C durante 40 minutos y se enfriaron a temperatura ambiente. Se realizó el mismo procedimiento para los seis tratamientos.

Pruebas mecánicas del biocompuesto

Resistencia a la Tracción. Se realizaron pruebas de tracción de acuerdo con la norma ASTM D3039 en una máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON modelo 3382 (INSTRON, Norwood, USA) a una velocidad de cruceta de 4 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, con probetas de dimensiones de 250 x 25 x 4 mm (largo x ancho x espesor). Las probetas se sujetaron entre las mordazas de la máquina cubriendo una longitud de 75 mm en cada extremo de la probeta, la tracción se aplicó hasta la ruptura.

Resistencia a la flexión. Se determinó la resistencia a la flexión a tres puntos de acuerdo con la norma ASTM D7264, para lo cual se utilizaron probetas de dimensiones de 100 x 13 x 4 mm y una distancia entre soportes de 75 mm; se utilizó una máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON modelo 3382 (INSTRON, Norwood, USA), la velocidad de desplazamiento de la cruceta se fijó en 5 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Resistencia a la compresión. La resistencia a compresión se determinó de acuerdo con la norma ASTM D3410, para lo cual se utilizaron probetas de 25 x 25 x 4 mm. La probeta se colocó entre los platos de compresión de la máquina universal INSTRON modelo 3382 (INSTRON, Norwood, USA) aplicando una carga compresiva hasta la ruptura sobre un tramo de 25 mm a una velocidad de 3 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Contenido de humedad

La humedad se determinó en probetas de dimensiones de 100 x 13 x 4 mm, las cuales se secaron a 105 °C hasta peso constante, se registró el peso antes (M1) y después (M2) del secado para calcular el contenido de humedad con la Ecuación 1 (Jumaidin *et al.*, 2017).

Absorción de agua

La absorción de agua del biocompuesto se determinó siguiendo la metodología reportada por (Guleria *et al.*, 2018). Las probetas, previamente secadas a 90 °C en un tiempo aproximado de 24 horas hasta alcanzar peso constante (P1), se sumergieron en 60 mL de agua a temperatura del ambiente en intervalos de tiempo de 1 hora. Al retirarlas del agua se limpiaron con un paño de algodón y se registró nuevamente el peso (P2). El porcentaje de absorción de agua, durante 20 horas continuas, se calculó con la Ecuación 2.

Biodegradabilidad

El porcentaje de biodegradabilidad del biocompuesto se determinó a partir del método de enterramiento en el suelo (Franco *et al.*, 2004). Se enterraron probetas de 100 x 13 x 4 mm en un suelo con un pH de 6 y 40 % de materia orgánica (base peso seco) a una profundidad de 8 cm. La temperatura se mantuvo a 22 ± 2 °C y el contenido de humedad en el suelo se mantuvo en un rango de 30 a 40 % al agregar 500 mL de agua por cada 1500 g de suelo cada 3 días (Wang *et al.*, 2017; Guleria *et al.*, 2018). Antes de enterrar las probetas se secaron en un horno RIOSSA H-33 (Riossa, Monterrey, México) a 90 °C hasta peso constante y se anotaron los pesos iniciales (Pi), después de intervalos de tiempo de 1 semana las probetas se limpiaron con agua y posteriormente se secaron a 90 °C hasta peso constante, finalmente se registró el peso final (Pf) para poder obtener el porcentaje de biodegradabilidad (Ecuación 3).

Análisis de microestructura

Las superficies de fractura por tensión de los biocompuestos se observaron con un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6390 (JEOL, Tokio, Japón) a una aceleración de voltaje de 10 kV. Todas las muestras se cubrieron con oropaladio en proporción 80-20 respectivamente, para inducir la conductividad.

Diseño del experimento

Se utilizó un diseño experimental con asignación de tratamientos al azar con dos factores de estudio, tratamiento alcalino con dos niveles (CTA y STA) y longitud de fibra de bagazo de caña con tres niveles (1.00, 0.50 y 0.25 mm).

Cada tratamiento fue evaluado en cinco probetas para cada prueba mecánica y en cinco probetas para las pruebas de contenido de humedad y absorción de agua.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los datos se condujo de acuerdo con el diseño experimental. Se realizó un análisis de la varianza simple y multifactorial para identificar el efecto de los factores sobre las propiedades mecánicas. Se realizó una prueba de comparación de medias (Tukey, 0.05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento mecánico del material

La resistencia mecánica a la tracción del biocompuesto con tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm resultó estar ligeramente por debajo de algunos plásticos (Tabla 2), tales como el polietileno de baja densidad (5 a 13 MPa), polietileno lineal de baja densidad (13 a 27 MPa), compuesto flexible de policloruro de vinilo (8 a 24 MPa) y considerablemente superior a los plásticos expansibles tales como poliestireno expansible (0.134 MPa), polipropileno expansible (0.363 MPa) y polietileno expansible (0.275 MPa) (IMPI, 2000), de tal manera que dicho biocompuesto es una propuesta ecológica prometedora para diversas aplicaciones.

De forma general, se observa que, al evaluar la interacción entre los factores de tratamiento alcalino de la fibra y longitud de ésta, hay una diferencia significativa ($P \leq 0.05$) sobre la resistencia mecánica del material (Tabla 3). Los compuestos con longitud de fibra corta y con la aplicación de tratamiento alcalino mostraron una mayor resistencia mecánica, lo que se atribuye a una mejor transferencia de esfuerzos de la matriz hacia la fibra.

Propiedades de tracción. Se observó que la resistencia a la tracción y el módulo de Young aumentan en los biocompuestos que tienen fibra con tratamiento alcalino (CTA, Tabla 3), esto es debido a que, al remover parte de la lignina de las fibras, se modifica químicamente su superficie y aumenta la irregularidad de la misma, ocasionando una mejora en el enlace interfacial fibra-matriz (Saba *et al.*, 2015). De igual forma,

Wang *et al.* (2017) sugieren que una buena adhesión fibra-matriz resultará en un incremento en el esfuerzo de tracción, debido a la similitud química en la estructura de ambos polisacáridos (celulosa y almidón), ya que dichos polímeros interactúan a través de puentes de hidrógeno formando una red rígida que incrementa el esfuerzo de tensión.

Por otro lado, hay una tendencia en el incremento de la resistencia a la tracción en compuestos con menor tamaño de partícula (Tabla 2). La mejora en el esfuerzo de tracción en compuestos con tratamiento alcalino de la fibra y con menor longitud de ésta, concuerda con lo reportado en la literatura (Wang *et al.*, 2017; Guleria *et al.*, 2018) y se atribuye a una mejor transferencia de esfuerzos de la matriz hacia la fibra.

Propiedades de compresión. Los compuestos reforzados con fibra CTA, mostraron una mayor resistencia a la compresión que aquellos STA, siguiendo la misma dirección que en la prueba a la tracción, por lo que el comportamiento

Tabla 3. Efectos principales del tratamiento y la longitud de la fibra sobre la resistencia a la compresión (RC), resistencia a la tracción (RT), resistencia a la flexión (RF) y módulo de Young (MY) de seis tipos de compuestos elaborados con harina de arroz y fibra de bagazo de caña.

Table 3. Main effects of treatment and fiber length on compressive strength (RC), tensile strength (RT), flexural strength (RF) and Young's modulus (MY) of six biocomposites made with rice flour and cane bagasse fiber.

Factor	RC (MPa)	RT (MPa)	RF (MPa)	MY (MPa)
<i>Tratamiento (T)</i>				
STA	3.74 b	2.40 b	7.28 a	48.14 b
CTA	8.65 a	3.22 a	6.75 a	114.96 a
<i>Longitud de fibra (LF), mm</i>				
1.00	5.32 b	2.18 b	5.77 c	62.97 b
0.50	5.20 b	3.15 a	7.17 b	65.83 b
0.25	8.06 a	3.09 a	8.10 a	115.91 a
<i>Interacción T * LF</i>				
	$P \leq 0.05$	$P \leq 0.01$	$P \leq 0.01$	$P \leq 0.1$

Niveles factor: STA = sin tratamiento alcalino, CTA = con tratamiento alcalino. Misma letra dentro de cada columna y factor, no difieren significativamente (Tukey, 0.05).

Tabla 2. Comparación de medias de resistencia a la compresión (RC), resistencia a la tracción (RT), resistencia a la flexión (RF), módulo de Young (MY) y contenido de humedad (CH) de seis tipos de biocompuestos elaborados con harina de arroz y fibra de bagazo de caña (media \pm desv. est., n=5).

Table 2. Means comparison of compressive strength (RC), tensile strength (RT), flexural strength (RF), Young's modulus (MY), and moisture content (CH) of six biocomposites made with rice flour and cane bagasse fiber (mean \pm std. dev., n=5).

Tratamiento	Longitud de fibra (mm)	RC, MPa	RT, MPa	RF, MPa	MY, MPa	CH, %
STA	1.00	2.63 \pm 0.21 d	2.06 \pm 0.13 c	6.88 \pm 0.63 b	33.98 \pm 6.86 c	7.80 \pm 1.09 a
	0.5	3.41 \pm 0.16 d	2.84 \pm 0.16 b	7.44 \pm 0.78 ba	44.59 \pm 8.49 c	7.68 \pm 0.94 a
	0.25	5.18 \pm 0.39 c	2.31 \pm 0.13 c	7.52 \pm 0.78 ba	65.85 \pm 4.78 cb	7.32 \pm 0.00 a
CTA	1.00	8.02 \pm 0.64 b	2.31 \pm 0.20 c	4.66 \pm 0.62 c	91.83 \pm 13.21 b	7.73 \pm 0.09 a
	0.5	7.00 \pm 0.70 b	3.46 \pm 0.35 a	6.90 \pm 1.17 b	87.07 \pm 27.10 b	8.09 \pm 1.22 a
	0.25	10.94 \pm 1.37 a	3.88 \pm 0.32 a	8.68 \pm 0.48 a	165.96 \pm 32.07 a	7.71 \pm 1.93 a

STA = sin tratamiento alcalino, CTA = con tratamiento alcalino, n = tamaño de muestra. Medias con la misma letra dentro de cada columna, no difieren significativamente (Tukey, 0.05).

obtenido puede explicarse de manera similar. De igual manera, se observa que existen diferencias significativas entre los biocompuestos con diferente longitud de fibra, donde la longitud de fibra de 0.25 mm ocasionó una mayor resistencia a compresión que las longitudes de 0.50 y 1.00 mm (Tabla 3). La menor resistencia a la compresión en biocompuestos reforzados con fibra de mayor longitud se atribuye a que un mayor tamaño de partícula resulta en un mayor espacio entre partículas, por lo tanto, mayor porosidad del material (Tumwesigye *et al.*, 2020). Diversas investigaciones han reportado que el incremento en la porosidad disminuyó la resistencia mecánica en los biocompuestos reforzados con fibras naturales de okra, algodón, lino y palma datilera (Prachayawarakorn *et al.*, 2010; Ibrahim *et al.*, 2014; Guleria *et al.*, 2018).

Propiedades de flexión. Los resultados del ensayo de flexión muestran diferencias significativas entre los tres tamaños de longitud de fibra; para este caso, la resistencia mecánica del biocompuesto está fuertemente determinada por la longitud de la fibra, siendo más resistente con fibra de longitud más corta (0.25 mm) (Tabla 3).

Contrario a los resultados obtenidos en la prueba de tracción y compresión, en la prueba de flexión no se encontraron diferencias significativas en la aplicación del tratamiento alcalino de las fibras. Esto se atribuye principalmente a que la distancia con el eje neutro es muy corta, por la posición en que fueron ensayadas las probetas, de manera que los esfuerzos de tracción y compresión en los extremos superior e inferior se multiplicaron por valores muy bajos; en ensayos de probetas de mayor grosor, se esperaría que la resistencia a flexión sea proporcional a la resistencia a tracción y a compresión.

Sin embargo, a pesar de no existir diferencias significativas en la aplicación del tratamiento alcalino, el compuesto con tratamiento alcalino y menor longitud de fibra resultó ser el más resistente de todos (Tabla 2), lo que concuerda con los resultados de compresión y tracción. La resistencia a la flexión fue superior a la de tracción, lo que concuerda con lo obtenido por otros autores como Morgan (2005) y Guleria *et al.* (2018).

Contenido de humedad

A pesar de que se observan ligeras variaciones entre tratamientos en el contenido de humedad de los biocompuestos, no hubo diferencias significativas entre ninguno de ellos (Tabla 2); ni el tratamiento alcalino ni la longitud de fibra ocasionaron diferencia en el contenido de humedad.

Absorción de agua

Se observó que el compuesto sin tratamiento alcalino y con longitud de fibra de 0.25 mm absorbió menos agua, mientras que el compuesto sin tratamiento alcalino y con longitud de fibra de 1.00 mm absorbió más agua (Figura 1), lo que sugiere que en compuestos con fibra STA, mientras más corta sea la longitud de ésta, menos agua absorbe. Los compuestos con fibra CTA manifestaron una absorción de agua más lenta; los materiales elaborados con fibra STA absorbieron más del 60 % de agua en las primeras horas, mientras que los compuestos con fibra CTA se mantuvieron por debajo de esta cifra. La absorción de agua es indeseable en la mayoría de las aplicaciones potenciales del biocompuesto.

Biodegradabilidad

Luego de 4 semanas, la biodegradabilidad fue de 73.3, 76.7 y 74.7 % para los biocompuestos CTA, y de 80.9, 81.7 y

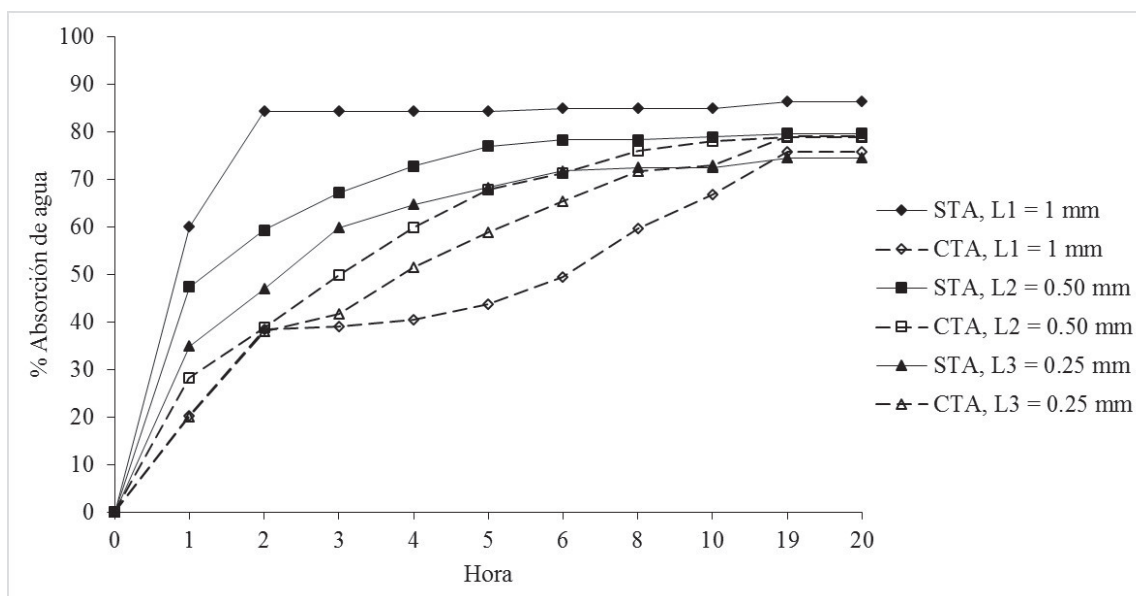


Figura 1. Absorción de agua de compuestos con fibra sin tratamiento alcalino (STA) y con tratamiento alcalino (CTA), con tres longitudes de fibra (L1, L2 y L3).

Figure 1. Water absorption of fiber composites without alkaline treatment (STA) and with alkaline treatment (CTA), with three fiber lengths (L1, L2 and L3).

81.7 % para los biocompuestos STA con longitud de fibra de 0.25, 0.50 y 1.00 mm, respectivamente (Figura 2). Es claro que los compuestos CTA presentan un porcentaje de biodegradabilidad menor a los compuestos STA (Figura 2), este fenómeno puede ser atribuido a que el tratamiento alcalino mejora el enlazamiento interfacial fibra-matriz, produciendo una red fuerte que reduce el acceso de agua y microflora del suelo, resultando en una mayor resistencia a la degradación (Franco *et al.*, 2004; Guleria *et al.*, 2018). Los compuestos elaborados con fibra de longitud corta (0.25 mm) tanto en los compuestos CTA y STA, presentaron un menor porcentaje de biodegradabilidad.

La tasa de degradación de los seis biocompuestos fue mayor en la primera semana (Figura 2), lo que se atribuye a que al degradarse primero el almidón se pierde la integridad estructural del biocompuesto (Ibrahim *et al.*, 2014), formando agujeros o canales que favorecen la entrada de microorganismos presentes en el suelo, ocasionando que la tasa de degradación aumente rápidamente en los primeros días (Franco *et al.*, 2004).

Análisis de microestructura

En las micrografías (Figura 3), se observa la morfología de la superficie de fractura de los compuestos sin tratamiento alcalino y 1.00 mm de longitud de fibra (Figura 3a), sin tratamiento alcalino y 0.25 mm de longitud de fibra (Figura 3b) y con tratamiento alcalino y 0.25 mm de longitud de fibra (Figura 3c), en los cuales se presentan diferentes mecanismos de falla: de la matriz, de la interfaz fibra matriz y de las fibras (Ibrahim *et al.*, 2014).

En todos los biocompuestos se observa la falla de la matriz; sin embargo, en la Figura 3 (a y b) se observan fallas en la interfaz fibra-matriz, o separación de la fibra y la matriz, debido a una pobre adherencia entre ambas; por otro lado, en la Figura 3c se observa que la fractura se presentó sin mostrarse una separación entre la fibra y la matriz, reflejando una buena adhesión entre ambas y mayor resistencia a compresión, tracción y Módulo de Young (Tabla 3), lo que se atribuye al tratamiento alcalino, lo cual concuerda con resultados obtenidos en otras investigaciones (Ibrahim *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2017; Xie *et al.*, 2018).

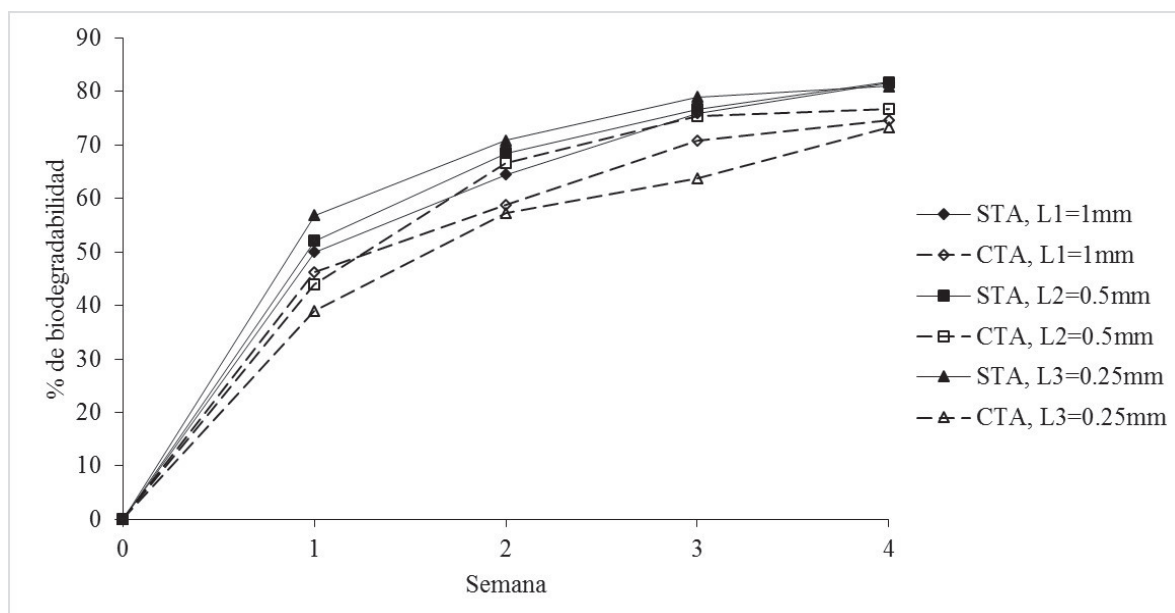


Figura 2. Biodegradabilidad en suelo de compuestos con fibra sin tratamiento alcalino (STA) y con tratamiento alcalino (CTA), con tres longitudes de fibra (L1, L2 y L3).

Figure 2. Biodegradability in soil of fiber composites without alkaline treatment (STA) and with alkaline treatment (CTA), with three fiber lengths (L1, L2 and L3).

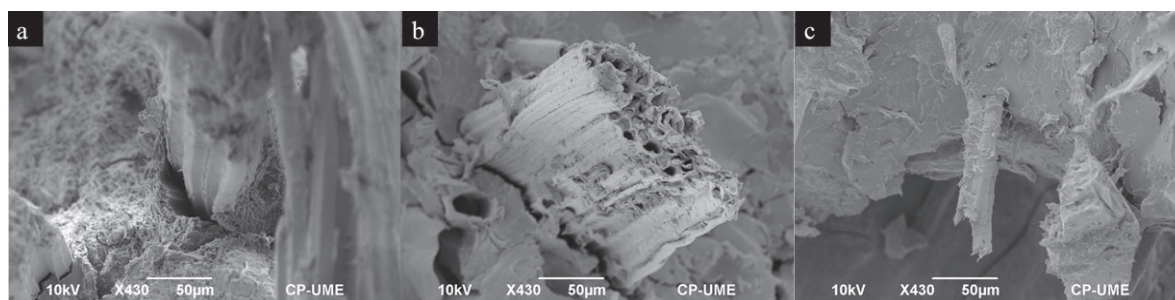


Figura 3. Microscopía electrónica de barrido: a) biocompuesto sin tratamiento alcalino y longitud de fibra de 1 mm; b) biocompuesto sin tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm; c) biocompuesto con tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm.

Figure 3. SEM micrographs: a) biocomposite without alkaline treatment and 1 mm fiber length; b) biocomposite without alkaline treatment and 0.25 mm fiber length; c) biocomposite with alkaline treatment and 0.25 mm fiber length.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas indican que hay una mejor transferencia de esfuerzos entre fibra – matriz en aquellos compuestos elaborados con fibra con tratamiento alcalino y menor longitud. Las propiedades mecánicas de los biocompuestos elaborados con fibra con tratamiento alcalino resultaron ser más resistentes que aquellos elaborados con fibra sin tratamiento alcalino. Las pruebas mecánicas muestran que el tamaño de longitud de la fibra es un factor que influye significativamente en la resistencia mecánica del material, el cual fue más resistente con una longitud menor. El biocompuesto con tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm resultó ser el más resistente de todos los tratamientos y presentó propiedades mecánicas superiores a las de los plásticos expansibles con un porcentaje de peso perdido de 73.33 % después de cuatro semanas, por lo que el material elaborado es una propuesta ecológica para diversos sectores.

REFERENCIAS

- Bahl, S., Dolma, J., Singh, J.J. y Sehgal, S. 2021. Biodegradation of plastics: A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*. 39: 31-34.
- Becerra, A.P., Buitrago, A.L. y Pinto, P. 2016. Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. *Ing. Solidaria*. 12(20): 133-149.
- Cabrera, E., León V., De la Caridad Montano A. y Dopico D. 2016. Caracterización de residuos agroindustriales con vistas a su aprovechamiento. *Centro azúcar*. 43: 27-35.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Bases de datos estadísticos. FAOSTAT. [Consultado octubre 2019] 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize> (Accessed October 2019).
- Franco, C.R., Cyras, V.P., Busalmen, J.P., Ruseckaite, R.A. y Vázquez, A. 2004. Degradation of polycaprolactone/starch blends and composites with sisal fibre. *Polymer degradation and stability*. 86: 95-103.
- Guleria, A., Singh, A. y Rana, R.K. 2018. Mechanical, thermal, morphological, and biodegradable studies of okra cellulosic fiber reinforced starch-based biocomposites. *Advances in polymer technology*. 37(1): 1-9.
- Ibrahim, H., Farag, M., Megahed, H. y Mehanny, S. 2014. Characteristics of starch-based biodegradable composites reinforced with date palm and flax fibers. *Carbohydrate polymers*. 101: 11-19.
- IMPI (Instituto Mexicano del Plástico Industrial). 2000. Enciclopedia del plástico, Tomo I. México: Autor.
- Jumaidin, R., Sapuan, S.M., Jawaid, M., Ishak, M.R. y Sahari, J. 2017. Thermal, mechanical, and physical properties of seaweed/sugar palm fibre reinforced thermoplastic sugar palm Starch/Agar hybrid composites. *Inter. Journal of biological macromolecules*. 97: 606-615.
- Lois, J. 1982. Sistemas y equipos de desmedulado en la industria del bagazo de la caña de azúcar. Editorial Científico-Técnica. La Habana, Cuba.
- Loubes, M.A. y Tolaba, M. 2013. Arroz: rendimiento de molienda mediante análisis de imágenes. *La alimentación latinoamericana*. 308: 44-49.
- Mazzanti, V., Pariante, R., Bonanno, A., Ruiz de Ballesteros, O., Mollica, F. y Filippone, G. 2019. Reinforcing mechanisms of natural fibers in green composites: Role of fibers morphology in a PLA/hemp model system. *Composites science and technology*. 180: 51-59.
- Morgan, P. 2005. Carbon fibers and their composites. Taylor and Francis Group. Florida, USA.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). Noticias ONU. Compromiso mundial para reducir los plásticos de un solo uso. [Consultado 19 agosto de 2021] 2019. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2019/03/1452961>
- Prachayawarakorn, J., Sangnitidej, P. y Boonpasith, P. 2010. Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by cotton fiber or low-density polyethylene. *Carbohydrate polymers*. 81: 425-433.
- Qin, M., Chen, C., Song, B., Shen, M., Cao, W., Yang, H., Zeng, G. y Gong, J. 2021. A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: Another ecological threat to soil environments? *Journal of Cleaner Production*. 312 art. 127816.
- Saba, N., Pariadah, M.T. y Jawaid, M. 2015. Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review. *Construction and building materials*. 76: 87-96.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Producción nacional de caña de azúcar. [Consultado 16 agosto 2021] 2020. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Silva, C. G., Campini, P.A.L., Rocha, D.B. y Rosa, D.S. 2019. The influence of treated eucalyptus microfibers on the properties of PLA biocomposites. *Composites science and technology*. 179: 54-62.
- Tamayo, E., Sarasty, O. y Mosquera, E. 2017. Aprovechamiento de residuos ligno-celulósicos en la elaboración de empaques secundarios ecológicos. *Rev. Ind. Data* 20(2): 37-42.
- Tumwesigye, K.S., O'Brien, E., Oliveira, J.C., Crean, A. y Sousa-Gallagher, M.J. 2020. Engineered food supplement excipients from bitter cassava for minimisation of cassava processing waste in environment. *Future Foods*. 1-2 art. 100003.
- Ubaque, C.A. y Fernando, I. 2018. Elaboración de bioempaques a partir de almidones nativos y aceites esenciales prolongando vida útil en fresas. *Rev. Colombiana de investigaciones agroindustriales* 5(1): 71-86.
- Wang, P., Chen, F., Zhang, H., Meng, W., Sun, Y. y Liu, C. 2017. Large-scale preparation of jute-fiber-reinforced starch-based composites with high mechanical strength and optimized biodegradability. *Starch/Stärke*. 69: 1-11.
- Wilcox, C., Van Sebille, E. y Hardesty, B.D. 2015. Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of U.S.A.* 112(38): 11899-11904.
- Xie, Q., Li, F., Li, J., Wang, L., Li, Y., Zhang, C., Xu, J. y Chen, S. 2018. A new biodegradable sisal fiber–starch packing composite with nest structure. *Carbohydrate polymers*. 189: 56-64.