



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.801>

Artículo

Efecto del intemperismo y biodeterioro en compuestos plástico-madera (CPM) elaborados con borato de zinc

Weathering and biodegradation effects in wood-plastic composites (WPC) made with zinc borate

Aldo Joao Cárdenas Oscanoa¹, Francisco Javier Fuentes Talavera², Jorge Ramón Robledo Ortiz², Juan Carlos Meza Contreras² y Ricardo Gonzáles Cruz

Abstract

The effects of zinc borate (ZB) on physical and mechanical properties of wood plastic composites (WPCs) were assessed. WPCs were elaborated with 0, 1, 3, y 5 % ZB concentrations, wood flour, mesh 60 and polypropylene in 50/48, 50/47, 50/45 y 50/43 proportions as a function of ZB concentration. 2 % of maleic anhydride of polypropylene (MAPP) was included in all WPCS. Specimens were exposed to natural weathering for 6 months. Bioassays with the fungi *Gleophyllum trabeum* (brown rot) and *Trametes versicolor* (white rot) were conducted by means of agar (EN 350-1) and soil block (ASTM D 2017-05) tests. Moreover, water absorption and swelling as well as static bending, tensile strength and impact strength were evaluated. Other properties like surface brightness and morphological characterization by means of scanning electron microscopy (SEM) were also considered. Zinc borate has no effect on mechanical properties of the untreated WPCS. After weathering, ZB had no effect on static bending and impact strength. However, a positive effect on tensile strength was observed. ZB had a positive influence on impact strength of WPCS exposed to biodegradation by fungi. Regardless of the low decay rates, ZB proved effective against fungal decay; weight losses suffered by WPC specimens exposed in agar and soil block tests showed no significant differences.

Key words: Biodegradation, wood plastic-composite, weathering, physical properties, mechanical properties, fungal rots.

Resumen

Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de compuestos plásticos de madera (CPM) elaborados con borato de zinc (BZ) y sometidos a tratamientos de intemperismo y biodeterioro. Se utilizaron concentraciones de BZ al 0, 1, 3 y 5 %; harina de madera de pino, malla 60 y polipropileno, en proporciones de 50/48, 50/47, 50/45 y 50/43, en función de la concentración de BZ. En todos los CPM, se adicionó 2 % de anhídrido maleico de polipropileno (MAPP) como agente acoplante. Los CPM se expusieron al intemperismo natural durante 6 meses y al biodeterioro con *Gleophyllum trabeum* (pudrición parda) y *Trametes versicolor* (pudrición blanca) mediante pruebas de agar (EN 350-1) y bloque suelo (ASTM D 2017-05). Se evaluaron las propiedades físicas de absorción e hinchamiento y las mecánicas de flexión estática, resistencia a la tracción y resistencia al impacto. Además de la alteración de la luminosidad y caracterización morfológica con microscopía electrónica de barrido (SEM). El borato de zinc no tuvo efecto en las propiedades mecánicas de los CPM sin tratamientos. Después del intemperismo, el BZ no incidió sobre la flexión estática y resistencia al impacto; aunque, se observó un efecto positivo en la resistencia a la tracción. En CPM expuestos a la biodegradación por hongos, el BZ influyó positivamente en la resistencia al impacto. Independiente de las bajas tasas de descomposición, el BZ fue eficaz contra la descomposición fúngica; las pérdidas de peso de los CPM expuestos en pruebas de agar y bloque de suelo no mostraron diferencias significativas.

Palabras clave: Biodeterioro, compuesto plástico-madera, intemperismo, propiedades físicas, propiedades mecánicas, pudriciones fúngicas.

Fecha de recepción/Reception date: 17 de junio de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 28 de octubre de 2020

¹ Departamento de Industrias Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

² Departamento de Madera, Celulosa y Papel, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Jalisco, México.

* Autor para correspondencia: acardenas@lamolina.edu.pe

Introducción

Los compuestos plásticos madera (CPM) son materiales que pueden elaborarse a partir de plásticos y partículas provenientes de fibras naturales. Es común agregar algunos aditivos para mejorar las propiedades físicas, mecánicas o de otro tipo. Estos aditivos pueden servir como acoplantes, conservantes, colorantes o retardantes de fuego. Se sabe que el desempeño de los CPM en productos de uso depende de factores como el tamaño de partícula, la proporción de madera/polímero, las condiciones de producción, las especies de madera, etcétera.

El intemperismo y la biodegradación son procesos naturales que actúan sobre los CPM. Al respecto, existe una preocupación por su resistencia cuando se exponen a la lluvia, el sol y diversos microorganismos. La resistencia de los CPM degradados depende, en gran medida, de variables como la cantidad y la calidad de los aditivos y las condiciones de fabricación.

La fotodegradación por radiación solar es un factor importante de la degradación de la superficie de los CPM que se agrava por una combinación de humedad y temperatura. Los plásticos, en teoría, no son susceptibles a la biodegradación por hongos e insectos; sin embargo, los grupos hidroperóxido de carbono y cromóforo del polímero pueden propiciar una mayor sensibilidad a la fotodegradación de la matriz del polímero. Los grupos carbonilo son, probablemente, su causa principal, ya que inducen reacciones de los polímeros expuestos a la radiación UV. El intemperismo del polipropileno produce un aumento de la cristalinidad, debido a la escisión de la cadena (Stark y Matuana, 2004).

Durante mucho tiempo se consideró que la naturaleza hidrófoba de la matriz de plástico en los CPM proporciona suficiente resistencia a la absorción de agua por fibras o partículas de madera y, en consecuencia, al ataque de hongos. Por lo tanto, las investigaciones se centraron, principalmente, en cómo el efecto del tamaño de partícula, las proporciones de plástico / fibra y los aditivos afectan las propiedades

físicas y el rendimiento mecánico de CPM (Lázaro *et al.*, 2016a; Córdova *et al.*, 2020). Sin embargo, muchos investigadores han documentado que los CPM son susceptibles a la biodegradación (Mankowski y Morrell, 2000; Verhey *et al.*, 2001; Pendleton *et al.*, 2002; Fabiyi *et al.*, 2011).

En la biodegradación de los CPM, la humedad es crítica; por tanto, un tamaño de partícula más grande y una mayor proporción de madera los hacen sean más susceptibles al ataque de hongos, porque se absorbe una mayor cantidad de humedad (Mankowski y Morrell, 2000; Rowell, 2012). En consecuencia, el ataque fúngico es más evidente en la interfaz madera-polímero, pero se reduce al utilizar un agente de acoplamiento. La modificación de la madera también es una herramienta para los productos con base en madera (Rowell e Ibach, 2018).

La pérdida de peso causada por hongos en los CPM es proporcional al contenido de madera. Verhey *et al.* (2001) indicó que los CPM elaborados con pino y sin tratamiento preservante presentaron un considerable biodeterioro. Además, la degradación de los CPM expuestos a hongos de pudrición marrón fue mayor que la causada por los de pudrición blanca. Pendleton *et al.* (2002) trataron CPM con preservantes y los expusieron a hongos de pudrición marrón y blanca, sin registrar ninguna pérdida de masa con bajo (30 %) y medio (50 %) contenido de partículas de madera. No obstante, las formulaciones con valores altos (> 50 %) exhibieron un biodeterioro considerable. Sus resultados confirman que mayores proporciones de plástico impiden la biodegradación de los CPM.

Las propiedades físicas y mecánicas de los CPM son afectadas después de la exposición a intemperismo y biodegradación. Algunas de ellas, como la absorción de agua, contracción e hinchamiento, flexión estática, resistencia a la tracción e impacto se utilizan para evaluar tales efectos (Fabiyyi y McDonald, 2010; Silva *et al.* 2018; Robledo-Ortíz *et al.*, 2020; Córdova *et al.*, 2020). En general,

agregar harina de madera a la matriz plástica aumenta las propiedades del tablero mecánico (Lázaro *et al.*, 2016a).

Silva *et al.* (2006) informan que un aumento en el contenido de humedad de los CPM resulta en una disminución de las propiedades físicas y mecánicas.

En los últimos años, la investigación de los CPM se ha centrado en el uso de diferentes especies de madera y el conocimiento sobre el uso de diversos aditivos. El borato de zinc (BZ) fue probado por diferentes investigadores como un agente preservante (Silva *et al.*, 2006; Schirp *et al.*, 2008; Gurhan *et al.*, 2009). Se usa comúnmente porque tiene baja solubilidad en agua y no se lixivia con facilidad, resiste altas temperaturas (requeridas para los procesos de extrusión e inyección) y es económico. Además, es de baja toxicidad para los humanos (Verhey *et al.*, 2001) y puede usarse como retardante de fuego en plástico, madera y en productos textiles (Gurhan *et al.*, 2009).

Los bajos niveles de lixiviación son críticos para el uso exterior de los CPM porque el agua puede eliminar los aditivos. Los CPM para aplicaciones exteriores, también deben resistir el ataque de hongos, insectos y bacterias.

En la presente investigación, los CPM con concentraciones de BZ de 0, 1, 3 y 5 % estuvieron expuestos a la intemperie 6 meses (mayo a noviembre), así como a la biodegradación por hongos durante 16 semanas. Antes y después del tratamiento se evaluó la influencia del preservante en las propiedades físicas y mecánicas.

En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue conocer cómo el BZ afecta las propiedades físicas y mecánicas de los CPM cuando se exponen a intemperismo y biodegradación.



Materiales y Métodos

La harina de madera de pino (*Pinus* spp.) utilizada fue recolectada de un aserradero ubicado en el estado de Jalisco, se secó y se tamizó en una malla 60 (246 μm). Se utilizó polipropileno (PP) (*Formolene* 1102KR) como matriz polimérica, con un índice de flujo de fusión de 4 g 10 min⁻¹. Además, se aplicaron borato de zinc (BZ) (*Sigma Aldrich* 14470) y anhídrido maleico de polipropileno (MAPP) (*Orevac* CA 100) como agente preservante y agente acoplante, respectivamente. Las formulaciones compuestas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Formulaciones del material compuesto.

Formulaciones	Harina de madera (bms %)	PP (%)	BZ (%)	MAPP (%)
1	50	48	0	2
2	50	47	1	2
3	50	45	3	2
4	50	43	5	2

PP = Polipropileno; BZ = Borato de zinc; MAPP = Polipropileno anhídrido maléfico.

Preparación de materiales compuestos

Las mezclas compuestas se prepararon usando una extrusora de doble tornillo *Leistritz* micro 26 GL / GG-36D. El perfil de temperatura del extrusor se ajustó entre 150 °C y 190 °C desde el barril hasta la matriz, girando a una velocidad de tornillo

de 60 rpm y una velocidad de alimentación de 175 rpm. El enfriamiento del extruido a la salida del troquel se realizó en agua a temperatura ambiente. Después de la extrusión, las mezclas se granularon. Las muestras de los CPM se produjeron por moldeo por inyección en una máquina *Nissei ES1000*. Previamente, los gránulos se secaron en un secador por convección de aire, *MATSUI DMZ2-40*, a un punto de rocío de 40 °C, durante 2 horas a 80 °C. El perfil de temperatura en la máquina de inyección se ajustó a cuatro valores: 160/170/185/200 °C.

Absorción de agua y propiedades mecánicas

La absorción de agua se determinó de acuerdo con la norma ASTM D570 (ASTM, 1998); antes de la prueba, tres muestras de cada formulación se secaron a 50 °C, durante 24 horas para determinar la masa seca y el espesor inicial. Las muestras se sumergieron completamente en agua destilada a temperatura ambiente. Después de 2 h, se determinó la masa y el espesor. El procedimiento se repitió una vez al día por una semana y, finalmente, cada dos semanas hasta la saturación (el aumento de la masa promedio por período de dos semanas debería ser inferior a 1 % del aumento total de masa).

Se determinaron las propiedades mecánicas antes y después del tratamiento para cada formulación y tableros de PP puro. La resistencia a la flexión por impacto se realizó con muestras rectangulares utilizando un medidor de impacto *Gardner* (peso descendente) basado en el estándar ASTM D5420 para determinar la energía de falla media (EMF) (ASTM, 2010). Las pruebas de flexión se hicieron con una máquina SFM-10 de *United Calibration Corporation*, de acuerdo con el estándar ASTM D790 (ASTM, 2003a). Las pruebas de tensión se llevaron a cabo con una máquina de prueba *Instron 4411*, con base en la norma ASTM D638 (ASTM, 2003b). Todas las muestras se analizaron a temperatura ambiente.



Alteración de la luminosidad por intemperismo

Se determinó mediante una adaptación del estándar TAPPI T 527 (TAPPI, 2007). Las muestras de 80 × 40 × 2.6 mm se analizaron en un espectrómetro *Elrepho* 3000, la superficie expuesta tenía 30 mm de diámetro, lo que permitió cubrir los bordes del instrumento. El procedimiento se repitió ocho veces por formulación y prueba cada 14 días por 6 meses en orden, para evaluar la alteración de la luminosidad durante la exposición al intemperismo natural.

Caracterización morfológica de la superficie

Se obtuvieron microfotografías para la caracterización morfológica de la superficie, con un microscopio electrónico de barrido (SEM), *HITACHI* TM-1000. Las muestras de cada formulación se analizaron al principio y al final de los ciclos de biodeterioro e intemperismo.

Resistencia al intemperismo

El intemperismo natural se realizó exponiendo al aire libre especímenes de los CPM en Guadalajara, México (20°74'45.6" N 103°51'45.8 O). Las muestras se fijaron en un marco de madera con una red paralela a la superficie como soporte, para obtener una exposición total de una de las caras de los CPM a la intemperie. Esto se hizo para permitir el libre paso del agua y evitar las inundaciones. La exposición comenzó en mayo y finalizó en noviembre. Las condiciones climáticas se presentan en el Cuadro 2.



Cuadro 2. Precipitación, humedad relativa y temperatura durante la exposición a intemperismo.

Mes	Precipitación (mm)	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)		
			Máxima	Media	Mínima
Mayo	14	52	33	24	13
Junio	57	61	34	24	16
Julio	244	84	28	22	16
Agosto	132	77	27	22	16
Septiembre	47	72	27	21	15
Octubre	79	66	26	18	13
Noviembre	0	59	26	16	8

Ensayo de biodegradación

Ensayo bloque suelo

Las pruebas se realizaron de acuerdo con la norma ASTM D1413 (ASTM, 2007). El suelo era orgánico con un valor de pH de 6.8, tamizado a 6 mallas (3.3 mm). Se prepararon cámaras de descomposición, las cuales consistían en un frasco de vidrio de 500 mL lleno hasta la mitad con tierra. El contenido de humedad del suelo se ajustó a 35 % agregando agua destilada. La capacidad de retención de agua (WHC) se fijó entre 30 y 40 %.

Se colocaron en frascos pequeñas tiras de alimentación de aliso (*Alnus* sp.) y pino (*Pinus* sp.) para hongos de pudrición marrón (*Gloeophyllum trabeum* (Pers.) Murrill) y blanca (*Trametes versicolor* (L.) Lloyd), respectivamente. Los frascos se cerraron y esterilizaron durante 30 + 15 min a 121 °C. Después de enfriar, las tiras de alimentación se inocularon con agar cortado del borde de crecimiento activo del hongo

respectivo. Los frascos se incubaron a 27 °C hasta que el micelio cubrió la superficie de la tira del alimentador.

Las muestras de CPM se secaron a 100 °C durante 24 h para calcular la humedad inicial. Luego se sumergieron en agua destilada a temperatura ambiente durante 90 días para alcanzar un nivel de humedad que permita el ataque de hongos (alrededor de 25 %), el cual se verificó evaluando la masa de los CPM sumergidos. Después de este tiempo, las muestras de CPM se esterilizaron a 121 °C durante 15 minutos. Las muestras se incubaron durante 16 semanas a 27 °C.

Después de la exposición, las muestras se retiraron y se limpiaron cuidadosamente del micelio adherido a la superficie. A continuación, se secaron y pesaron para calcular el contenido final de humedad y la pérdida de masa.

El contenido de humedad se evaluó para verificar si las condiciones eran adecuadas para el crecimiento de hongos; mientras que, la pérdida de masa se usó para determinar el grado de descomposición. Ante el supuesto que el contenido de humedad y la pérdida de masa ocurrirían solo en el componente de madera, estos valores se calcularon en función de la cantidad de madera en los CPM (50 %).

Ensayo bloque agar

Las pruebas se realizaron de acuerdo con la norma BS EN 113:1997 (BS EN, 1997), ASTM D2017 (ASTM, 2005) y los procedimientos descritos por Silva *et al.* (2006). Las cámaras de descomposición fueron placas de Petri de 115 mm de diámetro con 3 % de agar extracto de malta (MEA). El medio se inoculó con tapones de micelio de 4 mm de diámetro cortados de los bordes del cultivo en crecimiento activo. Se cultivaron hongos durante 14 y 21 días para hongos de pudrición blanca y marrón, respectivamente. Las muestras de los CPM se esterilizaron a 121 °C durante 15 minutos y se colocaron en las placas de Petri en dos pequeños viales de vidrio.

Las muestras de los CPM se expusieron por 16 semanas. Al finalizar este periodo, se retiraron, limpiaron del micelio adherido y pesaron de acuerdo con el procedimiento descrito en la prueba de bloqueo del suelo.

Resultados y Discusión

Intemperismo

Alteración de la luminosidad

La alteración de la luminosidad en los CPM se evaluó con base en la adaptación del estándar TAPPI T 527 (TAPPI, 2007), después de seis meses de exposición a la intemperie y se resumen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Alteración de la luminosidad en los CPM luego de exposición a intemperismo natural por seis meses.

Alteración de la luminosidad (% Δ L)	Concentración de BZ (%)			
	0	1	3	5
Inicial	7.7	8.8	9.6	10.3
Final	29.9	32.5	31.6	32.8

El efecto de la intemperie sobre la luminosidad de los CPM se muestra en la Figura 1. Se evidencia que tanto los CPM con y sin BZ se aclararon después de la exposición a la intemperie. Los que contenían BZ se ligeramente más claros, sin importar la cantidad

de BZ. Por lo general, el color del CPM refleja, principalmente, el color del componente de madera debido a la presencia de extractivos (Fuentes *et al.*, 2018).

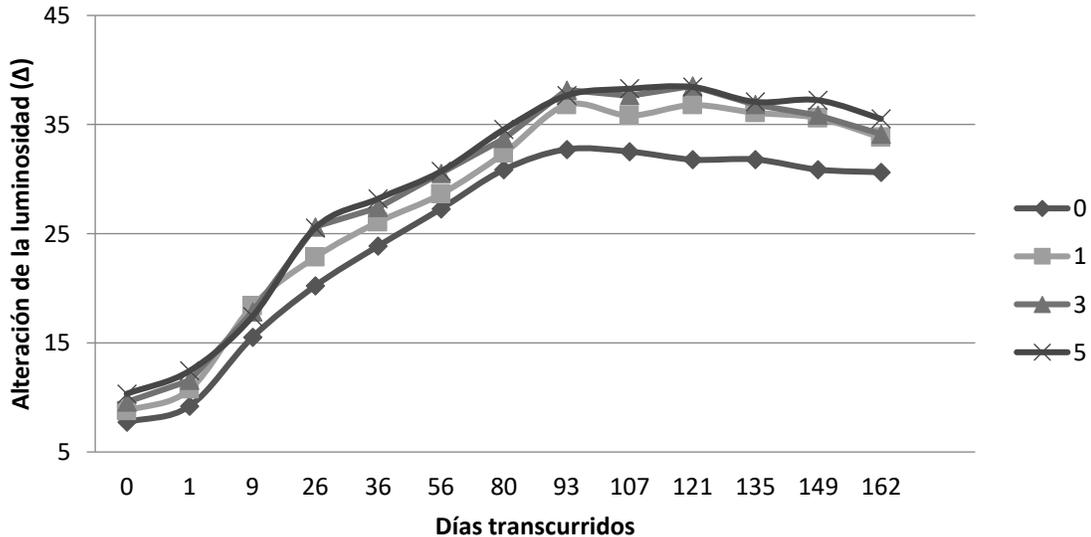


Figura 1. Alteración de la luminosidad en CPM luego de seis meses de exposición a intemperismo.

La presencia de grupos cromóforos en PP y de harina de madera de pino promueven la absorción de la luz ultravioleta (UV), cuando son expuestos a la intemperie; de tal manera que el componente lignina se degrada por la acción de estos grupos (Stark y Matuana, 2004). La erosión del componente de madera en los CPM resulta en una erosión cíclica de la superficie que, en consecuencia, origina una mayor cantidad de lignina expuesta a la degradación, y con ello la formación de nuevos grupos funcionales cromóforos, como los ácidos carboxílicos, quinonas y radicales hidroperoxi (Fabiyyi y McDonald, 2010). Además, la erosión de la superficie podría eliminar algunos extractos de madera solubles en agua, lo cual causa la luminosidad observada en los CPM.

De acuerdo con Temiz *et al.* (2007) y Fuentes *et al.* (2018), la radiación UV puede iluminar el CPM, ya que provoca grietas en la superficie de la matriz polimérica, lo cual blanquea las partículas de madera.

SEM

La Figura 2 muestra las microfotografías SEM de los CPM sin tratamientos. No se registraron diferencias en ningún CPM elaborado con diferentes concentraciones de BZ, excepto en el CPM con 5 % BZ, en el cual se observaron algunos cristales (flechas) que pueden atribuirse a una mayor concentración de BZ.

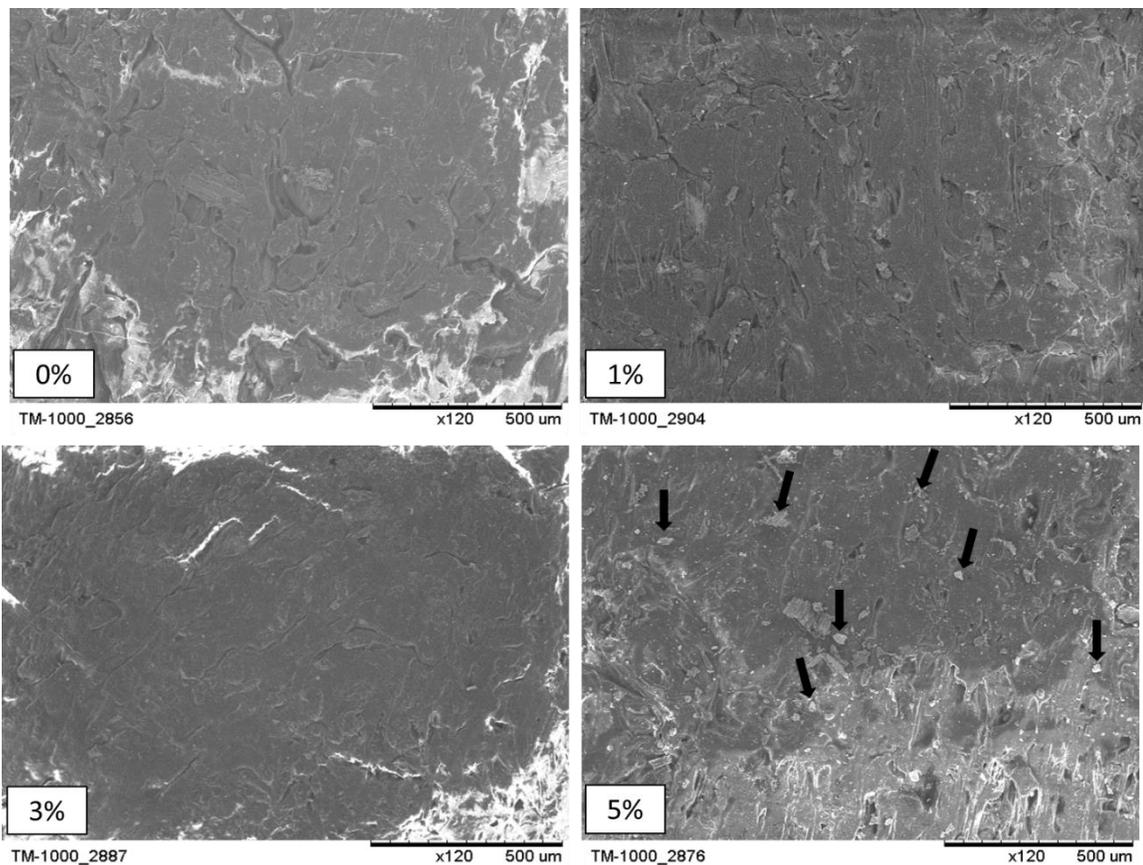


Figura 2. Microfotografías SEM de la superficie de los CPM elaborados con diferentes concentraciones de BZ sin exposición.

En los CPM expuestos a intemperismo, todos exhibieron degradación luego del tratamiento. Fabiyi y McDonald (2010) han citado resultados similares.

En la Figura 3 se presentan imágenes SEM de los CPM sometidos a intemperismo. En ellas se demuestra una menor degradación, cuando aumenta la concentración de BZ; posiblemente, debido al efecto antioxidante de BZ (Cárdenas, 2012). En general, se evidenció agrietamiento en todos los CPM desgastados; lo anterior, es posible que responda a la escisión de la cadena del polímero debido a la fotoxidación, que resulta en zonas de PP altamente cristalizadas, cuyo origen es la escisión de las moléculas de la cadena en la fase amorfa (Fabiyi y McDonald, 2010). Esto ocasiona una mayor fragmentación de la unión entre polímero y madera, la cual se aprecia en la superficie de los CPM.

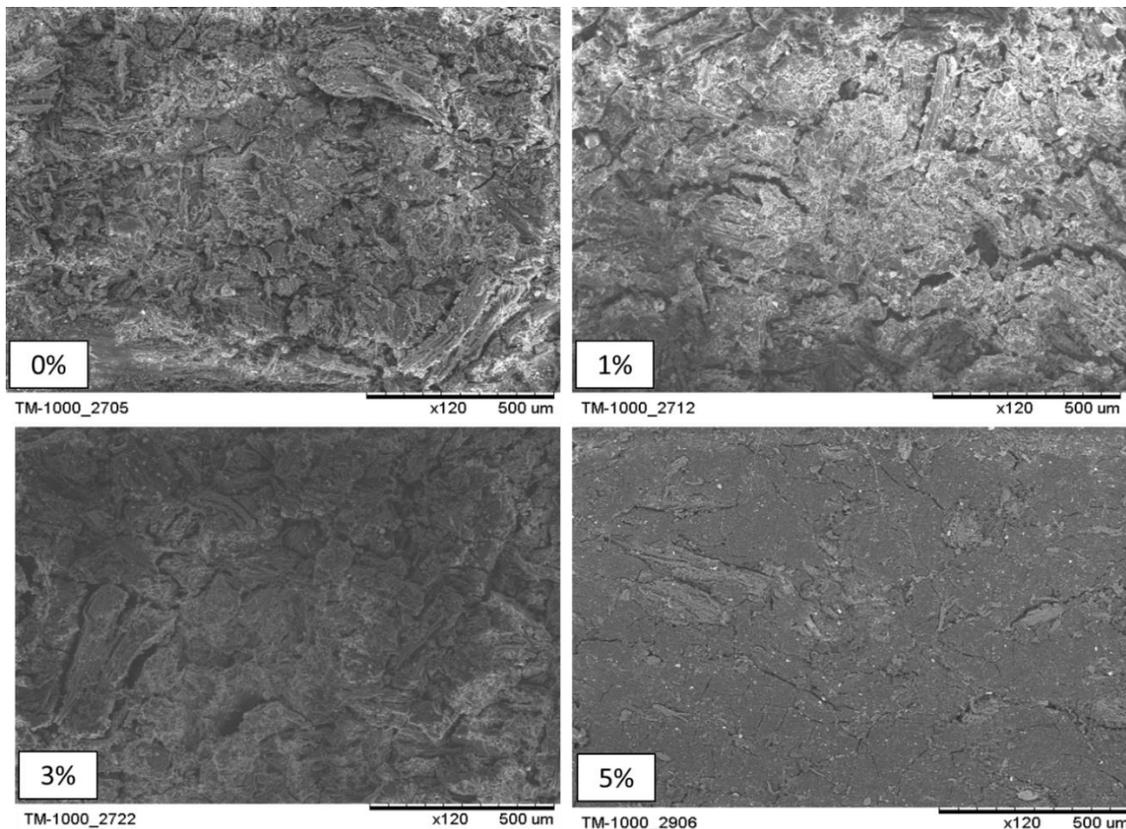


Figura 3. Microfotografías SEM de CPM elaborados con diferentes concentraciones de BZ expuestos a intemperismo.

Propiedades físicas y mecánicas

Propiedades físicas

La humedad inicial de los CPM fue de 0.3 % para todas las concentraciones de BZ. Los CPM fueron sumergidos en agua destilada durante 162 días para alcanza niveles de humedad de 18 % (Figura 4). La menor absorción de humedad responde a niveles más altos de BZ. Cárdenas (2012) documentó este comportamiento en CPM degradados, lo cual inhibió la colonización por hongos y, consecuentemente, la pérdida de masa en la incubación, debido a la limitada accesibilidad del agua al hongo (Papadopoulos, 2010; Fabiyi *et al.*, 2011).

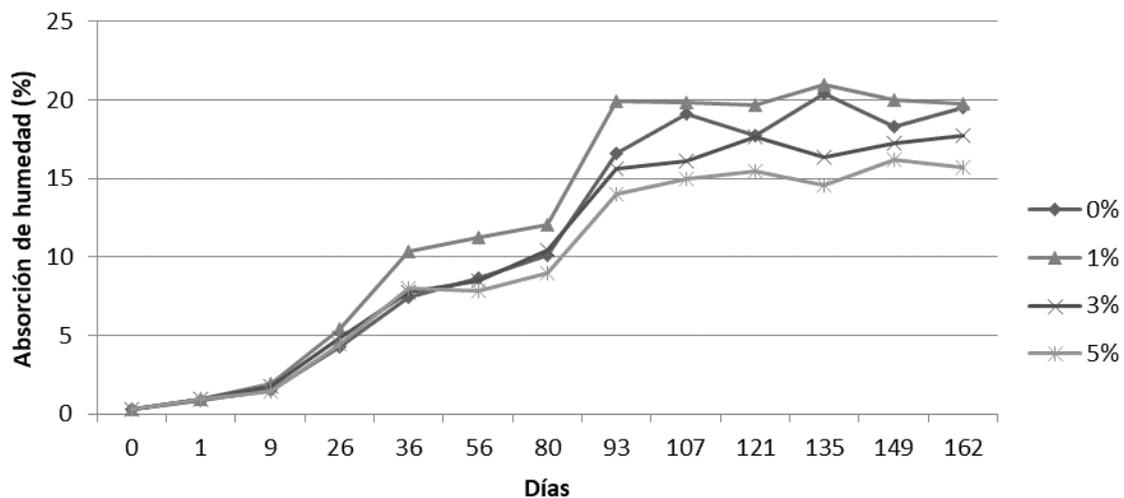


Figura 4. Influencia de la concentración de BZ en la absorción de agua de los CPM.

La prueba de hinchamiento en espesor se realizó en CPM humedecidos (162 días); y se obtuvieron aumentos de 10 %, en comparación con los tamaños iniciales (Figura 5). Se observaron incrementos máximos en los primeros 30 días, de 8 %. El tamaño y la concentración de las partículas de madera son críticos, los valores más altos causan mayor dificultad para que la matriz polimérica encapsule adecuadamente a

las partículas de madera, en consecuencia, la superficie principal de la harina de madera queda expuesta, con ello se alcanzan niveles importantes de humedad (Lázaro *et al.*, 2016b).

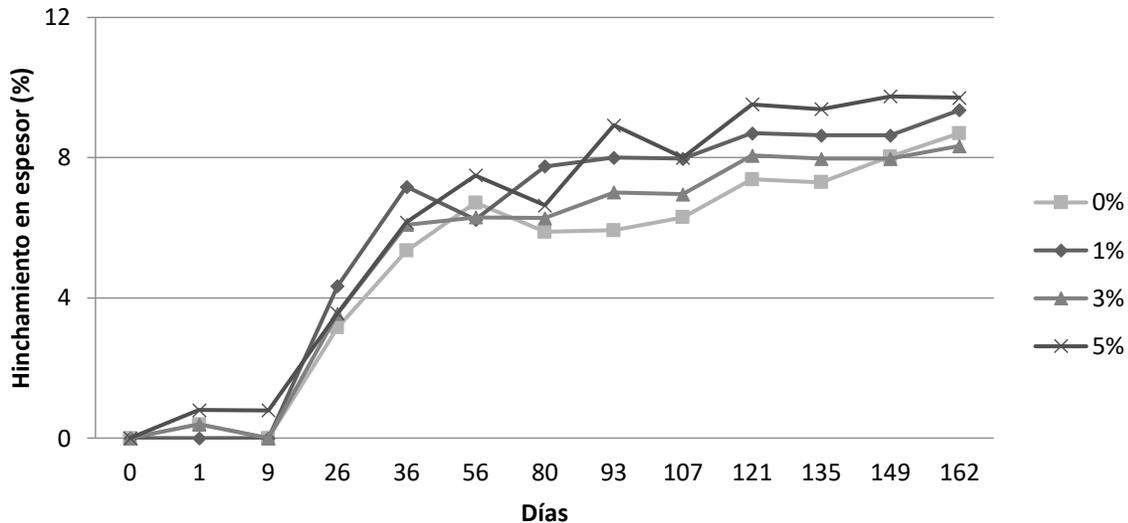


Figura 5. Efecto de la concentración de BZ en el incremento del hinchamiento de los CPM.

Propiedades mecánicas

En general, el BZ no tuvo efecto en los CPM antes de la exposición a la intemperie; aunque después de seis meses, todos los valores de las propiedades mecánicas de los CPM disminuyeron, excepto el MOR en tensión. El efecto positivo del BZ en las muestras expuestas a la intemperie (% BZ) se observó en pruebas de resistencia a la tensión (MOR) y flexión. Una posible explicación es el efecto antioxidante del BZ en los CPM expuestos sometidos al intemperismo (Cárdenas, 2012). Los valores se resumen en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Propiedades mecánicas de los CPM con y sin exposición al intemperismo (seis meses).

Tratamiento	BZ (%)	Propiedades mecánicas				Impacto (J/m)
		Flexión estática		Tensión		
		MOE MPa	MOR MPa	MOE MPa	MOR MPa	
No expuestos	0	956 [a]	38 [a]	1 568 [a]	21 [a]	677 [a]
	1	979 [b]	35 [a]	1 594 [a]	21 [a]	682 [a]
	3	987 [b]	36 [a]	1 654 [b]	21 [a]	670 [a]
	5	1 047 [b]	38 [a]	1 533 [c]	21 [a]	660 [b]
Expuestos	0	869 [a]	34 [a]	1 456 [a]	19 [a]	663 [a]
	1	806 [a]	30 [a]	1 365 [b]	22 [b]	649 [b]
	3	882 [a]	31 [a]	1 415 [a]	24 [b]	640 [b]
	5	791 [b]	31 [a]	1 500 [c]	25 [b]	638 [c]

*Valores en [] con la misma letra simbolizan no diferencia estadística significativa;
MOE = Módulo de elasticidad; MOR = Módulo de ruptura.



Biodeterioro

Pérdida de masa

En el Cuadro 5 se muestra el efecto de la concentración del BZ sobre las pérdidas de peso de los CPM expuestos a hongos de pudrición marrón y blanca.

Cuadro 5. Efecto del BZ en la pérdida de peso de los CPM por hongos de pudrición marrón y blanca (16 semanas a 27 °C).

BZ (%)	<i>Trametes versicolor</i> (L.) Lloyd		<i>Gleophyllum trabeum</i> (Pers.) Murrill		Control	
	Agar	B. Suelo	Agar	B. Suelo	Agar	B. Suelo
0	1.5 [a]	2.6 [a]	3.1 [a]	3.6 [a]	0.5 [a]	1.7 [b]
1	0.8 [b]	0.8 [b]	0.5 [b]	1.6 [b]	0.4 [a]	1.6 [b]
3	0.5 [b]	1.1 [b]	0.5 [b]	1.1 [b]	0.4 [a]	1.6 [b]
5	0.4 [b]	0.7 [b]	0.4 [b]	0.9 [b]	0.4 [a]	1.7 [b]

*Valores en [] con la misma letra simbolizan no diferencia estadística significativa.

En general, ninguno de los CPM con y sin BZ exhibieron pérdida de masa en presencia de hongos de pudrición blanca o marrón que afecte su uso posterior. El CPM sin BZ registró una disminución de masa de 3.1 y 3.6 % cuando se expuso a *G. trabeum* en pruebas de agar y bloque de suelo, respectivamente. La degradación de los CPM por hongos fue, fuertemente, afectada por la concentración de BZ, incluso el tratamiento con la concentración más baja de BZ (1 %) redujo la pérdida de masa de todas las muestras en más de 50 %, en comparación con los controles. Varios autores (Pendleton *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2006; Fabiyi *et al.*, 2011) informan mayores

porcentajes (> 20 %) en CPM con un contenido de madera de 50 %, cuando se someten a hongos de pudrición.

Las menores pérdidas de masa observadas en este estudio pueden deberse al menor tamaño de partícula utilizado para fabricar el CPM y al proceso de extrusión, el cual encapsuló adecuadamente las partículas de madera, lo cual las hizo inaccesibles a la intemperie; con ello, se limitó la colonización y la descomposición por hongos. También, se inhibe eficazmente la penetración de agentes difusibles de bajo peso molecular, como las enzimas que se requieren para la degradación fúngica (Hill *et al.*, 2005). La baja capacidad fúngica para colonizar el material compuesto se confirmó mediante imágenes SEM, las cuales no evidenciaron la presencia de hifas y células fúngicas en la superficie de los CPM.

Alteración de la luminosidad

En el Cuadro 6 se presenta la alteración de la luminosidad en los CPM después del ataque de hongos. Los CPM no tratados y tratados con BZ exhibieron un cambio de claridad. La humedad dentro de las cámaras de incubación podría causar esta modificación de color (Cárdenas, 2012). Los CPM expuestos a los hongos es posible que generen grupos cromóforos causantes del cambio en la superficie (Fuentes *et al.*, 2018). Sin embargo, no es factible atribuirlos a la infección fúngica, porque todos los CPM presentaron valores de color similares a los observados en los CPM utilizados como controles.



Cuadro 6. Efecto de la concentración de BZ en la alteración de la claridad en los CPM expuestos por 16 semanas a ensayo bloque suelo.

Alteración de la claridad (% Δ L)	Concentración de BZ (%)			
	0	1	3	5
Initial	7.7 [a]	8.8 [a]	9.6 [a]	10.3 [a]
Control	13.5 [b]	14.8 [b]	13.8 [b]	16.1 [b]
<i>Gleophyllum trabeum</i> (Pers.) Murrill	12.8 [b]	14.8 [b]	17.7 [c]	18.5 [b]
<i>Trametes versicolor</i> (L.) Lloyd	14.0 [b]	13.1 [b]	14.1 [b]	18.9 [b]

*Valores en [] con la misma letra simbolizan no diferencia estadística significativa.

SEM

En la Figura 6 se exhiben muestras de control de los CPM. Cuando se elaboró el CPM sin BZ, se observó una gran degradación de la humedad. Este efecto se explica por el hecho de que el BZ retarda la absorción de humedad (Cárdenas, 2012).



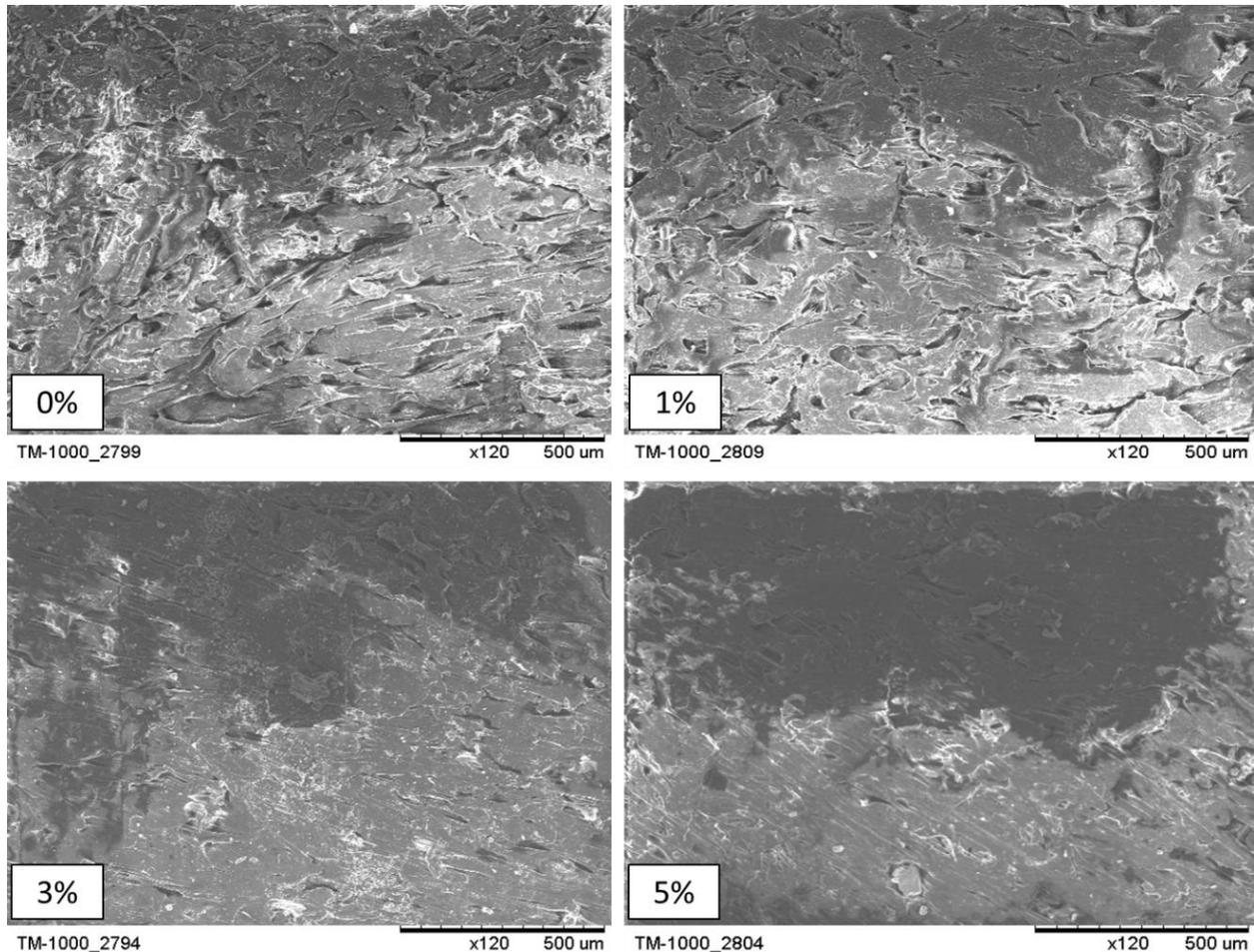


Figura 6. Microfotografías SEM de la superficie de los CPM no expuestos (controles).

Los CPM elaborados con concentraciones de BZ mayores a 1 %, y en presencia de *G. trabeum* presentaron mejor resistencia a la acción del hongo (Figura 7). Además, se observaron mayores espacios o grietas en la superficie del CPM, lo cual es evidencia del daño en las partículas de la madera, que se pueden extenderse a componentes como la celulosa, lignina y hemicelulosas. *G. trabeum* causa daños en la madera, de acuerdo con los valores de pérdida máxima de peso en el análisis gravimétrico. La biodegradación se asocia a la presencia de cavidades en la madera.

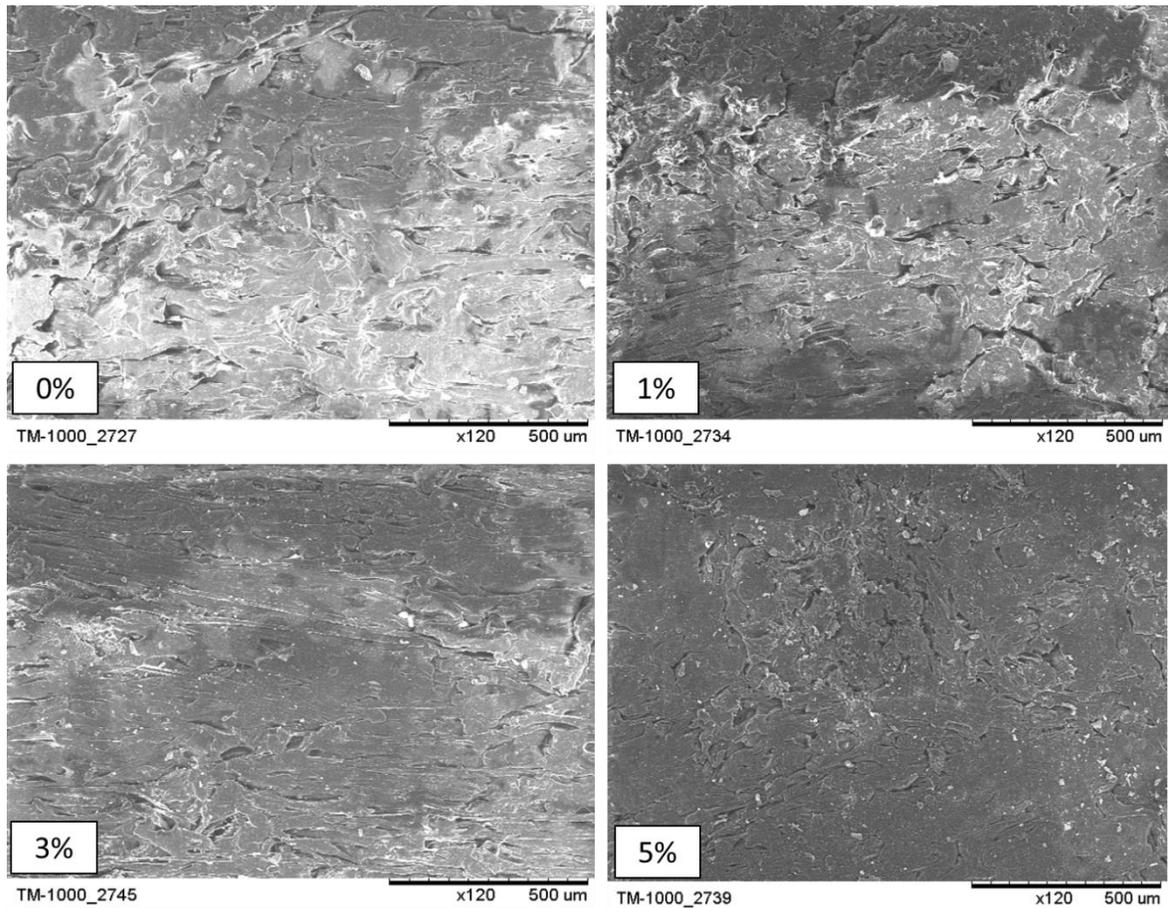


Figura 7. Microfotografías SEM de la superficie de los CPM expuestos por 16 semanas a *Gloeophyllum trabeum* (Pers.) Murrill).

Propiedades mecánicas

El BZ no tuvo ningún efecto en las muestras de los CPM antes del tratamiento. Los resultados correspondientes al tratamiento de bloque suelo se resumen en el Cuadro 7. Las propiedades mecánicas de los CPM colocados en agar no se muestran debido a las bajas pérdidas de peso registradas.

Cuadro 7. Efectos del ataque de hongos en las propiedades mecánicas de los CPM expuestos a diferentes concentraciones de BZ.

Tratamiento	BZ (%)	Propiedades mecánicas				Impacto (J/m)
		Flexión estática		Tensión		
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	
Inicial	0	956 [a]	38 [a]	1 568[a]	21 [a]	677 [a]
	1	979 [a]	35 [a]	1 594[a]	21 [a]	682 [a]
	3	987 [a]	36 [a]	1 654[b]	21 [a]	670 [a]
	5	1 047 [b]	38 [a]	1 533[c]	21 [a]	660 [b]
Control	0	854 [a]	38 [a]	1 363[a]	26 [a]	719 [a]
	1	834 [a]	36 [a]	1 563[b]	24 [a]	670 [b]
	3	847 [a]	36 [a]	1 557[b]	24 [a]	701 [b]
	5	915 [b]	36 [a]	1 570[b]	25 [a]	740 [c]
<i>G. trabeum</i>	0	857 [a]	39 [a]	1 277[a]	28 [a]	599 [a]
	1	852 [a]	34 [b]	1 409[b]	23 [b]	650 [b]
	3	883 [b]	36 [b]	1 496[b]	25 [b]	694 [b]
	5	873 [a]	36 [b]	1 561[c]	24 [b]	622 [b]
<i>T.versicolor</i>	0	861 [a]	38 [a]	1 609[a]	25 [a]	608 [a]
	1	890 [b]	35 [a]	1 493[a]	23 [a]	656 [b]
	3	900 [b]	36 [a]	1 572[b]	24 [a]	731 [b]
	5	909 [b]	36 [a]	1 544[b]	24 [a]	723 [b]

*Valores en [] con la misma letra simbolizan no diferencia estadística significativa;
 MOE = Módulo de elasticidad; MOR = Módulo de ruptura.



La propiedad de flexión estática presentó pérdida de resistencia debido a la absorción de agua, dada la similitud entre los valores del tratamiento de control y los expuestos a los hongos. El impacto registró un aumento al incrementarse la concentración de BZ en la fabricación de los CPM, probablemente por el efecto del BZ como inhibidor de la humedad.

En cuanto a la tensión, esta fue mayor en función de la concentración del BZ en los CPM, lo cual es similar a lo citado por Silva *et al.* (2018). Sin embargo, en las muestras expuestas a las pruebas de agar se observó un aumento igual en todas las concentraciones de BZ. Los contenidos de humedad finales de los CPM fueron de 20 % en promedio.

Conclusiones

El intemperismo tiene un efecto negativo en las propiedades mecánicas de los CPM, excepto en la tensión. El efecto del BZ se observa en la tensión (MOR) y el impacto, con valores más altos en aquellos CPM elaborados con mayor cantidad de BZ.

El BZ es un preservante adecuado para los CPM, ya que incrementa la resistencia a la colonización por hongos y a la decoloración.

La pérdida de masa de los CPM expuestos al agar y las pruebas de bloque suelo no tienen diferencias significativas.

Agradecimientos

Al Departamento de Madera, Celulosa y Papel, Universidad de Guadalajara (Guadalajara, Jalisco, México) y al *Deutscher Akademische Austausch Dienst* (Alemania).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Aldo Joao Cárdenas Oscanoa: desarrollo del trabajo experimental, redacción y revisión del manuscrito; Francisco Javier Fuentes Talavera: diseño y seguimiento de los experimentos, elaboración y corrección del manuscrito; Jorge Ramón Robledo Ortíz: apoyo y supervisión del trabajo experimental, apoyo en la preparación de las pruebas de ensayo, revisión del manuscrito; Juan Carlos Meza Contreras y Ricardo Gonzáles Cruz: redacción 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). 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. 8 p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2007. Standard Test Method for Wood Preservatives by Laboratory Soil-Block Cultures (Withdrawn 2016). ASTM D1413-07e1. 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.

British Standard (BS EN). 1997. BS EN 113:1997. Wood Preservation. Test Method for determining the protective effectiveness against Wood destroying basidiomycetes. Determination of the toxic values. UK. n/p.

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 Mg. Sc. Productos Forestales. Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal., México. 145 p.

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 11 (57). Doi: 10.29298/rmcf.v11i57.621.

Fabiyi, J. and A. McDonald. 2010. Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 41(10): 1434-1440. Doi: 10.1016/j.compositesa.2010.06.004.

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. 2018. Comportamiento al intemperismo natural de compositos polipropileno madera. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 6 (27): 102-113. Doi: 10.29298/rmcf.v6i27.284.

Gurhan, D., G. Cakal, I. Eroglu and S. Ozkar. 2009. Improved synthesis of fine zinc borate particles using seed crystals. *Journal of Crystal Growth* 311(6): 1545 - 1552. Doi: 10.1016/j.jcrysgr.2009.01.111.

Hill, C., S. Forster, M. Farahani, M. Hale, G. Ormondroyd and G. Williams. 2005. An investigation of cell wall micropore blocking as a possible mechanism for the decay resistance of anhydride modified wood. *International Biodeterioration & Biodegradation* 55(1): 69–76. Doi:10.1016/j.ibiod.2004.07.003.

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

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

Mankowski, M. and J. Morrell. 2000. Patterns of fungal attack in wood-plastic composites following exposure in a soil block test. *Wood and Fiber Science* 32(3):340-345. <https://ir.library.oregonstate.edu/concern/articles/fn106z43g> (19 de noviembre de 2019).

Papadopoulos, A., 2010. Chemical modification of solid wood and wood raw materials for composites production with linear chain carboxylic acid anhydrides: a brief Review. *Bioresources* 5(1):499–506. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_05/BioRes_05_1_0499_Papadopoulos_Review_Chem_Mod_Wood_Composites_Anhyd_801.pdf (5 de febrero de 2020).

Pendleton, D., T. Hoffard, T. Adcock, B. Woodward and M. Wolcott. 2002. Durability of an extruded PEAD/Wood composite. *Forest Products Journal* 52(6): 21-27.

[https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0036610896&origin=inward&txGid=01c099bcb0f2f647d8f9d2439e99871d)

[0036610896&origin=inward&txGid=01c099bcb0f2f647d8f9d2439e99871d](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0036610896&origin=inward&txGid=01c099bcb0f2f647d8f9d2439e99871d)

(10 de diciembre de 2019).

Rowell, R. M. 2012. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. 2nd Edition. Taylor and Francis. Boca Raton, London, New York, Singapore. 703 p.

Rowell, R. M. and R. Ibach. 2018. Stable and durable wood products based on molecular modification. *Journal of Tropical Forest Science (Anniversary Issue)*: 488-495. Doi: 10.26525/jtfs2018.30.5.488495.

Robledo-Ortíz, J., M. E. González-López, D. Rodrigue, J. Gutiérrez-Ruiz, F. Prezas-Lara and A. A. Pérez-Fonseca. 2020. Improving the compatibility and mechanical properties of natural fibers/Green polyethylene biocomposites produced by rotational molding. *Journal of Polymers and the Environment* 28: 1040-1049. Doi: 10.1007/s10924-020-01667-1.

Schirp, A., R. Ibach, D. Pendleton and M. Wolcott. 2008. Biological degradation of Wood Plastic Composites (CPM) and strategies for improving the resistance of CPM against biological decay. *American Chemical Society*. 29: 480-507. Doi: 10.1021/bk-2008-0982.ch029.

Silva, J., B. Gartner and J. Morrell. 2006. Towards the development of accelerated methods for assessing the durability of wood plastic composites. *Journal of Testing and Evaluation* 35(2): 203-210. Doi: 10.1520/JTE100168.



Silva, J., R. Rodríguez, F. Fuentes, R. Manríquez and M. Lomeli. 2018. Properties of thermoplastic corn starch based green composites reinforced with Barley (*Hordeum vulgare* L.) straw particles obtained by thermal compression. *Fibers and Polymers* 19(9): 1970-1979. Doi: 10.1007/s12221-018-8023-4.

Stark, N. M. and L. M. Matuana. 2004. Surface chemistry changes of weathered PEAD/wood-flour composites studied by XPS and FTIR spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability* 86: 1-9. Doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2003.11.002.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI). 2007. T 527 om-07, Color of Paper and Paperboard (d/0, C/2). *In*: TAPPI (ed.). TAPPI Test Methods. Technical Association of the Pulp & Paper Industry. Atlanta, GA, USA. n/p.

Temiz, A., N. Terziev, M. Eikenes and J. Hafren. 2007. Effect of accelerated weathering on surface chemistry of modified wood. *Applied Surface Science* 253(12): 5355-5362. Doi: 10.1016/j.apsusc.2006.12.005.

Verhey, S., P. Laks and D. Richter. 2001. Laboratory Decay Resistance of WoodFiber/Thermoplastic Composites. *Forest Products Journal* 51(9): 44-49. <http://europepmc.org/article/AGR/IND23236420> (6 de noviembre de 2019).



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.