



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.757>

Artículo

Efecto de pudrición por hongos en las propiedades físicas y mecánicas del compuesto bambú-polipropileno

Fungal rot effect on physical and mechanical properties of the bamboo-polypropylene composite

Ana Gabriela Altez Basaldúa¹, Aldo Joao Cárdenas Oscanoa^{2*}, Martín Araujo Flores² y Belkis Coromoto Sulbarán Rangel³

Abstract

Biodegradation resistance of a bamboo-polypropylene composite was evaluated through exposure to two fungi: white-rot *Pycnoporus sanguineus* and brown-rot *Rhodonia placenta* (synonym: *Postia placenta*) for 16 weeks, according to the ASTM D2017-05 norm. Effect of biodegradation on the physical properties of density, absorption and swelling, and mechanical properties of bending, traction and impact were also assessed. The composite was made by extrusion and compression molding using bamboo particles of *Guadua angustifolia* of two ASTM mesh sizes (40/60 and 60/80) at two bamboo / polypropylene ratios (30/70 and 50/50) and 2 % polypropylene maleic anhydride (MAPP) as a coupling agent. It was probed that the bamboo-polypropylene composite was susceptible to biodegradation by white- and brown-rot fungi; the formulation with smaller proportion of bamboo particles (30 %) exhibited a higher resistance to it. The physical properties of anhydrous density, absorption and swelling and the mechanical properties of static bending and traction were inversely affected by exposure to *P. sanguineus* and *R. placenta*, and white and brown rot fungi did not affect the impact property.

Keywords: Biodegradation, *Guadua angustifolia* Kunth, rot fungi, composites, physical properties and mechanical properties.

Resumen

Se evaluó la resistencia a la biodegradación de un material compuesto bambú-polipropileno, mediante la exposición a dos hongos: *Pycnoporus sanguineus* de pudrición blanca, utilizado en ensayos de durabilidad natural y *Rhodonia placenta* (sinónimo: *Postia placenta*) de pudrición café durante 16 semanas, según la norma ASTM D2017-05. Asimismo, se evaluó el efecto de la biodegradación en las propiedades físicas de densidad, absorción e hinchamiento; y las mecánicas de flexión, tracción e impacto. El material compuesto se elaboró por extrusión y posterior moldeo por compresión; para ello se utilizaron partículas de bambú (*Guadua angustifolia*) de dos tamaños de malla ASTM: 40/60 y 60/80; dos proporciones bambú/polipropileno: 30/70 y 50/50; además de 2 % de anhídrido maleico de polipropileno (MAPP), como agente acoplante. Se demostró que el compuesto bambú-polipropileno fue susceptible a la biodegradación por hongos de pudrición blanca y café; la formulación con menor proporción de partículas de bambú (30 %) presentó mayor resistencia a la biodegradación. Las propiedades físicas de densidad anhidra, absorción e hinchamiento y las propiedades mecánicas de flexión estática y tracción fueron afectadas de manera inversa a causa de la exposición a *P. sanguineus* y *R. placenta*. Los hongos de pudrición blanca y café no incidieron en la propiedad de impacto.

Palabras clave: Biodegradación, *Guadua angustifolia* Kunth, hongos de pudrición, materiales compuestos, propiedades físicas, propiedades mecánicas.

Fecha de recepción/Reception date: 16 de abril de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 24 de agosto de 2020

¹Ingeniera Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú

²Departamento de Industrias Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú

³Departamento de Estudios del Agua y la Energía, Campus Tonalá. Universidad de Guadalajara. México.

*Autor para correspondencia, correo-e: acardenas@lamolina.edu.pe

Introducción

El interés en materiales compuestos plástico madera (WPC) ha aumentado en los últimos años por sus características como alta durabilidad, bajo mantenimiento y alta rentabilidad. Las aplicaciones de compuestos reforzados con fibras naturales en tableros tienen un enorme potencial y son fundamentales para lograr la sostenibilidad; estas fibras por sus adecuadas características físicas y mecánicas constituyen un material de refuerzo óptimo para los WPC (Kalia *et al.*, 2009).

En este sentido, las fibras de origen lignocelulósico como la cáscara de arroz, las fibras de coco, el sisal y el bambú cumplen con requerimientos ecológicos, ya que minimizan el consumo de energía en su fabricación y contribuyen a la conservación de los recursos naturales no renovables, pues reducen la contaminación y con ello se coadyuva al mantenimiento de un ambiente sano. Resalta el bambú como un material con enorme ventaja económica, ya que alcanza su pleno crecimiento en pocos meses y su máxima resistencia mecánica en pocos años. Además, es abundante en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Ghavami, 2005).

En los últimos años, se ha extendido el uso de materiales lignocelulósicos diferentes a la madera en los WPC, entre ellos sobresale el bambú; el cual es ampliamente utilizado en la industria de la construcción, del mueble, el papel y en la elaboración de artesanías. Esta gramínea destaca por su rápido crecimiento y por presentar resistencias mecánicas altas en comparación con su peso. En Perú, la especie de bambú más utilizada a nivel comercial es *Guadua angustifolia* Kunth; posee fibras muy resistentes y con buenas propiedades físicas y mecánicas; por tal motivo, es de especial interés su estudio como material de refuerzo en tableros con base en fibras lignocelulósicas.

En los primeros años que se comercializaron los WPC se promocionaron como resistentes al ataque biológico. Sin embargo, en el Parque Nacional *Everglades* en Florida, Estados Unidos de América se encontraron evidencias de cuerpos fructíferos de hongos de pudrición en productos de WPC expuestos durante 4 años, lo que demostró que la madera de esos materiales continuaba siendo susceptible a la

biodegradación (Morris y Cooper, 1998). Estudios posteriores confirmaron esa teoría (Mankowski y Morrell, 2000; Ibach, 2013; Cárdenas, 2012).

La biodegradación causada por hongos de pudrición afecta los materiales lignocelulósicos en los materiales compuestos; entre ellos, *Pycnoporus sanguineus* (L.) Murrill. degradador de la lignina y *Rhodonía placenta* (Fr.) Niemelä K.H. Larss. & Schigel causante de la degradación de la celulosa. Sin embargo, no se conocen con certeza los efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas en materiales compuestos bambú/plástico expuestos a esos hongos.

La experiencia en el uso de los materiales compuestos ha evidenciado su potencial deterioro por efecto de su exposición al ambiente, ya que se observan cambios de color, pérdida de atractivo estético, y de propiedades mecánicas, además del desarrollo de hongos xilófagos (Stark, 2001; Cárdenas, 2012).

Los objetivos del presente estudio fueron determinar la susceptibilidad a la biodegradación causada por hongos de pudrición blanca y café en compuestos bambú-polipropileno, además de su efecto en las propiedades físicas y mecánicas.

Materiales y Métodos

Se elaboraron probetas de un compuesto bambú-polipropileno, en las cuales se utilizó como material de refuerzo partículas provenientes de la parte apical de caña de *Guadua angustifolia* de 4 años de edad; como matriz termoplástica polipropileno (PP) marca Propilco, con índice de fluidez de $12.5 \text{ g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ ($2.16 \text{ kg } 230 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), además como agente acoplante se usó anhídrido maleíco de polipropileno (MAPP) *Overac* CA100.

Las cañas de *G. angustifolia* se cortaron y secaron en un horno *Moore*, hasta un contenido de humedad promedio de 12 %, evaluado con un detector manual de humedad. Posteriormente, se molieron (molino de cuchillas *Budapesti Vegypari*, de 2 830 rpm) y tamizaron (*Maccinox*, de 1 700 rpm) para obtener partículas de dos tamaños, se emplearon mallas ASTM: 40/60 y 60/80. Las partículas se secaron en una

estufa *Labor Musze Ripari* a 100 °C, durante 48 horas para reducir el contenido de humedad hasta un intervalo de 2 a 3 %. Se adicionó la matriz plástica (PP) y el agente acoplante (MAPP) para realizar un mezclado mecánico, previo a la extrusión. La extrusión de los materiales se realizó en una máquina de husillo simple hasta la obtención de hilos, a una temperatura entre 175 - 185 °C y 30 rpm; el material extruido (hilos) se seccionó para su posterior prensado y obtención de *pellets* de 5 cm de largo.

Los tableros del material compuesto se formaron a partir de *pellets* provenientes del material extruido y seccionado, mediante el método de moldeo por compresión. Se utilizó una prensa hidráulica (*Tramelsa*, capacidad 60 t), se elaboraron 64 tableros para la elaboración de probetas destinadas a los ensayos físicos y mecánicos con moldes de 21 × 21 × 0.25 cm, a presión de 40 bares y velocidad de 0.9 cm s⁻¹, durante 4 minutos, a temperatura entre 177 - 199 °C; además, se elaboraron cuatro tableros para los ensayos de biodegradación con moldes de 12 × 12 × 0.9 cm con las mismas condiciones, pero a un mayor tiempo de prensado, 25 minutos. Para la preparación de probetas, los tableros fueron seccionados con máquina láser (*Orion*) a una velocidad de 0.78 mm min⁻¹ y potencia de 45 w.

Se elaboraron cuatro formulaciones en las que se consideraron dos tamaños de partícula (T): 40/60 y 60/80; así como dos proporciones (P) bambú/polipropileno: 50/50 y 30/70. Estas formulaciones formaron parte de los siguientes tratamientos: sin exposición (testigo); con exposición solo a humedad; y con exposición a dos tipos de hongos (H) de pudrición blanca y café: *Pycnoporus sanguineus* y *Rhodonia placenta*, respectivamente (Cuadro 1).



Cuadro 1. Formulaciones y tratamientos del compuesto bambú-polipropileno.

| Nº de formulación | Tamaño de partícula (Mesh) | Bambú (%) | Polipropileno (%) | Agente acoplante (%) | Tipo de tratamiento |
|-------------------|----------------------------|-----------|-------------------|----------------------|----------------------|
| F1 | 40/60 | 50 | 48 | 2 | <i>P. sanguineus</i> |
| F2 | 40/60 | 30 | 68 | 2 | |
| F3 | 60/80 | 50 | 48 | 2 | |
| F4 | 60/80 | 30 | 68 | 2 | |
| F1 | 40/60 | 50 | 48 | 2 | <i>R. placenta</i> |
| F2 | 40/60 | 30 | 68 | 2 | |
| F3 | 60/80 | 50 | 48 | 2 | |
| F4 | 60/80 | 30 | 68 | 2 | |
| F1 | 40/60 | 50 | 48 | 2 | Sin exposición |
| F2 | 40/60 | 30 | 68 | 2 | |
| F3 | 60/80 | 50 | 48 | 2 | |
| F4 | 60/80 | 30 | 68 | 2 | |
| F1 | 40/60 | 50 | 48 | 2 | Humedad* |
| F2 | 40/60 | 30 | 68 | 2 | |
| F3 | 60/80 | 50 | 48 | 2 | |
| F4 | 60/80 | 30 | 68 | 2 | |

*Propiedades mecánicas de flexión y tensión

Las dimensiones de las probetas correspondieron con las normas de los ensayos utilizados en el presente estudio: biodegradación, propiedades físicas y propiedades mecánicas; los cuales, se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Tipos de ensayos y dimensiones de las probetas del compuesto bambú/polipropileno.

| Tipo de ensayo | Dimensiones probetas | | | Norma | |
|--------------------|----------------------|------------|------------|---------------|---------------|
| | Espesor (mm) | Largo (mm) | Ancho (mm) | | |
| Biodegradación | 9 ± 0.2 | 25 | 25 | ASTM D2017-05 | |
| Propiedad física | Densidad | 2.5 ± 0.2 | 76.2 | 25 | ASTM D1037-99 |
| | Absorción | 2.5 ± 0.2 | 76.2 | 25 | ASTM D570-98 |
| | Hinchamiento | 2.5 ± 0.2 | 76.2 | 25 | ASTM D570-98 |
| Propiedad mecánica | Flexión | 2.5 ± 0.2 | 50 | 13 | ASTM D790-03 |
| | Impacto | 2.5 ± 0.2 | 120 | 65 | ASTM D5420-10 |
| | Tensión | 2.5 ± 0.2 | 63.5 | 3.2 | ASTM D638-03 |

Fuente: ASTM, 1998; ASTM, 1999; ASTM, 2003a; ASTM, 2003b; ASTM, 2005; ASTM, 2010.

Se prepararon 772 probetas del compuesto bambú-polipropileno, que se utilizaron según el tipo de tratamiento y los tipos de ensayos (Cuadro 3).



Cuadro 3. Número de probetas del compuesto bambú-polipropileno por tipo de tratamiento y ensayo.

| Tipo de ensayo | Repetición ^a | Número probetas | | | | Subtotal |
|------------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|----------|
| | | <i>P. sanguineus</i> | <i>R. placenta</i> | Sin exposición (Testigos) | Exposición Humedad | |
| Degradación biológica ^b | 7 | 28 | 28 | c | d | 56 |
| | Subtotal | | | | | 56 |
| Propiedad física | Densidad | 7 | 28 | 28 | - | 84 |
| | Absorción | 7 | 28 | 28 | - | 84 |
| | H. | 7 | 28 | 28 | - | 84 |
| | Subtotal | | | | | 252 |
| Propiedad mecánica | Flexión | 7 | 28 | 28 | 28 | 112 |
| | Tensión | 7 | 28 | 28 | 28 | 112 |
| | Impacto | 20 | 80 | 80 | - | 240 |
| | Subtotal | | | | | 464 |
| Total | | | | | 772 | |

^aRepetición de 7 probetas para cada una de las 4 formulaciones, con excepción de impacto (20 probetas); ^b Se utilizaron 7 probetas testigo de bambú sin tratamiento;

^cSe utilizaron probetas de ensayos físicos y mecánicos para evaluar los valores iniciales en las diferentes formulaciones sin ninguna exposición (humedad u hongos); ^dSe utilizaron probetas de dimensiones idóneas para ensayos de flexión e impacto para evaluar la influencia exclusiva de la humedad, sin hongos.

La prueba de biodegradación se realizó mediante ensayos de bloque - suelo según la norma ASTM D 2017-05 (ASTM, 2005); se registró durante 16 semanas la pérdida de peso del compuesto bambú-polipropileno sometido a la acción de los hongos *Pycnoporus sanguineus* y *Rhodonia placenta*, para cada formulación. En este ensayo se usaron 56 probetas del material compuesto bambú-polipropileno. Adicionalmente, como testigo se emplearon 14 probetas de caña de bambú sin tratamiento previo.

Paralelamente, se sometieron a biodegradación por 16 semanas las probetas de material compuesto de cada formulación y de dimensiones finales para ensayos físicos y mecánicos (Figura 1). Después de la exposición a los hongos, se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas. Para ello, se acondicionaron frascos de vidrio que pudiesen contener las muestras requeridas para dichos ensayos.



Figura 1. Probetas expuestas a *Pycnoporus sanguineus* (L.) Murrill. (izquierda), *Rhodonia placenta* (Fr.) Niemelä K.H. Larss & Schigel (centro) y humedad (derecha).

Los ensayos de las propiedades físicas de densidad anhidra, absorción en incremento de peso e hinchamiento se realizaron según las normas ASTM D1037-99 (ASTM, 1999) y ASTM D570-98 (ASTM, 1998); se expusieron a los hongos 168 probetas de bambú-polipropileno y 84 probetas testigo sin exposición a los hongos de pudrición, para un total de 252 probetas (Figura 1).

Los ensayos de las propiedades mecánicas de flexión estática, tensión e impacto se hicieron de acuerdo a las normas ASTM D790-03, ASTM D638-03 y ASTM D5420-04, respectivamente (ASTM, 2003a; ASTM, 2003b; ASTM, 2010). Se emplearon 136 probetas testigo sin exposición a hongos de pudrición, 272 probetas expuestas a hongos de pudrición y 56 probetas expuestas solo a humedad, para un total de 464 probetas de un compuesto bambú-polipropileno.

Análisis estadístico

El modelo estadístico utilizado fue un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), con un arreglo factorial de 2×2 (tamaño de partículas de bambú y proporción bambú/polipropileno), con siete repeticiones para los ensayos de pérdida de peso, densidad anhidra, absorción, hinchamiento, tensión y flexión estática; y 20 para impacto. El diseño fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \gamma_k + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

μ = Media general

α_i = Efecto debido al i -ésimo nivel del factor tamaño de partícula (40/60 y 60/80)

β_j = Efecto debido al j -ésimo nivel del factor proporción de mezcla bambú/polipropileno (50/50 y 70/30)

γ_k = Bloque (dos tipos de hongos)

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de interacción en la combinación ij

ε_{ijk} = Error aleatorio que supone sigue una distribución con media cero y varianza constante σ^2 y son independientes entre sí

Se aplicó un análisis de varianza con el programa *Statistical Analysis System* versión 9.2 (SAS, 2008). Cuando se observaron diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$) se aplicó la prueba de comparación de medias de *Tukey*.

Resultados y Discusiones

Biodegradación de los compuestos bambú-polipropileno

En la Figura 2 se muestra la pérdida de peso del testigo de bambú y del compuesto bambú-polipropileno expuestos a *Pycnoporus sanguineus* y *Rhodonia placenta*. Los valores de pérdida de peso del compuesto bambú-polipropileno variaron entre 3.3 y 4.9 % para *P. sanguineus* y de 2.3 a 3.4 % para *R. placenta*. La mayor pérdida de peso se registró en los compuestos con más proporción de partículas de bambú (50/50) y tamaño de partícula más pequeño (-60/+80). Asimismo, para el testigo de caña de bambú y el material compuesto bambú-polipropileno se observó una pérdida de peso superior, ante la presencia de *P. sanguineus*.

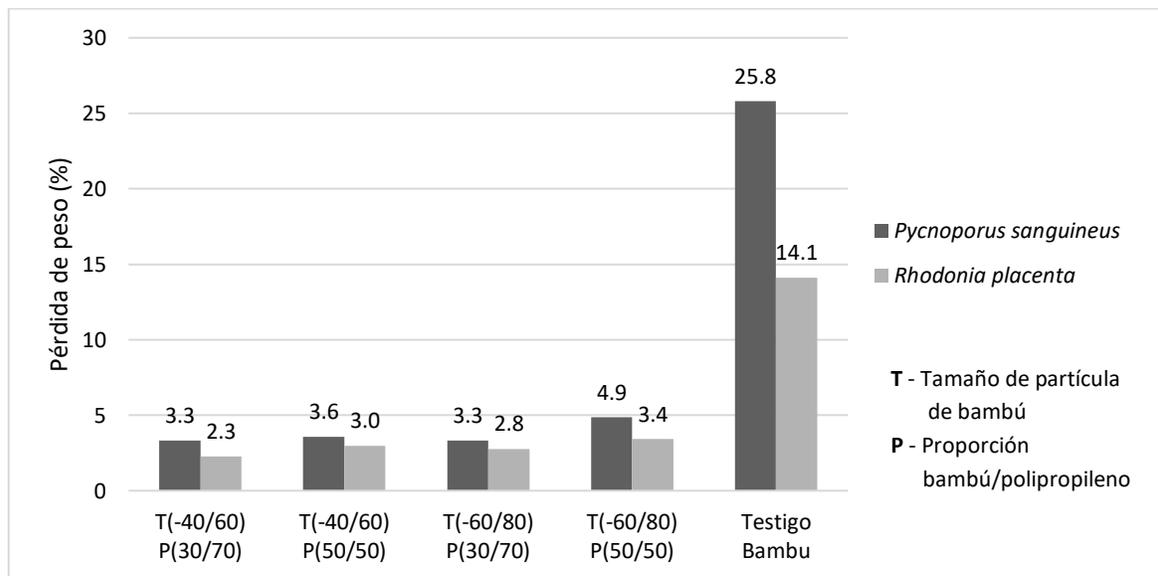


Figura 2. Biodegradación del compuesto bambú- polipropileno.

Respecto a la proporción (P) se observó que la pérdida de peso causada por ambas especies fúngicas aumentó con el incremento de la proporción de partículas de bambú en el compuesto, debido a que hay una mayor disponibilidad del material orgánico para la colonización y desarrollo de los hongos. Dichos resultados concuerdan, ampliamente, con lo citado en diversos estudios (Pendleton *et al.*, 2002; Lomelí *et al.*, 2009; Kartal *et al.*, 2013; Candelier *et al.*, 2018).

En cuanto a la variable tamaño de partícula (T), se registró una posible mayor pérdida de peso causada por *P. sanguineus* en los compuestos con menor tamaño de partícula de bambú, lo cual podría apoyarse en lo documentado por Kartal *et al.* (2013) y se sustenta en el estudio de Lomelí *et al.* (2009), quienes afirman que las partículas más pequeñas tienen un mejor grado de distribución y aumentan la superficie específica susceptible de ser infestada por hongos.

Estos resultados indican que las partículas de bambú no están completamente encapsuladas por la matriz polimérica, lo cual repercute en la biodegradación del material; hecho que concuerda con Klyosov (2007), respecto a que cuando los materiales compuestos contienen una cantidad significativa de celulosa, hay suficientes partículas para formar cadenas extendidas y en contacto, a lo largo de las cuales el agua puede penetrar en la mayor parte del material, y como resultado existe contaminación microbiana del material en los poros y conductos de la matriz, así como degradación del material celulósico.

Sobre el tipo de hongo (H), se evidenció que *P. sanguineus* (pudrición blanca) causó más biodegradación que *R. placenta* (pudrición café). Esto se debe a la capacidad que tiene *P. sanguineus* para degradar los principales componentes de la pared celular, como lo señalan Encinas y Mora (2003), autores que describen los patrones de degradación de los hongos de pudrición blanca *Trametes versicolor* (L ex Fr) Pilat. y *P. sanguineus* en maderas de pino caribe, en el que registran un ataque simultáneo sobre los componentes principales de la pared celular: celulosa, hemicelulosa y lignina. Asimismo, Catto *et al.* (2016) indican que los hongos de pudrición blanca

contienen enzimas como la peroxidasa de lignina, lacasa y la peroxidasa de manganeso que catalizan el deterioro, a través de la difusión de agentes oxidantes o mediadores específicos, los cuales degradan preferentemente la lignina y en otros casos, de manera simultánea la lignina y la celulosa.

Los hongos de pudrición café, según lo citado por Mankowski y Morrell (2000), Fabiyi *et al.* (2011), Ibach (2013) y Candelier *et al.* (2018) contienen endoglucanasas que tienden a degradar, fundamentalmente, la celulosa y la hemicelulosa; por lo que se nota una limitada disminución del contenido de lignina, y se observa una mayor eficiencia en la degradación, preferentemente, de los carbohidratos en las coníferas (Irbe *et al.*, 2006).

El análisis estadístico de variancia (ANOVA) demostró que las variables tipo de hongo (H) y proporción (P) resultaron altamente significativas (p -valor de 0.0002 y 0.0011, respectivamente); y la variable tamaño de partícula (T) también resultó significativa (p -valor de 0.0176).

Propiedades físicas de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación

Densidad

En la Figura 3 se muestra la densidad del compuesto bambú - polipropileno; en los expuestos a los hongos se observa que el menor valor (0.65 g.cm^{-3}) correspondió a *P. sanguineus*, con tamaño de partícula 40/60 y proporción bambú/polipropileno 50/50; lo que concuerda con su mayor degradación. Respecto a *R. placenta*, el valor más alto fue de 0.89 g.cm^{-3} , tamaño de partícula 60/80 y proporción bambú/polipropileno 30/70. Asimismo, se observa que los resultados de los compuestos bambú-polipropileno con exposición a hongos fueron menores a los del testigo; lo cual demuestra que la biodegradación por hongos en los materiales compuestos afectó la densidad del compuesto.

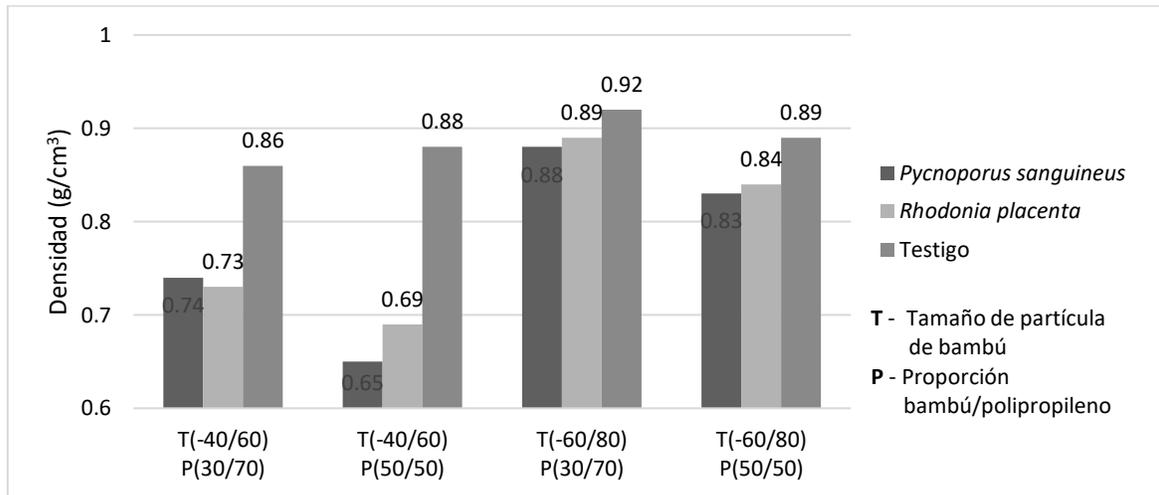


Figura 3. Densidad del compuesto bambú - polipropileno expuesto a hongos de pudrición.

Los resultados evidenciaron que los compuesto bambú - polipropileno con exposición a hongos de pudrición y menor tamaño de partículas presentaron los mayores valores de densidad, debido a que las partículas más pequeñas tienen un mejor grado de distribución y encapsulamiento en la matriz polimérica, lo que causa menos porosidad y hace que aumente la densidad (Verhey y Laks, 2002; Klyosov, 2007). Asimismo, al incrementarse el contenido de partículas de bambú en dichos compuestos, la porosidad aumenta; y con ello, disminuye su densidad (Lomeli *et al.* 2009, Lázaro *et al.*, 2016a; Córdova *et al.*, 2020).

Con base en la Figura 3, las densidades registradas con la proporción bambú/polipropileno 50/50 ($<0.84 \text{ g.cm}^{-3}$) son más bajas a los documentados por Schirp y Wolcott (2005), con 1.05 g.cm^{-3} ; Cárdenas (2012), con 1.06 g.cm^{-3} ; y Kartal *et al.* (2013), con 1.08 g.cm^{-3} en probetas sin exposición a hongos. Lo anterior demuestra que los compuestos en estudio presentaron mayor porosidad, lo que incidió en los menores valores de densidad, posiblemente, porque en la presente investigación se realizaron por extrusión y compresión; mientras que en los estudios citados el proceso final fue por inyección.

El análisis estadístico de variancia (ANOVA) demostró que las variables tamaño de partícula (T) y proporción (P) fueron altamente significativas (p -valor < 0.0001).

Absorción

En la Figura 4 se observa que la absorción atribuida al incremento de peso del compuesto bambú - polipropileno. A los compuestos bambú - polipropileno con exposición fúngica de menor tamaño de partícula 60/80, proporción bambú/polipropileno 30/70 y expuesto a *R. placenta* les correspondió el menor valor (7.4 %); mientras que, el valor más alto (29.3 %) se registró en los compuestos con el mayor tamaño de partícula 40/60, proporción bambú/polipropileno 50/50 y expuesto a *P. sanguineus*. Resultados que respaldan la mayor influencia del hongo de pudrición blanca en la propiedad física de absorción, debido a que la biodegradación fue más alta (Cárdenas, 2012). También, se evidencia que la absorción de agua en los compuestos bambú - polipropileno sin exposición (testigo) fue inferior, con respecto a los compuestos en presencia de las dos especies de hongos, ya que la penetración de los estos provocó el aumento de la absorción de agua, a causa de las grietas o mayores espacios vacíos por la desunión del bambú con el plástico (Steckel *et al.*, 2006; Klyosov, 2007).

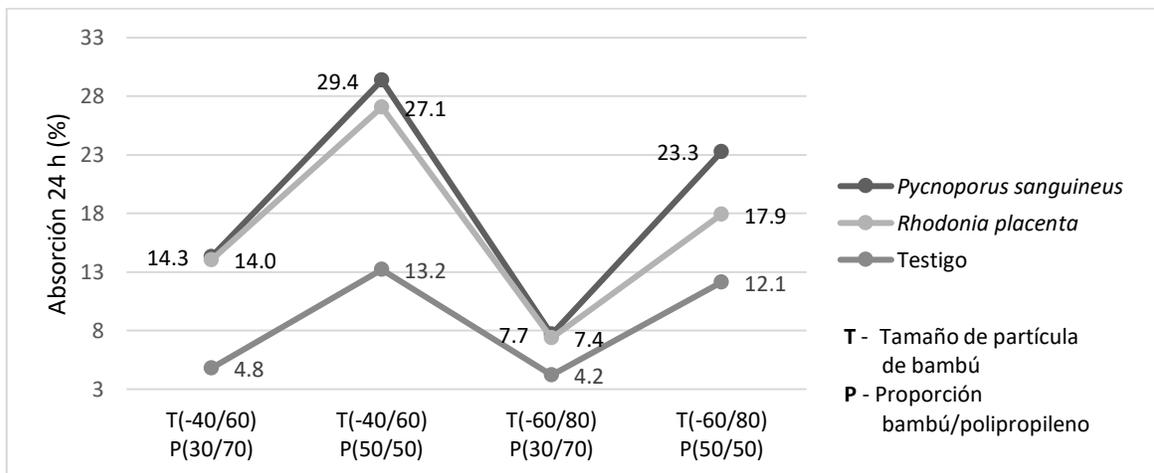
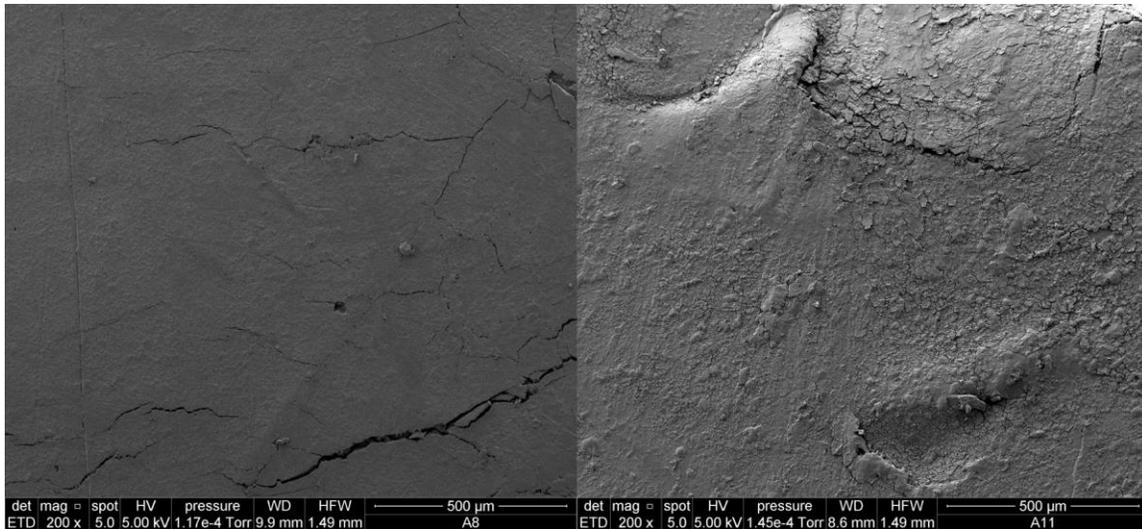


Figura 4. Absorción del compuesto bambú- polipropileno expuesto a hongos de pudrición.

Además, los compuesto bambú - polipropileno con tamaño de partículas más grande y expuestos a los hongos de pudrición presentaron los valores superiores de absorción de agua; lo anterior, favorecido por la mayor área hidrofílica expuesta a la humedad (Figura 5) (Verhey y Laks, 2002; Bouafif *et al.*, 2009; Lázaro *et al.*, 2016a). Por otro lado, las partículas pequeñas se encapsulan de manera más efectiva en la matriz polimérica, ello causa la existencia de menos espacios vacíos por donde circule el agua, lo que reduce la absorción de agua (Stark, 2001; Wang y Morrel, 2004).



Tamaño de partícula 60/80 (izquierda) y 40/60 (derecha)

Figura 5. Muestras sometidas a absorción luego de exposición a *Rhodonía placenta* (Fr.) Niemelä K.H. Larss. & Schigel, de proporción bambú/polipropileno 30/70.

Los compuesto bambú - polipropileno con exposición a hongos de pudrición con mayor contenido de partículas de bambú presentaron valores de absorción de agua más altos, debido al aumento de sus grupos hidroxílicos y por su naturaleza hidrofílica (Westman *et al.*, 2010; Ibach, 2013); además, se generó una incompatibilidad entre las partículas y la matriz polimérica que originó espacios vacíos y grietas por los que penetró el agua, lo anterior concuerda con lo señalado por Klyosov (2007) y Bouafif *et al.* (2009). Es decir,

el incremento de partículas de bambú en los materiales compuestos bambú - polipropileno aumentó los valores de la absorción de agua (Mankowski y Morrell, 2000; Verhey y Laks, 2002; Barton *et al.*, 2017; Candelier *et al.*, 2018).

Los valores de absorción determinados para la proporción bambú/polipropileno 50/50 (>17.9 %) para los dos tamaños de partícula, expuestos a pudrición blanca y café fueron superiores a los consignados por Hosseinihashemi *et al.* (2011), con 9.1 y 10.0 %; Kartal *et al.* (2013), con 16.6 %; y Cárdenas (2012), con 5.1%; autores que trabajaron con proporciones y tamaños de partículas similares, pero con métodos de fabricación diferentes.

El análisis estadístico de variancia (ANOVA) demostró que las variables tamaño de partícula (T) y proporción (P) resultaron altamente significativas (p-valor < 0.0001 para ambas).

Hinchamiento

En los compuestos bambú - polipropileno con exposición se observó que el menor valor de 0.9 % correspondió al de tamaño de partícula más pequeño (60/80), proporción bambú/polipropileno 30/70 y expuesto a *R. placenta* (Figura 6); el mayor valor de 2.9 %, se registró para los mismos tamaño de partícula y especie fúngica, pero con proporción bambú/polipropileno de 50/50 (Figura 6). Asimismo, el hinchamiento de los compuestos bambú - polipropileno en el testigo fue inferior con respecto a los compuestos con exposición (Figura 6), esto debido a que la penetración de los hongos de pudrición provocó una mayor absorción de agua, a causa de las grietas o mayores espacios vacíos por la desunión del bambú con el plástico (Steckel *et al.*, 2006; Klyosov, 2007).



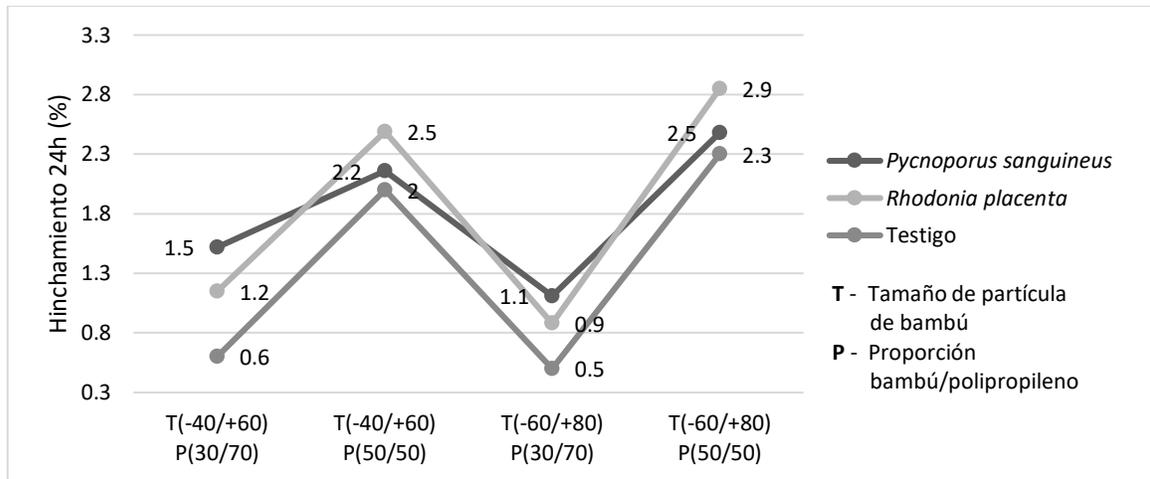
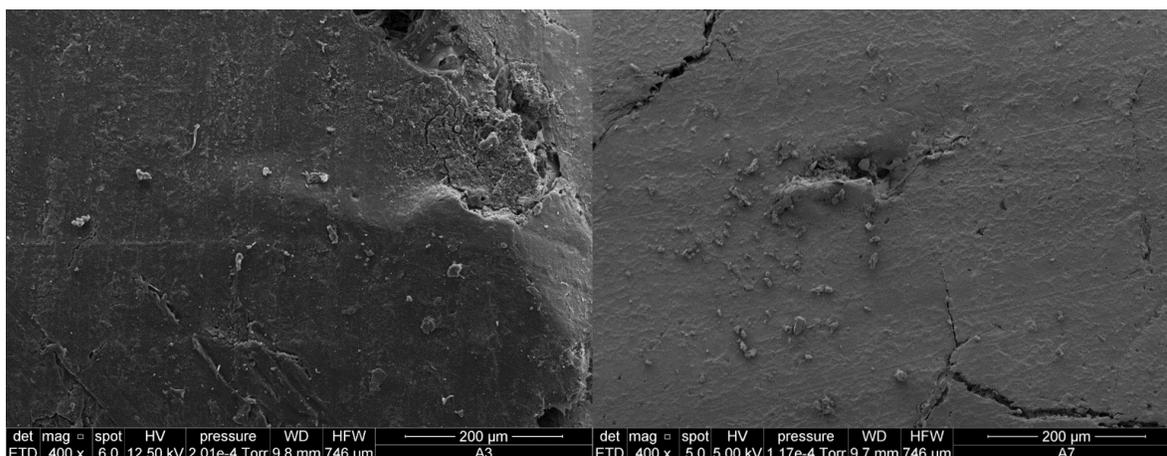


Figura 6. Hinchamiento del compuesto bambú- polipropileno expuesto a hongos de pudrición.

Los resultados de la Figura 6 muestran que los compuesto bambú - polipropileno con más contenido de partículas de bambú, después de la exposición a hongos de pudrición registraron los valores más altos de hinchamiento, en respuesta al aumento de los grupos hidroxilo del bambú y por su naturaleza hidrofílica; esto concuerda con lo indicado por diversos autores (Westman *et al.*, 2010; Mankowski y Morrell, 2000; Verhey y Laks, 2002). Al hincharse las partículas de bambú, se generaron microgrietas entre las partículas y la matriz polimerica que originaron porosidad y fisuras por donde penetró el agua (Bouafif *et al.*, 2009).

Dado que se utilizaron tanto una proporción, como un tamaño de partículas más grandes, esto generó una mayor superficie hidrofílica expuesta a la humedad, y con ello aumentó el hinchamiento. Lo contrario ocurrió con menores porcentajes y tamaños de partículas (Figura 7) (Verhey y Laks, 2002; Wang y Morrel, 2004; Bouafif *et al.*, 2009). Así el grado de degradación por los hongos depende del contenido de bambú en los compuestos; es decir en los compuestos con más cantidad de partículas de bambú hubo una mayor penetración de los hongos, lo cual favoreció la desunión entre el bambú y el plástico, que a su vez causó una mayor porosidad o fisuras (Steckel *et al.*, 2006; Klyosov, 2007) y generó que el hinchamiento en los compuestos se incrementara.



Proporción bambú/polipropileno de 50/50 (izquierda) y 30/70 (derecha)

Figura 7. Muestras sometidas a hinchamiento posterior a su exposición a *Pycnoporus sanguineus* (L.) Murrill., con tamaño de partícula 60/80.

Los valores de hinchamiento para la proporción bambú/polipropileno 50/50 (<2.9 %) y los dos tamaños de partícula expuestos a los hongos de pudrición (Figura 6) fueron inferiores a los documentados por Kartal *et al.* (2013), de 9.4 % y 9.7 %; así como los citados por Cárdenas (2012) de 10.0 %; ambos autores trabajaron con proporciones y tamaños de partículas similares y la exposición a hongos de pudrición blanca y café fue por 16 semanas; esta diferencia de valores se debe a que el tiempo de inmersión de las probetas en el presente estudio fue de 24 horas, en cambio en los estudios mencionados fue más prolongado (30 y 200 días, respectivamente). No obstante, los resultados que aquí se documentan son cercanos a los indicados por Hosseinihashemi *et al.* (2011) de 3.6 % y 4.1 %, cuyo tiempo de inmersión de las probetas fue también de 24 horas.

El análisis estadístico de variancia (ANOVA) demostró que la variable proporción (P) resultó altamente significativa (p-valor < 0.0001), y las dobles interacciones entre tipo de hongo y proporción (H*P), así como entre tamaño de partícula y proporción (T*P) fueron significativas (p-valor de 0.0411 y 0.034, respectivamente).

Propiedades mecánicas de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación

Flexión estática

En la Figura 8 se muestra la resistencia máxima en flexión estática del compuesto bambú/polipropileno sin exposición (testigo), con exposición a humedad y con exposición a dos hongos de pudrición. En los compuestos bambú/polipropileno con exposición se observó que 23.7 MPa fue el valor más alto y correspondió al compuesto con tamaño de partícula más chico (60/80), proporción bambú/polipropileno de 30/70 y exposición a *R. placenta*; el menor valor (10.4 MPa) se registró en el compuesto con tamaño de partícula superior (40/60), proporción bambú/polipropileno de 50/50 y en presencia de *P. sanguineus*.

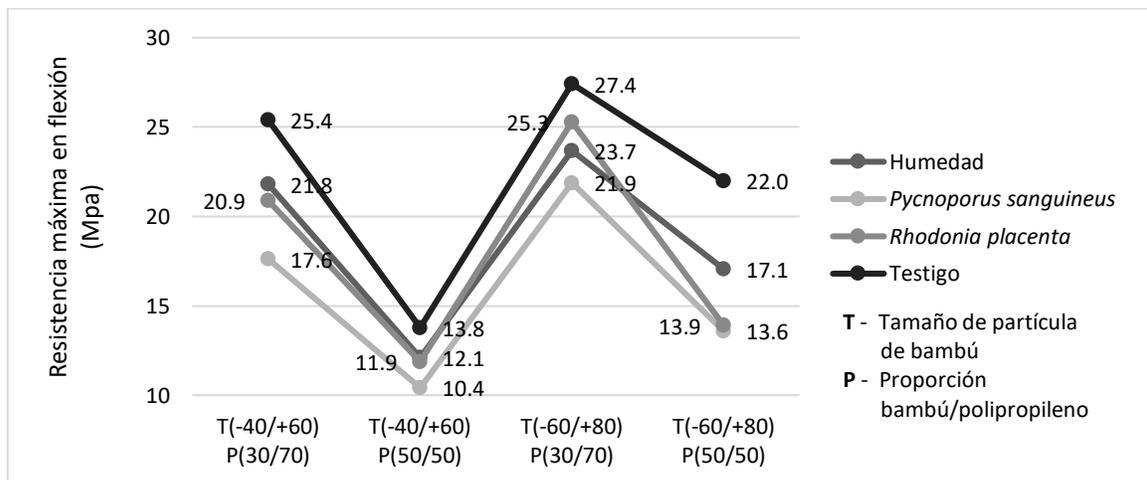


Figura 8. Resistencia máxima en Flexión del compuesto bambú- polipropileno expuesto a dos especies fúngicas de pudrición.

Los resultados evidenciaron que el compuesto bambú - polipropileno con exposición a hongos de pudrición son menores a los compuestos testigo y a los registros de 15 a 22.5 MPa hallados por Lázaro *et al.* (2016b), quienes utilizaron los mismos tamaños

de partículas y proporciones sin exposición. Esto demuestra que la exposición a los hongos de pudrición tiene una relación inversa con la resistencia máxima a la flexión; lo cual se apoya en la evaluación de las propiedades mecánicas después de la exposición a hongos de Stark (2001), Schirp y Wolcott (2005), Ibach (2013); y Candelier *et al.* (2018). Asimismo, los resultados de las probetas sometidas a humedad fueron cercanos a los de las probetas expuestas a hongos, lo cual indica que es posible que la humedad tenga similar influencia que la presencia de dichos organismos (Figura 9), situación que concuerda con lo citado por Cárdenas (2012).

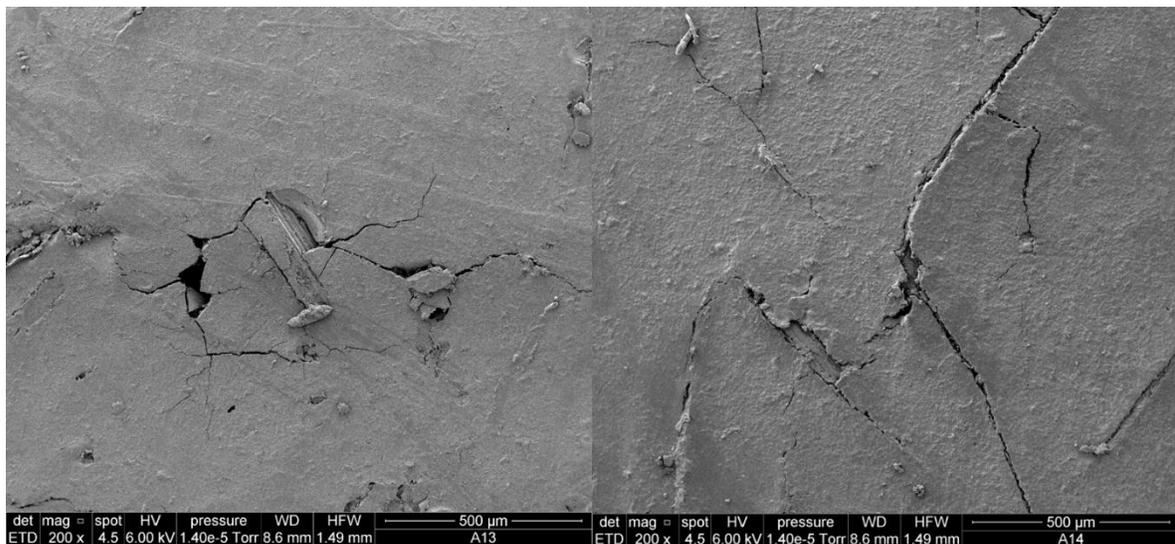


Figura 9. Muestras con tamaño de partícula 60/80, sometidas a la acción de humedad (izquierda) y *Pycnoporus sanguineus* (L.) Murrill., (derecha).

Asimismo, se demuestra que los compuestos bambú - polipropileno con menor tamaño de partículas presentaron los mayores valores de resistencia máxima a la flexión, porque en función del tamaño de las partículas hay un grado de encapsulamiento en la matriz polimérica; es decir, las partículas pequeñas son encapsuladas de manera más efectiva (Verhey y Laks, 2002).

En la Figura 8 se muestra que en los compuestos bambú - polipropileno el aumento del contenido de partículas de bambú disminuyó los valores de la resistencia máxima en flexión estática, hecho que coincide con lo afirmado por Schirp y Wolcott (2005), Kartal *et al.* (2013) y Córdova *et al.* (2020).

El análisis estadístico de variancia (ANOVA) demostró que las variables tamaño de partícula (T) y proporción (P) resultaron altamente significativas (p-valor de 0.0001 y < 0.0001, respectivamente) y la variable tipo de hongo (H) fue significativa (p-valor de 0.0137).

Tensión

En los compuestos bambú - polipropileno con exposición, se observó que el 15.0 MPa fue el valor más alto para los compuestos que contenían menor tamaño de partícula 60/80, proporción bambú/polipropileno 30/70 y expuestos a *R. placenta* (Figura 10); el menor valor (7.7 MPa) se obtuvo para los compuestos con mayor tamaño de partícula 40/60, proporción bambú/polipropileno 50/50 y presencia de *R. placenta* (Figura 10).

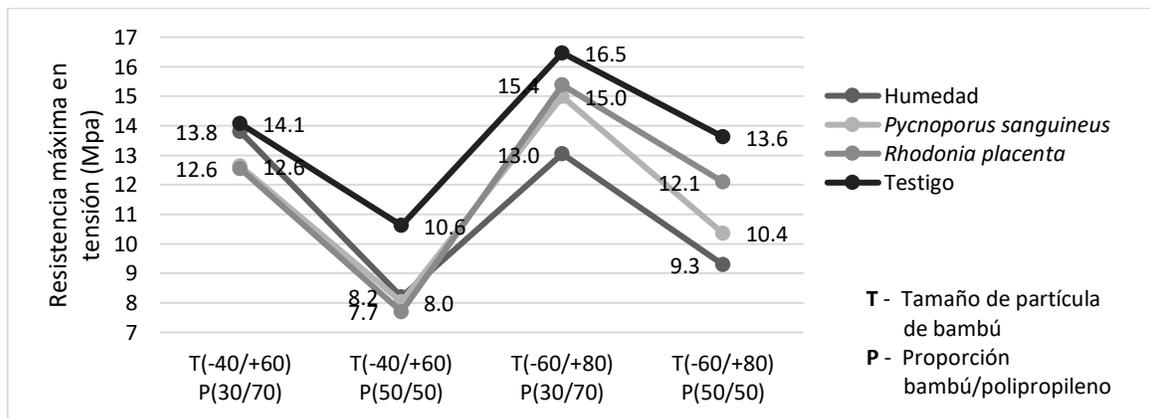


Figura 10. Resistencia máxima en tensión del compuesto bambú- polipropileno expuesto a hongos de pudrición.

Los compuesto bambú - polipropileno con exposición a hongos de pudrición tuvieron menores valores que los compuestos sin exposición (testigo); lo mismo ocurre al compararlos con los resultados de Lázaro *et al.* (2016b), quienes señalan entre 16 y 17.8 MPa, con iguales tamaños de partículas y proporciones sin exposición. Esto demostraría que la exposición a los hongos de pudrición influye de manera inversa en la resistencia máxima a la tensión; lo cual se apoya en varios estudios en los cuales se registran pérdidas de las propiedades mecánicas, posterior a la exposición a hongos biodegradadores (Stark, 2001; Cárdenas, 2012; Ibach, 2013; Candelier *et al.*, 2018; Teixeira *et al.*, 2018). Sin embargo, los valores registrados son cercanos a las probetas expuestas solo a humedad, lo cual demostró su influencia inversa en la propiedad de tensión.

Los compuesto bambú - polipropileno con menor tamaño de partículas presentaron la resistencia máxima en tensión superiores para ambos hongos de pudrición, ya que las partículas pequeñas son encapsuladas de manera más efectiva por la matriz polimérica (Verhey y Laks, 2002); hecho que repercute en el aumento de dicha propiedad mecánica. La disminución del contenido de partículas de bambú aumenta los valores de resistencia máxima en tensión (Lu *et al.*, 2005). Por ello, los compuestos bambú - polipropileno elaborados con menores proporciones de bambú (30%) registraron mayores valores de resistencia máxima en tracción.

El análisis estadístico de variancia (ANOVA) demostró que las variables tamaño de partícula (T) y proporción (P) resultaron altamente significativas (p -valor < 0.0001 para ambas).

Impacto

En los compuestos bambú - polipropileno expuestos a las especies fúngicas se observó que el valor más alto (0.53 J) correspondió a la proporción bambú/polipropileno 30/70, para los dos tamaños de partículas y ambos hongos de pudrición (Figura 11). Los menores valores (0.33 J) se registraron para la proporción bambú/polipropileno 50/50, con el mayor tamaño de partícula 40/60 y expuestos a *P. sanguineus*. Lo anterior concuerda con la mayor

degradación del material compuesto bambú - polipropileno. Asimismo, estos resultados fueron superiores a los de los compuestos testigo, con ello se demostró que esta propiedad mecánica no fue afectada por la biodegradación de los hongos de pudrición, en los materiales compuestos.

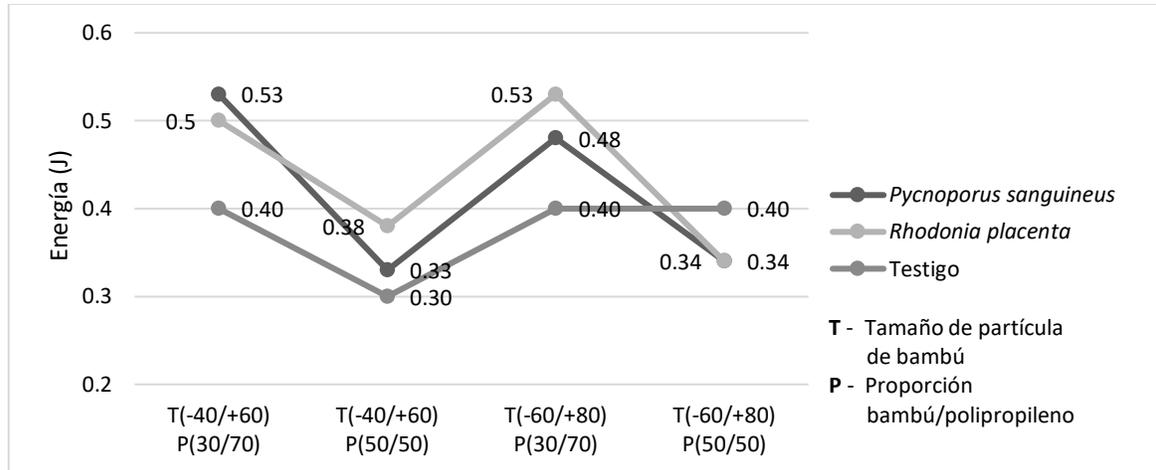


Figura 11. Impacto del compuesto bambú- polipropileno expuesto a hongos de pudrición.

Los valores de los compuesto bambú - polipropileno con exposición a hongos de pudrición fueron menores a los citados por Cárdenas (2012), cuyo registro promedio fue de 0.6 J para muestras elaboradas por extrusión e inyección y expuestas a hongos de pudrición. Asimismo, Lázaro *et al.* (2016b) documentaron valores entre 0.39 y 0.44 J con tamaños de partículas y proporciones similares, pero sin exposición a hongos y con el mismo método de fabricación. Esto evidencia una mayor influencia en la propiedad mecánica de impacto por el método de fabricación del material compuesto. Sin embargo, la propiedad mecánica de impacto, sí es influenciada en pruebas de exposición prolongadas, como el intemperismo (Fuentes *et al.* 2014).

En los compuesto bambú - polipropileno, el aumento del contenido de partículas de bambú disminuyó los valores de la propiedad de impacto, ello indica que el

polipropileno es el principal responsable de la resistencia al impacto. El tamaño de partícula no tuvo una influencia significativa.

El análisis estadístico de variancia (ANOVA) demostró que la variable proporción (P) resultó altamente significativa (p -valor < 0.0001).

Análisis estadístico

En el Cuadro 4 se presentan los valores obtenidos y la desviación estándar de las variables pérdida de peso, y las propiedades físicas de densidad anhidra, absorción e hinchamiento.

Cuadro 4. Valores obtenidos y desviación estándar de propiedades físicas.

| Hongo | Tamaño de partícula (Mesh) | Pp. (bambú/plástico) | Pérdida de peso % [d.e] | Densidad (g cm ⁻³) | A (%) | H (%) |
|----------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|
| <i>P. sanguineus</i> | -40/+60 | 50/50 | 3.56 [1.11] | 0.65 [0.07] | 29.36 [5.91] | 2.16 [0.46] |
| <i>P. sanguineus</i> | -40/+60 | 30/70 | 3.32 [0.59] | 0.74 [0.05] | 14.28 [4.92] | 1.52 [0.54] |
| <i>P. sanguineus</i> | -60/+80 | 50/50 | 4.85 [0.67] | 0.83 [0.05] | 23.26 [4.25] | 2.48 [0.25] |
| <i>P. sanguineus</i> | -60/+80 | 30/70 | 3.32 [0.92] | 0,88 [0.04] | 7.67 [1.91] | 1.11 [0.34] |
| <i>R.placenta</i> | -40/+60 | 50/50 | 2.98 [1.01] | 0.69 [0.05] | 27.07 [4.42] | 2.49 [0.67] |
| <i>R.placenta</i> | -40/+60 | 30/70 | 2.26 [0.26] | 0.73 [0.06] | 14.01 [5.75] | 1.15 [0.37] |
| <i>R.placenta</i> | -60/+80 | 50/50 | 3.41 [0.90] | 0.84 [0.05] | 17.90 [4.30] | 2.85 [0.14] |
| <i>R.placenta</i> | -60/+80 | 30/70 | 2.76 [0.61] | 0.89 [0.02] | 7.36 [1.27] | 0.88 [0.59] |
| Ninguno | -40/+60 | 50/50 | | 0.88 [0.06] | 13.2 [1.18] | 2.0 [0.36] |
| Ninguno | -40/+60 | 30/70 | | 0.86 [0.03] | 4.8 [0.64] | 0.6 [0.39] |
| Ninguno | -60/+80 | 50/50 | | 0.89 [0.04] | 12.12 [1.64] | 2.3 [0.57] |
| Ninguno | -60/+80 | 30/70 | | 0.92 [0.04] | 4.2 [0.41] | 0.5 [0.31] |

A = Absorción; H= Hinchamiento.

En el Cuadro 5 se presentan los valores y la desviación estándar de las variables correspondientes a las propiedades mecánicas.

Cuadro 5. Valores obtenidos y desviación estándar de propiedades mecánicas.

| Factor de Exposición | Tamaño de partícula (mesh) | Pp. (bambú/plástico) | Flexión estática | Tensión | Impacto |
|----------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|-------------|
| | | | Resistencia máxima (Mpa) | R. máxima (Mpa) | Energía (J) |
| <i>P. sanguineus</i> | -40/+60 | 50/50 | 10.41 [2.92] | 8.03 [1.18] | 0.33 [0.04] |
| <i>P. sanguineus</i> | -40/+60 | 30/70 | 17.62 [3.34] | 12.64 [1.98] | 0.53 [0.13] |
| <i>P. sanguineus</i> | -60/+80 | 50/50 | 13.58 [3.31] | 10.36 [0.73] | 0.34 [0.11] |
| <i>P. sanguineus</i> | -60/+80 | 30/70 | 21.88 [3.08] | 14.99 [2.65] | 0.48 [0.08] |
| <i>R.placenta</i> | -40/+60 | 50/50 | 11.87 [3.02] | 7.70 [0.63] | 0.38 [0.09] |
| <i>R.placenta</i> | -40/+60 | 30/70 | 20.89 [3.95] | 12.55 [1.47] | 0.50 [0.08] |
| <i>R.placenta</i> | -60/+80 | 50/50 | 13.91 [3.52] | 12.09 [1.21] | 0.34 [0.05] |
| <i>R.placenta</i> | -60/+80 | 30/70 | 25.29 [1.38] | 15.38 [1.59] | 0.53 [0.07] |
| Humedad | -40/+60 | 50/50 | 12.10 [4.91] | 8.20 [0.68] | |
| Humedad | -40/+60 | 30/70 | 21.81 [2.12] | 13.80 [1.87] | |
| Humedad | -60/+80 | 50/50 | 17.05 [3.69] | 9.30 [0.90] | |
| Humedad | -60/+80 | 30/70 | 23.68 [1.74] | 13.04 [1.51] | |
| Testigo | -40/+60 | 50/50 | 13.78 [3.10] | 10.62 [3.13] | 0.3 [0.09] |
| Testigo | -40/+60 | 30/70 | 25.40 [2.27] | 14.07 [2.35] | 0.4 [0.05] |
| Testigo | -60/+80 | 50/50 | 22.00 [4.55] | 13.62 [1.41] | 0.4 [0.05] |
| Testigo | -60/+80 | 30/70 | 27.42 [4.77] | 16.47 [3.66] | 0.4 [0.07] |

En el Cuadro 6 se resumen los valores del análisis de variancia (ANOVA) para la durabilidad, pérdida de peso, densidad, absorción, e hinchamiento; y en el Cuadro 7

para las propiedades mecánicas de resistencia máxima en flexión estática, módulo de elasticidad en flexión estática, carga máxima en tensión e impacto de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación. Finalmente, en el Cuadro 8 se exhiben los valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de *Tukey* para las mismas variables.

Cuadro 6. Valores del análisis de variancia (ANOVA) para durabilidad y ensayos físicos.

| Fuente de variabilidad | Grados de libertad (G.L.) | Durabilidad | | Densidad | | Absorción (24 horas) | | Hinchamiento | |
|------------------------|---------------------------|-------------|------|----------|------|----------------------|------|--------------|------|
| | | p-valor | Sig. | p-valor | Sig. | p-valor | Sig. | p-valor | Sig. |
| H | 1 | 0.0002 | ** | 0.2316 | n.s. | 0.0756 | n.s. | 0.8684 | n.s. |
| T | 1 | 0.0176 | * | <0.0001 | ** | <0.0001 | ** | 0.9957 | n.s. |
| P | 1 | 0.0011 | ** | <0.0001 | ** | <0.0001 | ** | <0.0001 | ** |
| H*T | 1 | 0.683 | n.s. | 0.9542 | n.s. | 0.4961 | n.s. | 0.7689 | n.s. |
| H*P | 1 | 0.6554 | n.s. | 0.3603 | n.s. | 0.1255 | n.s. | 0.0411 | * |
| T*P | 1 | 0.1748 | n.s. | 0.3909 | n.s. | 0.6604 | n.s. | 0.034 | * |
| H*T*P | 1 | 0.1343 | n.s. | 0.4917 | n.s. | 0.5079 | n.s. | 0.8475 | n.s. |
| Error | 42 | 0.0022 | | <0.0001 | | <0.0001 | | <0.0001 | |
| Total corregido | 55 | | | | | | | | |
| C.V. | | 25.35 | | 5.92 | | 24.04 | | 29.3 | |

H = Efecto principal del factor tipo de hongo; T = Efecto principal del factor tamaño de partícula; P = Efecto principal del factor proporción bambú/plástico; H*T = Efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y tamaño de partícula; H*P = Efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico; T*P = Efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico; H*T*P = Efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico; C.V. = Coeficiente de variabilidad; n.s. = No significativo; * = Significativo; ** = Muy significativo.

Cuadro 7. Valores del análisis de variancia (ANOVA) para ensayos mecánicos.

| Fuente de variabilidad | Grados de libertad (G.L.) | Flexión (R _{máx}) | | Tensión | | Impacto | |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| | | p-valor | Sig. | p-valor | Sig. | p-valor | Sig. |
| H | 1 | 0.0137 | * | 0.4308 | n.s. | 0.4109 | n.s. |
| T | 1 | 0.0001 | ** | <0.0001 | ** | 0.3668 | n.s. |
| P | 1 | <0.0001 | ** | <0.0001 | ** | <0.0001 | ** |
| H*T | 1 | 0.7646 | n.s. | 0.2315 | n.s. | 0.3688 | n.s. |
| H*P | 1 | 0.1447 | n.s. | 0.6561 | n.s. | 0.437 | n.s. |
| T*P | 1 | 0.3012 | n.s. | 0.3877 | n.s. | 0.7577 | n.s. |
| H*T*P | 1 | 0.6997 | n.s. | 0.3182 | n.s. | 0.1245 | n.s. |
| Error | 42 | <0.0001 | | G. L. = 37 | <0.0001 | G. L. = 37 | <0.0001 |
| Total corregido | 55 | | | Total corregida = 50 | | Total corregida = 50 | |
| C.V. | | 18.19 | | 13.51 | | 21.61 | |

H = Efecto principal del factor tipo de hongo; T = Efecto principal del factor tamaño de partícula; P = Efecto principal del factor proporción bambú/plástico; H*T = Efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y tamaño de partícula; H*P = Efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico; T*P = Efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico; H*T*P = Efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico; C.V. = Coeficiente de variabilidad; n.s. = No significativo; * = Significativo; ** = Muy significativo.



Cuadro 8. Valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de *Tukey*.

| Variable | Tipo de hongo | | | Tamaño de partícula | | | Proporción bambú/plástico | | |
|-----------------------------|---------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|
| | Nivel | Media | Tukey | Nivel | Media | Tukey | Nivel | Media | Tukey |
| Pérdida de peso | Ps | 3.76 | A | -40/+60 | 3.03 | B | 50/50 | 3.70 | A |
| | Pp | 2.85 | B | -60/+80 | 3.59 | A | 30/70 | 2.92 | B |
| Densidad | Ps | 0.77 | A | -40/+60 | 0.70 | B | 50/50 | 0.75 | B |
| | Pp | 0.79 | A | -60/+80 | 0.86 | A | 30/70 | 0.81 | A |
| Absorción | Ps | 18.65 | A | -40/+60 | 21.18 | A | 50/50 | 24.40 | A |
| | Pp | 16.58 | A | -60/+80 | 14.05 | B | 30/70 | 10.83 | B |
| Hinchamiento | Ps | 1.82 | A | -40/+60 | 1.83 | A | 50/50 | 2.50 | A |
| | Pp | 1.84 | A | -60/+80 | 1.83 | A | 30/70 | 1.17 | B |
| Flexión (R _{máx}) | Ps | 15.87 | B | -40/+60 | 15.20 | B | 50/50 | 12.44 | B |
| | Pp | 17.98 | A | -60/+80 | 18.66 | A | 30/70 | 21.42 | A |
| Tensión | Ps | 5.85 | A | -40/+60 | 5.16 | B | 50/50 | 4.82 | B |
| | Pp | 5.95 | A | -60/+80 | 6.62 | A | 30/70 | 6.95 | A |
| Impacto | Ps | 0.42 | A | -40/+60 | 0.44 | A | 50/50 | 0.34 | B |
| | Pp | 0.42 | A | -60/+80 | 0.41 | A | 30/70 | 0.50 | A |

Conclusiones

Los compuestos bambú - polipropileno son afectados por *Pycnoporus sanguineus* (3.3 %) y por *Rhodonía placenta* (2.2 %). La mayor pérdida de peso en los compuestos se presenta con una proporción de partículas bambú/polipropileno de 50/50.

La biodegradación en materiales compuestos bambú - polipropileno disminuye los valores de densidad anhidra, resistencia máxima en flexión estática y resistencia máxima en tensión. Sin embargo, incrementa los valores de absorción, hinchamiento e impacto.

En general, el tamaño de partícula 60/80 registra valores superiores a 40/60 en densidad anhidra, resistencia máxima en flexión estática y tensión. Por otro lado, un menor tamaño de partícula (60/80) disminuye los valores de absorción de agua.

Posterior a la exposición a hongos, se observa que al incrementarse la proporción de partícula (50/50) de bambú en el compuesto, se presentan menores valores de impacto y resistencia máxima en flexión. Por otra parte, las mayores cantidades de plástico (30/70) aumentan los valores de resistencia máxima en tensión, hinchamiento, y absorción de agua.

Agradecimientos

Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad, *INNOVATE PERÚ*, por apoyar y financiar la presente investigación con el proyecto 414-PNICP-PIAP-2014. A Javier Gago Campusano, del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) por el apoyo en la extrusión de los materiales.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Ana Gabriela Altez Basaldúa: ejecución de trabajo de campo, ensayos de laboratorio y redacción del manuscrito; Aldo Joao Cárdenas Oscanoa: planificación, asesoría de investigación, redacción y revisión del manuscrito; Martin Araujo Flores: asesoría de la investigación y revisión del manuscrito.



Referencias

American Society for Testing and Materials (ASTM). 1998. Standard Test Method for Water Absorption of Plastic. ASTM D 570 – 98. West Conshohocken, PA, USA. 4 p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 1999. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood Base Fiber and Particle Panels Materials ASTM D 1037 – 99. West Conshohocken, PA, USA. 30 p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2003a. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials ASTM D790-03. West Conshohocken, PA, USA 11 p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2003b. Standard Test Method for Tensile Properties for Plastics. ASTM D 638 – 03. West Conshohocken, PA, USA.15 p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2005. Standard Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods (Withdrawn 2014). ASTM D2017-05. West Conshohocken, PA, USA 5 p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2010. Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact). ASTM D5420-04. West Conshohocken, PA, USA 8 p.

Barton, J., K. Czaja, M. Grzymek and J. Lipok. 2017. Evaluation of wood-polyethylene composites biodegradability caused by filamentous fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation* 118 (1) 10-18. Doi: 10.1016/j.ibiod.2017.01.014.

Bouafif, H., A. Koubaa, P. Perré and A. Cloutier. 2009. Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Composites: Part A Applied Science and Manufacturing* 40: 1975-1981. Doi: org/10.1016/j.compositesa.2009.06.003.

Candelier, K., A. Atli and J. Alteyrac. 2018. Termite and decay resistance of bioplast-spruce green wood-plastic composites. *European Journal of Wood and Wood Products*. 77(2019) 157–169. Doi: 10.1007/s00107-018-1368-y.

Cárdenas, A. 2012. Evaluación de la eficiencia como preservante antifúngico del borato de zinc y su efecto en las propiedades físicas y mecánicas de materiales compuestos de plástico y madera de pino. Tesis de Maestría en Ciencia de Productos Forestales. Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal., México. 145 p.

Catto, A., L. Montagna, S. Almeida, R. Silveira and R. Santana. 2016. Wood plastic composites weathering: Effects of compatibilization on biodegradation in soil and fungal decay. *International Biodeterioration & Biodegradation* 109(1): 11–22. Doi:org/10.1016/j.ibiod.2015.12.026.

Córdova, A., A. Cárdenas y H. Gonzáles. 2020. Caracterización física y mecánica de compuestos de *Guazuma crinita* Mart. a base de polipropileno virgen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. 11 (57)*. Doi: 10.29298/rmcf.v11i57.621.

Encinas, O. y N. Mora. 2003. Patrones de degradación de las maderas de Pino caribe, Curarire y Drago por *Gleophyllum trabeum*, *Trametes versicolor* y *Pycnoporus sanguineus*. *Revista forestal venezolana* 1(47):2-14
<http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/24336> (12 de marzo de 2020).

Fabiyi, J., A. McDonald, J. Morrell and C. Freitag. 2011. Effects of wood species on durability and chemical changes of fungal decayed wood plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42(5) 501-510. Doi:10.1016/j.compositesa.2011.01.009.

- Fuentes, F., J. Silva, F. Quintana, J. Turrado, A. Cárdenas, R. Rodríguez y J. Robledo. 2014. Comportamiento al intemperismo natural de compositos polipropileno madera. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 6 (27): 102-113. Doi: 10.29298/rmcf.v6i27.284.
- Ghavami, K. 2005. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. 2005. *Cement & Concrete Composites* 27:637-49. Doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002.
- Hosseinihashemi, S., M. Modirzare, V. Safdari and K. Behzad. 2011. Decay resistance, hardness, water absorption, and thickness swelling of a bagasse fiber/plastic composites. *BioResources* 6 (3): 3289-3299. Doi:10.15376/biores.6.3.3289-3299.
- Ibach, R. 2013. Biological properties of wood. *In*: Rowell, R. M. (Ed.). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. 2nd edition. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. pp. 99-126.
- Irbe, I., B. Andersons, J. Chirkova, U. Kallavus, I. Andersone and O. Faix, O. 2006. On the changes of pinewood (*Pinus sylvestris* L.) Chemical composition and ultrastructure during the attack by brown-rot fungi *Postia placenta* and *Coniophora puteana*. *International Biodeterioration & Biodegradation* 57(2): 99-106. Doi:10.1016/j.ibiod.2005.12.002.
- Kalia, S., B. Kaith and I. Kaur. 2009. Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—a review. *Polymer Engineering and Science* 49(7):1253-1272. DOI 10.1002/pen.21328.
- Kartal, N., A. Sema, T. Evren, N. Yilgör, T. Yoshimura and K. Tsunoda. 2013. Wood and Bamboo-PP Composites: Fungal and Termite Resistance, Water Absorption, and FT-IR Analyses. *BioResources* 8(1): 1222-1224. Doi: 10.15376/biores.8.1.1222-1244.
- Klyosov, A. 2007. *Wood-Plastic Composites*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA. pp. 726.

Lázaro, K., H. Gonzáles, A. Cárdenas, y J. Gago. 2016a. Evaluación de las propiedades físicas de material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia*) y polipropileno. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 7 (38): 79-94. Doi: 10.29298/rmcf.v7i38.6.

Lázaro, K., H. Gonzáles y A. Cárdenas. 2016b. Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia*) y polipropileno. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 7 (38): 95-110. Doi: 10.29298/rmcf.v7i38.7.

Lomelí, M., H. Ochoa, F. Fuentes, S. García, M. Cerpa and J. Silva. 2009. Evaluation of accelerated decay of wood plastic composites by *Xylophagus* fungi. International Biodet & Biodegradation 63: 1030-1035. Doi:10.1016/j.ibiod.2009.08.002.

Lu, J., Q. Wu and I. Negulescu. 2005. Wood-Fiber/High-Density-Polyethylene Composites: Coupling Agent Performance. Journal of Applied Polymer Science no 96: 93-102. Doi: 10.1002/app.21410.

Mankowski, M. and J. Morrell. 2000. Patterns of fungal attack in composites wood. Wood Fiber Science 32(3): 345-367.

Morris, P. and P. Cooper. 1998. Recycled Plastic/Wood Composite Lumber Attacked by Fungi. Forest Products Journal 48(1): 86-88.

<https://search.proquest.com/openview/ab064d1873aecd47f96c3dbbb5b4da7d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=25222> (12 de marzo de 2020).

Pendleton, D., T. Hoffard, B. Woodward and M. Wolcott. 2002. Durability of an extruded HDPE/wood composite. Composites and Manufactured products 52(6): 21-27.

Statistical Analysis System (SAS). 2008. SAS Ver. 9.2. SAS, Inc. Cary, NC, USA. n/p.

Schirp, A. and M. Wolcott. 2005. Influence of fungal decay and moisture absorption on mechanical properties of extruded wood-plastic composites. *Wood and Fiber Science* 37(4): 643-652. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1541/1541> (9 de marzo de 2020).

Stark, N. 2001. Influence of Moisture Absorption on Mechanical Properties of Wood Flour-Polypropylene Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 14(5): 643-652. Doi: 10.1106/UDKY-0403-626E-1H4P.

Steckel, V., C. Clemons and H. Thoemen. 2006. Effects of material parameters on the diffusion and sorption properties of wood-flour/polypropylene composites. *Applied Polymer Science* 103(2): 752-763. Doi: 10.1002/app.25037.

Teixeira, J., M. Matos, B. Nascimento, S. Griza, F. Rodrigues and R. Marino. 2018. Production and mechanical evaluation of biodegradable composites by white rot fungi. *Ciência e Agrotecnologia* 42(6):676-684. Doi:10.1590/1413-70542018426022318.

Verhey, S. and P. Laks. 2002. Wood particles size affects the decay resistance of wood fiber/thermoplastic composites. *Forest Products Journal* 52 (11): 78-81. <https://search.proquest.com/openview/fd3974e418bbaeab8c3f814092c4644c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=25222> (12 de marzo de 2020).

Wang, W. and J. Morrel. 2004. Water sorption characteristics of two wood-plastic composites. *Forest Products Journal* 54(12): 209-212. <https://ir.library.oregonstate.edu/concern/articles/sf2685560> (14 de marzo de 2020).

Westman, M., L. Fifield, K. Simmons, S. Laddha, T. Kafentzis. 2010. Natural Fiber Composites: A Review. Department of Energy of US. Richland, WA, USA. Doi: 10.2172/989448.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.