



Artículo / Article

Evaluación de las propiedades físicas de material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno

Physical properties of materials made of bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) and polypropylene

Karen Catherine Lázaro León¹, Héctor E. Gonzáles Mora²,
Aldo J. Cárdenas Oscanoa³ y Javier Gago Campusano⁴

Resumen

En años recientes, se ha incrementado el uso de los compuestos termoplásticos reforzados con materiales lignocelulósicos, debido a la creciente necesidad de las industrias de la construcción y automotriz. Esta conducta es impulsada por varios factores de mercado y de la sociedad, como la demanda por productos amigables con el medio ambiente, la regulación estricta del uso de los químicos, cambios en el estilo de vida. Las fibras y harina de madera se usan comúnmente en los materiales compuestos, pero se pueden sustituir con otras naturales como el lino, sisal, palma, fique, yute, coco, bambú; la mayoría de ellos son desechos agro-industriales. Se utilizaron partículas provenientes de la parte apical de cañas residuales de bambú (*Guadua angustifolia*) para la obtención de materiales compuestos de polipropileno (PP) reforzados, sin y con agente acoplante (anhídrido maléico de polipropileno-MAPP). La elaboración se hizo con el método de extrusión y moldeo por compresión, con tamaños de malla ASTM: -20/+40, -40/+60 y -60/+80; proporciones de mezcla bambú/plástico: 50/50, 40/60 y 30/70; y con 0 y 2 % de MAPP. En total se obtuvieron 18 formulaciones. Se evaluaron las siguientes propiedades físicas: contenido de humedad, densidad, absorción e hinchamiento. Los resultados muestran que los materiales presentaron los mejores valores con el tamaño de malla -60/+80, con la proporción de mezcla 30/70 y cuando contenían MAPP en su composición.

Palabras clave: Bambú, *Guadua angustifolia* Kunth, materiales compuestos, método de extrusión, polipropileno, propiedades físicas.

Abstract

Today there is a growing demand of thermoplastic composites reinforced with lignocellulosic materials in the construction and automotive industries; this growth is driven by various factors, including the need of utilizing environment friendly products, the strict regulation of the use of chemicals, and lifestyle changes. Wood fibers and flour are used in the composite materials and can be replaced with flax, sisal, palm, fique, jute, coconut, and bamboo agro-industrial waste. Particles from the apical part of residual bamboo (*Guadua angustifolia*) canes were used to obtain reinforced polypropylene (PP) composites, with or without a coupling agent (maleic anhydride-propylene, MAPP). The composites were made with the extrusion compression molding process, using -20/+40, -40/+60 and -60/+80 ASTM meshes; 50/50, 40/60 and 30/70 bamboo/plastic mixing ratios, and 0 and 2 % MAPP. A total of 18 formulations were obtained. The following physical properties were assessed: moisture content, density, absorption and swelling. The results show that the materials attained the best values with the -60/+80 mesh and the 30/70 mixing ratio when they contained MAPP. It can be concluded that composites can be made using bamboo particles, propylene and a coupling agent.

Key words: Bamboo, *Guadua angustifolia* Kunth, composite materials, extrusion method, polypropylene, physical properties.

Fecha de recepción/ Reception date: 2 de julio de 2016; Fecha de aceptación/ Acceptance date: 28 de octubre de 2016

¹ Bachiller en Ciencias Forestales. Perú. Correo-e: kphiru@hotmail.com

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

³ Laboratorio de Anatomía de la Madera y Propiedades Físicas. Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera. CITEMADERA. Perú.

⁴ Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). Perú.

Introducción

En años recientes, los compuestos termoplásticos reforzados con materiales lignocelulósicos han aumentado, debido a la creciente necesidad de las industrias de la construcción y automotriz. Este crecimiento es impulsado por varios factores de mercado y de la sociedad, como la demanda por productos amigables con el medio ambiente, la regulación estricta del uso de los químicos, cambios en el estilo de vida y su creciente aceptación en el sector constructivo (Crespell y Vidal, 2008).

Las fibras y harina de madera se usan comúnmente en los materiales compuestos, pero se pueden sustituir con otras fibras naturales como el lino, sisal, palma, fique, yute, coco, bambú (Clemons *et al.*, 2013). La mayoría de ellos son desechos agro-industriales con alto contenido de lignina y celulosa; por lo que constituyen un material atractivo por su abundancia, bajo costo y buenas propiedades mecánicas (Cuéllar y Muñoz, 2009). Las fibras de bambú destacan por su rápido crecimiento y se consideran un sustituto para diferentes usos de la madera (Abdul *et al.*, 2012).

En el Perú, sobresale *Guadua angustifolia* Kunth, la cual se utiliza en construcción de viviendas, cobertizos, galpones, almacenes, casas de campo, etcétera; sin embargo, la actividad de aprovechamiento del bambú en el país suele generar muchos residuos (González, 2005).

Los polímeros son materiales habituales de amplio uso en la sociedad; principalmente, en el sector de envases, fundas, envolturas, construcción y automotriz, lo que a su vez genera desechos en cantidades importantes. Se estima que solo se recicla 13 % de los productos plásticos debido al costo de recuperación, así como la identificación del mismo (Brien, 2013); el resto no recuperado, termina acabando en la intemperie, en botaderos o en rellenos sanitarios, los que están cada vez más saturados.

La unión de la fibra vegetal y cualquier polímero da origen a un material compuesto, cuyas propiedades físicas son importantes, porque permiten definir el uso final del producto de acuerdo a los resultados que presenten en relación a la densidad y absorción (Faruk *et al.*, 2012). Uno de los mayores problemas que presentan los materiales compuestos con cantidades grandes de partícula en su composición es la absorción de agua (Bahari y Krause, 2016; Venkateshwaran *et al.*, 2012). Asimismo, agregar MAPP ayuda a que haya una menor absorción, lo que mejora las propiedades de los materiales compuestos (Bhandari *et al.*, 2012).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento de la combinación de los diferentes tamaños de mallas, proporciones de mezcla bambú/plástico, y adición de MAPP en el contenido de humedad, densidad, absorción e hinchamiento, a fin de recomendar la o las formulaciones que aseguren un mejor desempeño del material compuesto.

Introduction

The use of thermoplastic composites reinforced with lignocellulosic materials has increased in recent years as a result of the growing need of the construction and automotive industries. This growth is driven by various market- and society-related factors, such as the demand for environment friendly products, the strict regulation of the use of chemicals, lifestyle changes, and a growing acceptance in the construction sector (Crespell and Vidal, 2008).

Wood fibers and flour are commonly used in composite materials, but they can be replaced with other natural fibers such as flax, sisal, palm, fique, jute, coconut or bamboo (Clemons *et al.*, 2013). Most of these materials are agro-industrial waste with a high content of lignine and cellulose; therefore, they attractive due to their abundance, low cost and good mechanical properties (Cuéllar and Muñoz, 2009). Bamboo fibers stand out for their rapid growth and, in various instances, can replace wood (Abdul *et al.*, 2012).

Guadua angustifolia Kunth is prevalent in Peru, where it is utilized in the construction of houses, sheds, barns, storehouses, country houses, etc. However, the exploitation of bamboo nationwide usually leaves many residues (González, 2005).

Polymers are habitual materials widely used by society, particularly in the packing, cases, wrappings, construction and automotive sectors, whereby a considerable amount of waste is generated. According to estimates, only 13 % of the plastic products are recycled due to the high cost of its recovery process and its identification (Brien, 2013); the unrecovered remainder ends up out in the open, in garbage dumps or sanitary landfills, which are increasingly saturated.

The union of the vegetal fiber and any polymer gives rise to a composite material whose physical properties are important as they allow defining the final use of the product according to their results in relation to density and absorption (Faruk *et al.*, 2012). One of the main issues of composite materials with large amounts of particles in their composition is water absorption (Bahari and Krause, 2016; Venkateshwaran *et al.*, 2012). Furthermore, adding MAPP helps to reduce the absorption levels, and therefore to improve their properties (Bhandari *et al.*, 2012).

The objective of the present study was to assess the impact of the combination of the various mesh sizes, bamboo/plastic mixing ratios and addition of MAPP on the moisture content, density, absorption and swelling, in order to recommend the formulation or formulations that may ensure a better performance of the composite material.

Materiales y Métodos

Las partes apicales de la caña de *Guadua angustifolia* se recolectaron en Caserío Limoncito, distrito La Florida, Cajamarca, Perú. Se dejaron arear, se secaron en horno MOORE, molieron y tamizaron, para obtener tres tamaños de partícula como material de refuerzo (malla ASTM 20, 40, 60 y 80).

Como matriz termoplástica se utilizó un homopolímero de polipropileno, con un índice de fluidez de 12.5 g 10 min⁻¹ (2.16 kg 230 °C⁻¹). El agente acoplante fue el anhídrido maléico de polipropileno (MAPP), a una concentración de 2 %.

Se secaron las partículas en estufa LABOR MÜSZE RIPARI a 100 °C por 48 h para reducir el contenido de humedad. Se elaboraron diferentes mezclas (Cuadro 1). La extrusión de materiales se llevó a cabo en el laboratorio del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) usando una máquina extrusora de 1 husillo, a una temperatura entre 175-185 °C y 30 rpm, después el material extraído se molió para su posterior prensado.

Materials and Methods

The apical parts of the *Guadua angustifolia* cane were collected in the village of *Limoncito*, in the district of *La Florida*, *Cajamarca*, Peru. They were left to air out, dried in a MOORE oven, and ground and sifted in order to obtain three particle sizes as reinforcement materials (20, 40, 60 and 80 ASTM mesh).

A polypropylene homopolymer with a fluidity index of 12.5 g 10 min⁻¹ (2.16 kg 230 °C⁻¹) was used as a thermoplastic matrix. The coupling agent was maleic anhydride propylene (MAPP), at a 2 % concentration.

The particles were dried in a LABOR MÜSZE RIPARI oven during 48 hours at 100 °C in order to reduce moisture content. Various mixtures were prepared (Table 1). The materials were extruded at the laboratory of the *Instituto Peruano de Energía Nuclear*, IPEN (Peruvian Institute of Nuclear Energy) using a single screw extruder machine at a temperature of 175-185 °C and 30 rpm; the extracted material was ground for subsequent pressing.

Cuadro 1. Mezclas obtenidas con diferentes tamaños partícula, polipropileno y agente acoplante.

Formulación	Tamaño de malla ASTM	Intervalo tamaño de partícula (µm)	Composición		
			Bambú (%)	Polipropileno (%)	Agente acoplante (%)
F ₁	-20/+40	[425-850]	50	50	0
F ₂	-20/+40	[425-850]	40	60	0
F ₃	-20/+40	[425-850]	30	70	0
F ₄	-40/+60	[250-425]	50	50	0
F ₅	-40/+60	[250-425]	40	60	0
F ₆	-40/+60	[250-425]	30	70	0
F ₇	-60/+80	[180-250]	50	50	0
F ₈	-60/+80	[180-250]	40	60	0
F ₉	-60/+80	[180-250]	30	70	0
F ₁₀	-20/+40	[425-850]	50	48	2
F ₁₁	-20/+40	[425-850]	40	58	2
F ₁₂	-20/+40	[425-850]	30	68	2
F ₁₃	-40/+60	[250-425]	50	48	2
F ₁₄	-40/+60	[250-425]	40	58	2
F ₁₅	-40/+60	[250-425]	30	68	2
F ₁₆	-60/+80	[180-250]	50	48	2
F ₁₇	-60/+80	[180-250]	40	58	2
F ₁₈	-60/+80	[180-250]	30	68	2



Table 1. Mixtures obtained with different-sized particles, polypropylene and coupling agent.

Formulation	ASTM mesh size	Particle size interval (μm)	Composition		
			Bamboo (%)	Polypropylene (%)	Coupling agent (%)
F ₁	-20/+40	[425-850]	50	50	0
F ₂	-20/+40	[425-850]	40	60	0
F ₃	-20/+40	[425-850]	30	70	0
F ₄	-40/+60	[250-425]	50	50	0
F ₅	-40/+60	[250-425]	40	60	0
F ₆	-40/+60	[250-425]	30	70	0
F ₇	-60/+80	[180-250]	50	50	0
F ₈	-60/+80	[180-250]	40	60	0
F ₉	-60/+80	[180-250]	30	70	0
F ₁₀	-20/+40	[425-850]	50	48	2
F ₁₁	-20/+40	[425-850]	40	58	2
F ₁₂	-20/+40	[425-850]	30	68	2
F ₁₃	-40/+60	[250-425]	50	48	2
F ₁₄	-40/+60	[250-425]	40	58	2
F ₁₅	-40/+60	[250-425]	30	68	2
F ₁₆	-60/+80	[180-250]	50	48	2
F ₁₇	-60/+80	[180-250]	40	58	2
F ₁₈	-60/+80	[180-250]	30	68	2

Los materiales compuestos se formaron en una prensa hidráulica con moldes de 21 x 21 cm, a una velocidad de 0.9 cm s⁻¹ y una presión de 40 bares; el curado del material se hizo durante 4 min a una temperatura entre 177 - 195 °C. Estos fueron cortados con láser, a una velocidad de 0.78 mm min⁻¹ y una potencia de 45 w, para obtener las probetas; las dimensiones y el acondicionamiento se realizaron tomando como referencia las normas: ASTM D1037-99 (ASTM, 1999) para contenido de humedad y densidad, y ASTM D570-98 (ASTM, 2010) para los ensayos de absorción e hinchamiento.

La preparación de la materia prima, el secado de las muestras y los ensayos se efectuaron en los laboratorios de Transformación Química y de Secado de la madera, del departamento de Industrias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

El modelo estadístico del diseño factorial fue el siguiente:

$$A_i = A_0 + K_0T + K_1P + K_2C + (K_3)TP + (K_4)TC + (K_5)PC + (K_6)TPC + \epsilon TPC$$

The composite materials were formed in a hydraulic press with 21 x 21 cm molds at a speed of 0.9 cm s⁻¹ and a pressure of 40 bars. The materials were treated during 4 min at a temperature of 177 to 195 °C, and were then cut with laser at a speed of 0.78 mm min⁻¹ and a potency of 45 w in order to obtain the test specimens; the dimensions and conditioning of the latter were based on the norms ASTM D1037-99 (ASTM, 1999) for moisture content and density, and ASTM D570-98 (ASTM, 2010) for absorption and swelling trials.

The raw materials were prepared, the samples were dried and the tests were carried out at the Wood Chemical Transformation and Drying laboratories of the *Universidad Nacional Agraria La Molina* (La Molina National Agrarian University) in Lima, Peru.

The following statistic model was used for the factorial design:

$$A_i = A_0 + K_0T + K_1P + K_2C + (K_3)TP + (K_4)TC + (K_5)PC + (K_6)TPC + \epsilon TPC$$

Donde:

$A0$ = Media general
 $K0T$, $K1P$ y $K2C$ = Efecto del nivel i -ésimo tratamiento respectivamente
 $(K3)TP$, $(K4)TC$ y $(K5)PC$ = Efectos de interacción doble respectivamente
 $(K6)TPC$ = Efecto de interacción triple en la combinación
 $\varepsilon TPCl$ = Efecto del error aleatorio en la combinación
 T = Tamaño de malla ASTM (-20/+40, -40/+60, -60/+80)
 P = Proporción de mezcla bambú/plástico (50/50, 40/60, 30/70)
 C = Concentración de agente acoplante (0, 2)
 l = Número de repeticiones

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 hizo la prueba de comparación de medias de Tukey.

Resultados y Discusiones

Contenido de humedad

En la Figura 1 y en el Cuadro 2, se resumen la variación de los valores promedios de humedad final de todas las muestras de material compuesto con polipropileno. La variación de humedad se muestra directamente proporcional con la cantidad de partículas; las mezclas 50/50 y sin agente acoplante obtuvieron los mayores valores; los menores correspondieron a las probetas con agente acoplante y tamaños de malla -20/+40 y -40/+60. Lo anterior indica que el agente acoplante actúa mejor con esos tamaños. Es importante remarcar que la humedad inicial de todas las partículas, antes del procesamiento, no fue superior a 2 %.

Where:

$A0$ = Overall mean
 $K0T$, $K1P$ and $K2C$ = Effect of the i^{th} level treatment, respectively
 $(K3)TP$, $(K4)TC$ and $(K5)PC$ = Effects of double interaction, respectively
 $(K6)TPC$ = Effect of triple interaction on the combination
 $\varepsilon TPCl$ = Effect of the random error on the combination
 T = (-20/+40, -40/+60, -60/+80) ASTM mesh size
 P = Bamboo/plastic mixing ratio (50/50, 40/60, 30/70)
 C = Coupling agent concentration (0, 2)
 l = Number of repetitions

A variance analysis was applied using the *Statistical Analysis System* software (SAS, 2008). Whenever differences between treatments ($p < 0.05$) were observed, Tukey's mean test was performed.

Results and Discussion

Moisture content

Figure 1 and Table 2 summarize the variation of the mean final moisture values of all the samples of composite material containing polypropylene. Variation in moisture appears as directly proportional to the amount of particles; the 50/50 mixtures and those without a coupling agent had the highest values, while the lowest were for the test specimens with coupling agent and for -20/+40 and -40/+60 mesh sizes. This shows that the coupling agent works best with these two sizes. It should be emphasized that the initial moisture of all the particles, before processing, was not above 2 %.

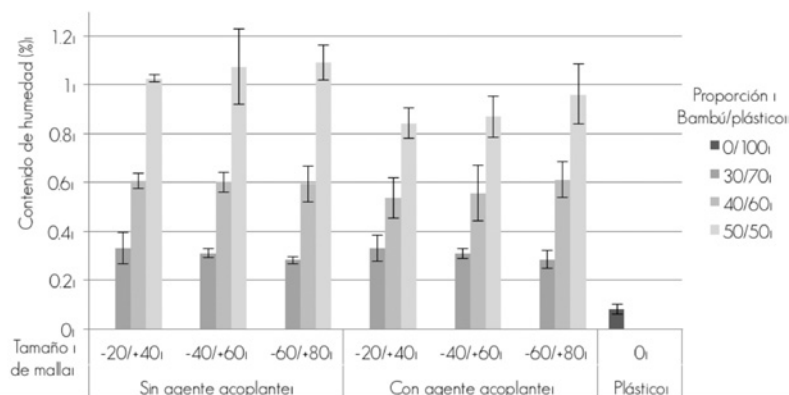


Figura 1. Contenido de humedad de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados.

Figure 1. Moisture content of the bamboo/plastic composite materials made.

Cuadro 2. Media, desviación estándar y variancia de los valores obtenidos para las propiedades físicas evaluadas.

Formulación	Tamaño de malla ASTM	Composición			Contenido de humedad (%)			Densidad (g cm ⁻³)			Absorción (%)			Hinchamiento (%)		
		Bambú (%)	Polipropileno (%)	Agente acoplante (%)	Media	Variancia	Media	Variancia	Media	Variancia	Media	Variancia	Media	Variancia	Media	Variancia
F ₁	-20/+40	50	50	0	1.0 [0.06]	0.0034	0.88 [0.05]	0.0024	28 [4.47]	19.9580	5 [0.78]	0.6000				
F ₂	-20/+40	40	60	0	0.6 [0.08]	0.0070	0.87 [0.02]	0.0006	30 [4.20]	17.6962	4 [0.52]	0.2656				
F ₃	-20/+40	30	70	0	0.3 [0.05]	0.0025	0.83 [0.03]	0.0009	17 [2.75]	7.5579	3 [0.72]	0.5256				
F ₄	-40/+60	50	50	0	1.1 [0.08]	0.0061	0.89 [0.03]	0.0008	29 [3.40]	11.4923	6 [0.67]	0.4531				
F ₅	-40/+60	40	60	0	0.6 [0.11]	0.0112	0.88 [0.06]	0.0036	16 [2.39]	5.7308	4 [0.61]	0.3739				
F ₆	-40/+60	30	70	0	0.3 [0.02]	0.0004	0.87 [0.06]	0.0042	14 [2.55]	6.5015	3 [0.29]	0.0855				
F ₇	-60/+80	50	50	0	1.1 [0.12]	0.0133	0.86 [0.05]	0.0020	25 [3.07]	9.4345	5 [0.23]	0.4810				
F ₈	-60/+80	40	60	0	0.6 [0.07]	0.0056	0.87 [0.06]	0.0030	15 [2.56]	6.5371	4 [0.39]	0.1585				
F ₉	-60/+80	30	70	0	0.3 [0.04]	0.0013	0.95 [0.01]	0.0002	10 [1.55]	2.4171	3 [0.36]	0.1806				
F ₁₀	-20/+40	50	48	2	0.8 [0.02]	0.0002	0.86 [0.07]	0.0049	21 [1.08]	1.1611	5 [0.22]	0.0472				
F ₁₁	-20/+40	40	58	2	0.5 [0.03]	0.0009	0.83 [0.05]	0.0025	23 [4.19]	17.5332	4 [0.39]	0.1558				
F ₁₂	-20/+40	30	68	2	0.3 [0.06]	0.0036	0.89 [0.03]	0.0009	15 [1.58]	2.4880	2 [0.49]	0.2453				
F ₁₃	-40/+60	50	48	2	0.9 [0.16]	0.0242	0.89 [0.06]	0.0042	24 [2.72]	7.3880	4 [0.39]	0.1571				
F ₁₄	-40/+60	40	58	2	0.6 [0.04]	0.0014	0.86 [0.05]	0.0030	19 [2.79]	7.7760	4 [0.52]	0.2759				
F ₁₅	-40/+60	30	68	2	0.3 [0.02]	0.0003	0.87 [0.03]	0.0008	14 [2.10]	4.4319	2 [0.41]	0.1702				
F ₁₆	-60/+80	50	48	2	1.0 [0.07]	0.0044	0.89 [0.04]	0.0019	20 [1.89]	3.5609	5 [0.76]	0.5836				
F ₁₇	-60/+80	40	58	2	0.6 [0.07]	0.0047	0.93 [0.04]	0.0018	15 [1.74]	3.0438	3 [0.38]	0.1463				
F ₁₈	-60/+80	30	68	2	0.3 [0.01]	0.0002	0.90 [0.04]	0.0015	14 [2.12]	4.4978	2 [0.46]	0.2125				

Table 2. Mean, standard deviation and variance of the values obtained for the assessed physical properties.

Formulation	ASTM mesh size	Composition			Moisture content (%)			Density (g cm ⁻³)			Absorption (%)			Swelling (%)		
		Bamboo (%)	Polypropylene (%)	Coupling agent (%)	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance
F ₁	-20/+40	50	50	0	1.0 [0.06]	0.0034	0.88 [0.05]	0.0024	28 [4.47]	19.9580	5 [0.78]	0.6100				
F ₂	-20/+40	40	60	0	0.6 [0.08]	0.0070	0.87 [0.02]	0.0006	30 [4.20]	17.6962	4 [0.52]	0.2656				
F ₃	-20/+40	30	70	0	0.3 [0.05]	0.0025	0.83 [0.03]	0.0009	17 [2.75]	7.5579	3 [0.72]	0.5256				
F ₄	-40/+60	50	50	0	1.1 [0.08]	0.0061	0.89 [0.03]	0.0008	29 [3.40]	11.4923	6 [0.67]	0.4531				
F ₅	-40/+60	40	60	0	0.6 [0.11]	0.0112	0.88 [0.06]	0.0036	16 [2.39]	5.7308	4 [0.61]	0.3739				
F ₆	-40/+60	30	70	0	0.3 [0.02]	0.0004	0.87 [0.06]	0.0042	14 [2.55]	6.5015	3 [0.29]	0.0855				
F ₇	-60/+80	50	50	0	1.1 [0.12]	0.0133	0.86 [0.05]	0.0020	25 [3.07]	9.4345	5 [0.23]	0.4810				
F ₈	-60/+80	40	60	0	0.6 [0.07]	0.0056	0.87 [0.06]	0.0030	15 [2.56]	6.5371	4 [0.39]	0.1585				
F ₉	-60/+80	30	70	0	0.3 [0.04]	0.0018	0.95 [0.01]	0.0002	10 [1.55]	2.4171	3 [0.36]	0.1306				
F ₁₀	-20/+40	50	48	2	0.8 [0.02]	0.0002	0.86 [0.07]	0.0049	21 [1.08]	1.1611	5 [0.22]	0.0472				
F ₁₁	-20/+40	40	58	2	0.5 [0.03]	0.0009	0.83 [0.05]	0.0025	23 [4.19]	17.5332	4 [0.39]	0.1558				
F ₁₂	-20/+40	30	68	2	0.3 [0.06]	0.0036	0.89 [0.03]	0.0009	15 [1.58]	2.4880	2 [0.49]	0.2453				
F ₁₃	-40/+60	50	48	2	0.9 [0.16]	0.0242	0.89 [0.06]	0.0042	24 [2.72]	7.3880	4 [0.39]	0.1571				
F ₁₄	-40/+60	40	58	2	0.6 [0.04]	0.0014	0.86 [0.05]	0.0030	19 [2.79]	7.7760	4 [0.52]	0.2759				
F ₁₅	-40/+60	30	68	2	0.3 [0.02]	0.0003	0.87 [0.03]	0.0008	14 [2.10]	4.4319	2 [0.41]	0.1702				
F ₁₆	-60/+80	50	48	2	1.0 [0.07]	0.0044	0.89 [0.04]	0.0019	20 [1.89]	3.5609	5 [0.76]	0.5836				
F ₁₇	-60/+80	40	58	2	0.6 [0.07]	0.0047	0.93 [0.04]	0.0018	15 [1.74]	3.0438	3 [0.38]	0.1463				
F ₁₈	-60/+80	30	68	2	0.3 [0.01]	0.0002	0.90 [0.04]	0.0015	14 [2.12]	4.4978	2 [0.46]	0.2125				

Cárdenas (2012) señala que una humedad menor a 2 por ciento en el material compuesto es aceptable para evitar problemas en la formación de los mismos; en una investigación realizada por el autor, registra valores de humedad para materiales compuestos entre 0.27 y 0.31 % elaborados por moldeo por inyección. Moya *et al.* (2012) citan valores superiores de humedad con materiales compuestos, entre 3 y 7 %, señalan que puede haber efecto de la naturaleza higroscópica debido a la presencia de grupos hidroxilo y a la baja calidad de encapsulamiento de las partículas, por parte del polímero durante su fabricación. Asimismo, Martínez-López *et al.* (2014) obtuvieron un valor de 4 % para compuestos elaborados por extrusión. En las probetas evaluadas, la humedad de todas las formulaciones está dentro del intervalo indicado por Cárdenas (2012).

El análisis estadístico evidenció que hay diferencias significativas con las proporciones de mezcla y la concentración de agente acoplante ($p < 0.0001$). El análisis, también indicó que no hay diferencias significativas con respecto al tamaño de malla ($p = 0.2302$).

Densidad

La variación de los valores promedio y su desviación estándar se muestra en la Figura 2, además, en el Cuadro 2 se presenta la variancia. Se observa un incremento en la densidad en la mayoría de las combinaciones, al aumentar las partículas en la mezcla (el valor del polipropileno fue 0.84 g cm^{-3}), la proporción 30/70, sin agente acoplante y con la partícula más pequeña (malla -60/+80) registró la densidad más alta: 0.95 g cm^{-3} . Por el contrario, con la partícula más grande (malla -20/+40), para la misma proporción 30/70, sin agente acoplante, se obtuvo la menor densidad 0.83 g cm^{-3} .

According to Cárdenas (2012), a moisture content below 2 % in composite materials is acceptable to avoid problems in their formation. Research carried out by this author registered moisture values of 0.27 to 0.31 % for the composite materials made by injection molding. Moya *et al.* (2012) cite higher moisture values--of 3 and 7 %--for composite materials; they point out that the hygroscopic nature may have an effect due to the presence of hydroxyl groups and to the low quality of the particle encapsulation by the polymer during the manufacture. Furthermore, Martínez-López *et al.* (2014) obtained a value of 4 % for composites produced by extrusion. In the assessed test specimens, the moisture content of all formulations is within the interval registered by Cárdenas (2012).

The statistical analysis evidenced significant differences ($p < 0.0001$) in the mixing ratios and coupling agent concentrations. The analysis also showed the absence of significant differences ($p = 0.2302$) in relation to mesh size.

Density

Figure 2 shows the variation of means and their standard deviation; likewise, Table 2 shows the variance. An increase in the density of most combinations can be observed to occur with the increase of the number of particles in the mixture (the value for polypropylene was 0.84 g cm^{-3}), the mixing ratio was 30/70; no coupling agent was used, and the smallest particle (-60/+80 mesh) had the highest density (0.95 g cm^{-3}). Conversely, the mixture with the largest mesh size (-20/+40) for the same 30/70 ratio without a coupling agent had the lowest density (0.83 g cm^{-3}).

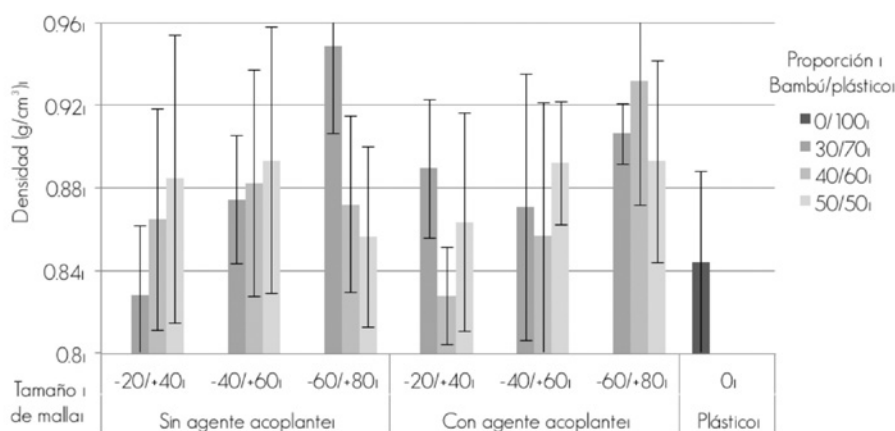


Figura 2. Densidad de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados.
Figure 2. Density of the bamboo/plastic composite materials.

Moya *et al.* (2012) consignan que la densidad es directamente proporcional al contenido de partículas, y que al ser adicionadas para la formación de los materiales compuestos, se supera el valor de densidad del plástico. Clemons *et al.* (2013) enfatizan la importancia de tener en cuenta la densidad, debido a que hay aplicaciones en las que el peso es importante, lo cual es de interés para la industria automotriz y empaque.

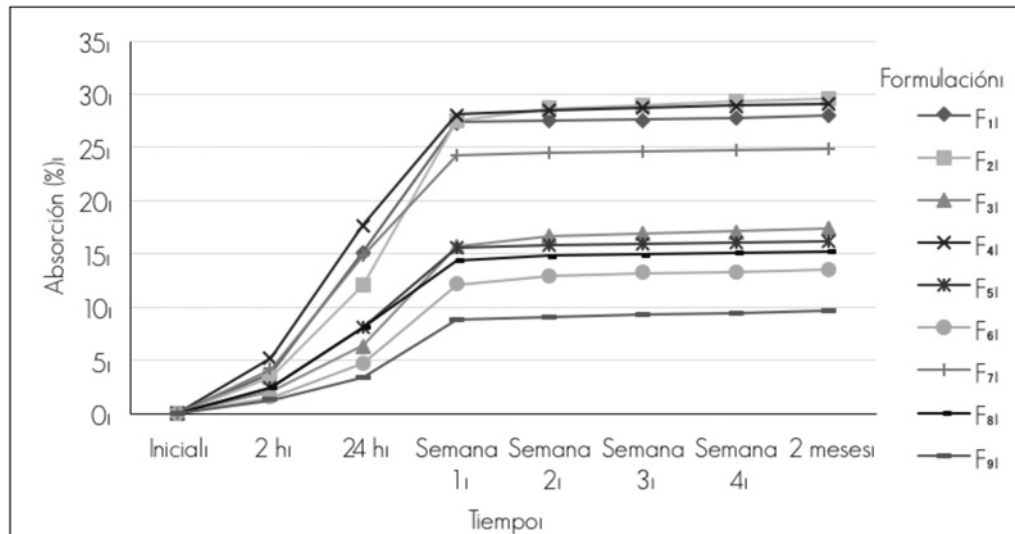
En una investigación realizada por Moya *et al.* (2012), obtuvieron en una mezcla con 40 por ciento de partículas, una densidad de 1.05 g cm^{-3} , valor superior al valor del plástico 0.94 g cm^{-3} . Cárdenas (2012) documenta cifras entre 1.06 a 1.1 g cm^{-3} , en materiales compuestos con 50 por ciento de partículas, supera el del plástico 0.9 g cm^{-3} . En las probetas evaluadas el mayor valor fue de 0.95 g cm^{-3} , que difiere de lo indicado por Moya *et al.* (2012). Al respecto, Rosa *et al.* (2009) mencionan que la baja densidad de los compuestos se puede deber a que la matriz no ha embebido completamente a las partículas; Upadhyaya *et al.* (2012) indican que los bajos valores responden a la formación de los espacios vacíos en los materiales compuestos.

El análisis estadístico evidenció que hay diferencias significativas con respecto al tamaño de malla ($p = 0.0009$) y su interacción con la proporción de mezcla ($p=0.0431$) y concentración de agente acoplante ($p = 0.0337$).

According to Moya *et al.* (2012), density is directly proportional to the particle content, and when these are added to form the composite materials, a higher density than that of plastic is attained. Clemons *et al.* (2013) emphasize the importance of taking density into account because there are applications for which weight is important; these are of interest for the automotive and packing industry.

A research carried out by Moya *et al.* (2012) documents a mixture with 40% particles, a density of 1.05 g cm^{-3} , a value above that of plastic (0.94 g cm^{-3}). For composite materials made with 50 percent of particles, Cárdenas (2012) quotes figures ranging between 1.06 and 1.1 g cm^{-3} , representing a higher density than that of plastic (0.9 g cm^{-3}). In the assessed test specimens, the highest value was 0.95 g cm^{-3} ; this differs from the value registered by Moya *et al.* (2012). In this regard, according to Rosa *et al.* (2009), the low density of the composites may be due to the fact that the matrix has not totally saturated the particles; Upadhyaya *et al.* (2012) point out that the low values are due to the formation of void spaces in the composite materials.

The statistical analysis evidenced that there are significant differences ($p = 0.0009$) in mesh sizes and in their interaction with the mixing ratio ($p = 0.0431$) and the coupling agent concentrations ($p = 0.0337$).



F₁, F₂ y F₃ = Materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₄, F₅ y F₆ = Materiales compuestos con tamaño de malla -40/+60 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₇, F₈ y F₉ = Materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente. F₁, F₂ and F₃ = Composite materials with a -20/+40 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₄, F₅ and F₆ = Composite materials with a -40/+60 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₇, F₈ and F₉ = Composite materials with a -60/+80 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively.

Figura 3. Evolución de la absorción de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados sin agente acoplante.

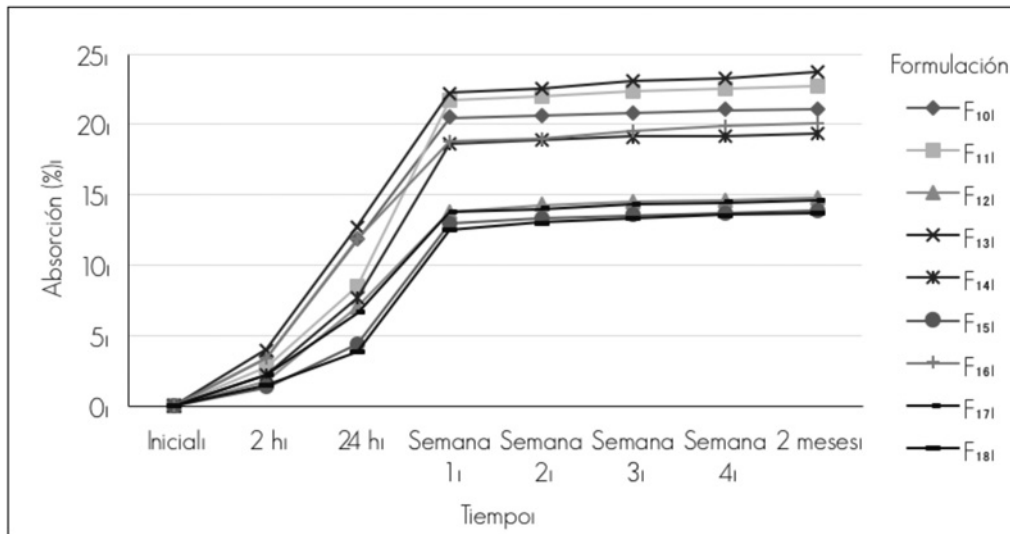
Figure 3. Evolution of the absorption of bamboo/plastic composite materials made without a coupling agent.

Absorción

En la Figura 3 se exhibe la absorción para los materiales compuestos sin agente acoplante y en la Figura 4, la absorción para los compuestos con agente acoplante durante 2 meses de inmersión en agua. Cada marcador representa el valor promedio de las probetas. En las figuras se observa, inicialmente, una variación en la absorción de manera lineal mientras se incrementa el tiempo de inmersión.

Absorption

Figure 3 shows the absorption for the composite materials without a coupling agent, and Figure 4 shows the absorption of composites with coupling agent during 2 months of immersion in water. Each marker represents the average value of the test specimens. Initially, the figures show a linear variation in the absorption as the immersion time increases.



F₁₀₁, F₁₁₁ y F₁₂₁ = Materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₁₃₁, F₁₄₁ y F₁₅₁ = Materiales compuestos con tamaño de malla -40/+60 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₁₆₁, F₁₇₁ y F₁₈₁ = Materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente. F₁₀₁, F₁₁₁ and F₁₂₁ = Composite materials with a -20/+40 mesh sizes and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₁₃₁, F₁₄₁ and F₁₅₁ = Composite materials with a -40/+60 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively. F₁₆₁, F₁₇₁ and F₁₈₁ = Composite materials with a -60/+80 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively.

Figure 4. Evolution of the absorption of bamboo/plastic composite materials made with a coupling agent.
 Figura 4. Evolución de la absorción de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados con agente acoplante.

En la Figura 5 se presenta, la variación de los valores promedio de absorción y su desviación estándar con 2 meses de inmersión; asimismo en el Cuadro 2 se muestra la variancia. La absorción es directamente proporcional con la cantidad de partículas, pero menos notoria con el tamaño de malla. La proporción de mezcla 40/60, sin agente acoplante con tamaño de malla -20/+40 fue la que registró el mayor valor de absorción, 30 %. Además, se observa que el agente acoplante tiene un efecto favorable, ya que reduce la absorción de agua, y alcanza un valor de 24 % con la proporción 50/50 con tamaño de malla -40/+60, pero con la proporción 30/70, tamaño de malla -60/+80, fue de 14 %.

Idrus *et al.* (2011), Upadhyaya *et al.* (2012), Lisperguer *et al.* (2013) y Bahari y Krause (2016) indican que la absorción de agua es uno de los principales problemas que tienen los materiales compuestos que contienen mayor cantidad de partículas en su composición. Al respecto, Takatani *et al.* (2008)

Figure 5 shows the variation of the mean absorption values and their standard deviation with an immersion period of 2 months; likewise, Table 2 shows the variance. Absorption is directly proportional to the number of particles; however, its relation to mesh size is less obvious. The 40/60 mixing ratio with a -20/+40 mesh size and without a coupling agent had the highest value for absorption (30 %). Besides, the coupling agent has a favorable effect, as it reduces water absorption and reaches a value of 24 % with the 50/50 ratio and a -40/+60 mesh size; however, with the 30/70 ratio and the -60/+80 mesh size, the absorption rate was 14 %.

Idrus *et al.* (2011), Upadhyaya *et al.* (2012), Lisperguer *et al.* (2013) and Bahari and Krause (2016) indicate that water absorption is one of the main problems of composite materials containing a larger number of particles in their composition. In this respect, Takatani *et al.* (2008) state that absorption must not reach a value above 10 %; the values registered for the assessed test

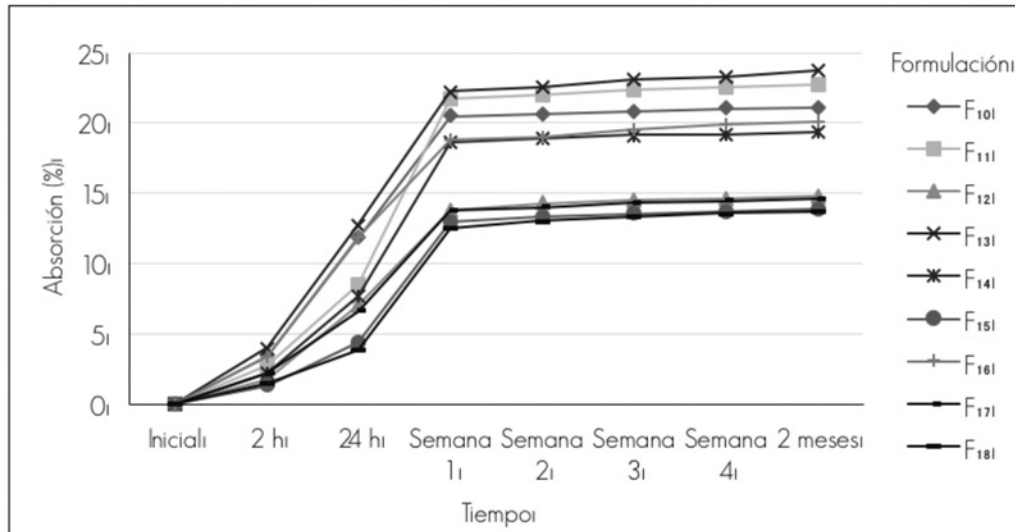


Figura 5. Absorción de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados, sumergidos a los 2 meses en agua.

Figure 5. Absorption of the bamboo/plastic composite materials submerged in water for two months.

señalan que la absorción no debe superar el valor de 10 %, los registros en las probetas evaluadas superan la absorción mínima indicada por el autor; estos resultados se explican por la inadecuada mezcla de los materiales, que provoca la formación de espacios vacíos producidos entre las partículas y la matriz (Moya *et al.*, 2012), con ello se intensifica la penetración del agua en la fibra (Rosa *et al.*, 2009; Idrus *et al.*, 2011); además, la presencia de los grupos hidroxilos en las fibras influyen en la capacidad de absorber humedad (Idrus *et al.*, 2012; Bahari and Krause, 2016).

Con respecto al efecto del agente acoplante, Reddy *et al.* (2010) citan que este contribuye a incrementar la unión interfacial entre la parte hidrofílica de la fibra y la parte hidrofóbica del polipropileno, lo cual reduce la naturaleza hidrofílica del compuesto; Lisperguer *et al.* (2013) indican que el incremento de la adhesión interfacial con la presencia de MAPP no es determinante para la absorción. Como se observa en la Figura 5, los materiales compuestos con agente acoplante presentan una disminución en la absorción, sin embargo, los valores son superiores a lo señalado por Takatani *et al.* (2008), esto se puede deber a lo indicado anteriormente.

El análisis estadístico indica que hay diferencias significativas en todas sus variables ($p < 0.0001$).

En la Figura 6 se muestran los espacios vacíos en los materiales compuestos, debido, probablemente, a la baja calidad de encapsulamiento de las partículas por parte de la matriz.

specimens exceed the minimum absorption indicated by the author; these results are due to the inadequate mixture of the materials, which causes the formation of void spaces between the particles and the matrix (Moya *et al.*, 2012); this intensifies the penetration of water in the fibers (Rosa *et al.*, 2009; Idrus *et al.*, 2011). In addition, the presence of hydroxyl groups in the fibers impacts their ability to absorb moisture (Idrus *et al.*, 2012; Bahari and Krause, 2016).

As for the effect of the coupling agent, Reddy *et al.* (2010) note that it contributes to increase the interfacial union between the hydrophilic part of the fiber and the hydrophobic part of polypropylene, which reduces the hydrophilic nature of the composite. Lisperguer *et al.* (2013) state that the increase in the interfacial adherence occurring with the presence of MAPP does not determine the absorption. As it may be observed in Figure 5, composite materials with coupling agent have reduced absorption. However, the values are above those cited by Takatani *et al.* (2008); this may be due to the above cause.

The statistical analysis indicates that there are significant differences ($p < 0.0001$) in all its variables.

Figure 6 shows the void spaces in the composite materials probably because of the low quality of the encapsulation of the particles by the matrix.



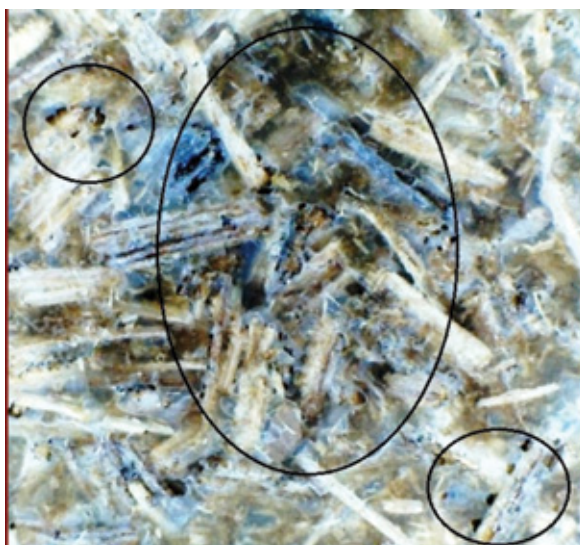


Figura 6. Imágenes de espacios vacíos (ubicados dentro de los círculos) en la superficie del material compuesto bambú/plástico obtenido con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50.

Figure 6. Images of void spaces (circled) in the surface of the bamboo/plastic composite obtained with a -20/+40 mesh size and a 50/50 mixing ratio.

En la Figura 7 se observa la coloración del agua después de 2 meses de sumergidas las probetas; esta se debe, probablemente, a la existencia de extractivos cromógenos los que, además, pueden haber interferido en la compatibilidad entre las fibras con la matriz de polipropileno.

Figure 7 shows the coloring of water after the test specimens were submerged for 2 months; this may be due to the presence of chromogenic extractives that may also have interfered with the compatibility between the fibers and the polypropylene matrix.

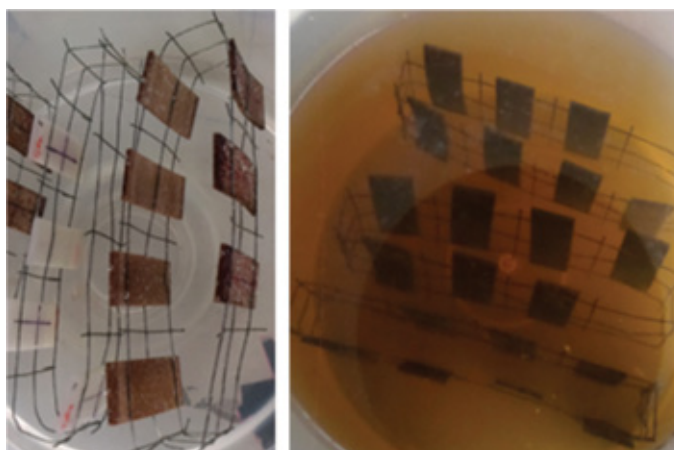


Figura 7. Coloración del agua antes (izquierda) y después de 2 meses (derecha) de sumergidos los materiales compuestos bambú/plástico.

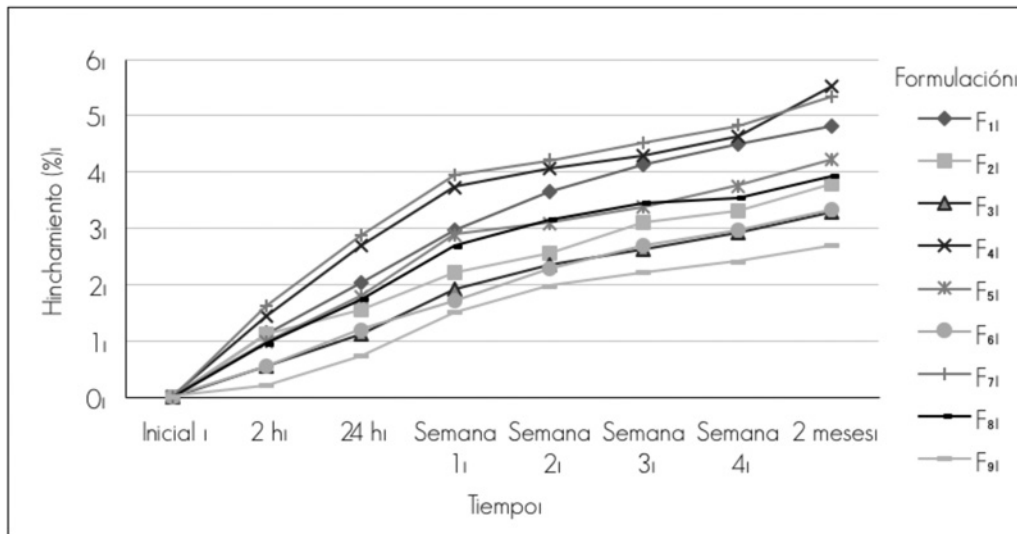
Figure 7. Coloring of the water before (left) and after (right) the materials were submerged for two months.

Hinchamiento

En la Figura 8, se muestra el hinchamiento para los materiales compuestos sin aditivo, y en la Figura 9, el hinchamiento para los compuestos con aditivo durante 2 meses de inmersión en agua, cada marcador representa el valor promedio de las probetas. En el primer mes se obtuvo el aumento de espesor más grande.

Swelling

Figure 8 shows the swelling of the composite without an additive, and Figure 9, the swelling for the composite material with additive after 2 months of immersion in water; each marker represents the mean value of the test specimens. The largest increase in thickness occurred during the first month.



F₁, F₂ y F₃ = Materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₄, F₅ y F₆ = Materiales compuestos con tamaño de malla -40/+60 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₇, F₈ y F₉ = Materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente. F₁, F₂ and F₃ = Composite materials with a -20/+40 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₄, F₅ and F₆ = Composite materials with a -40/+60 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₇, F₈ and F₉ = Composite materials with a -60/+80 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively.

Figura 8. Evolución del hinchamiento de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados sin aditivo.

Figure 8. Evolution of the swelling of bamboo/plastic composite materials made without an additive.

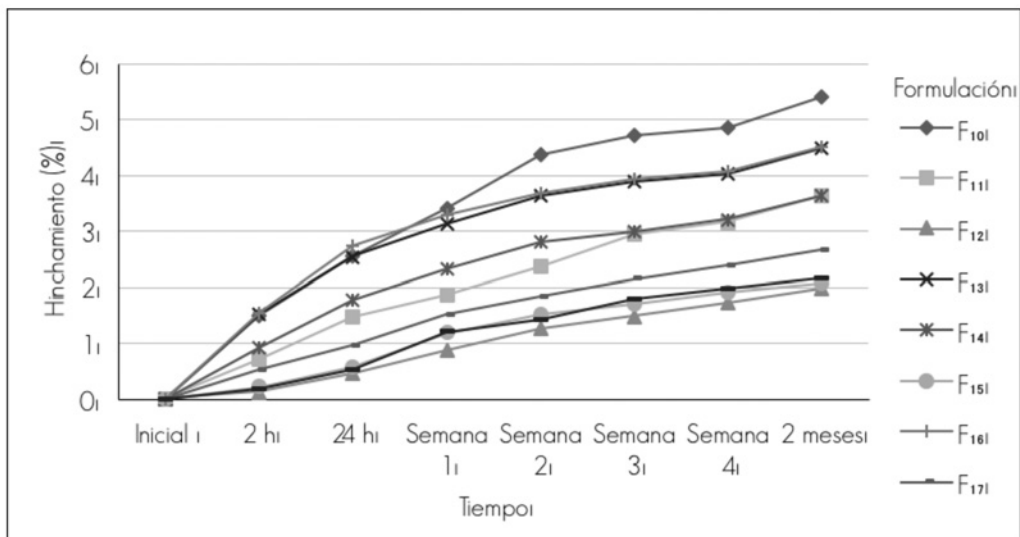
En la Figura 10, se presenta la variación de los valores promedio de hinchamiento y su desviación estándar con 2 meses de inmersión; así mismo, en el Cuadro 2, la variancia. Se observa que el hinchamiento tiene una variación directa con la proporción de mezcla, al igual que la absorción. Cuando se emplea menor proporción de partículas de bambú en la mezcla, el hinchamiento es menor; esta variación no es tan notoria con el tamaño de partículas. En la Figura 10 la proporción de mezcla 50/50, sin agente acoplante con tamaño de malla -40/+60 fue la que tuvo el mayor valor de hinchamiento, 6 %.

Con respecto a la presencia de agente acoplante, su uso favorece la reducción del hinchamiento en la mayoría de las formulaciones; la proporción de mezcla 50/50, con tamaño de malla -20/+40 obtuvo un valor superior a 5 %, pero con la proporción 30/70, y el mismo tamaño de malla, fue de 2 %.

The variation of the mean swelling values and their standard deviation after 2 months of immersion are shown in Figure 10, and the variance is shown in Table 2. Swelling, as well as absorption, has a direct variation in relation to the mixing ratio. A lower proportion of bamboo particles in the mixture results in less swelling; the relationship between this variation and particle size is not so obvious. The 50/50 mixing ratio without a coupling agent and with a -40/+60 mesh size had the highest value for swelling (6 %) (Figure 10).

The use of a coupling agent favors the reduction of the swelling in most formulations; the 50/50 ratio with a -20/+40 mesh size registered a value of over 5 %; however, with the 30/70 ratio and the same mesh size, the value for swelling was a mere 2 %.

According to Rowell (2006), Idrus *et al.* (2011), Upadhyaya *et al.* (2012) and Lisperguer *et al.* (2013), swelling is directly proportional to the percentage of particles in the composite



F₁₀, F₁₁ y F₁₂ = Materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₁₃, F₁₄ y F₁₅ = Materiales compuestos con tamaño de malla -40/+60 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70; F₁₆, F₁₇ y F₁₈ = Materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80 y proporción de mezcla 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente. F₁₀, F₁₁ and F₁₂ = Composite materials with a -20/+40 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₁₃, F₁₄ and F₁₅ = Composite materials with a -40/+60 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios; F₁₆, F₁₇ and F₁₈ = Composite materials with a -60/+80 mesh size and 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, respectively.

Figura 9. Evolución del hinchamiento de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados con aditivo.
 Figure 9. Evolution of the swelling of bamboo/plastic composite materials made with an additive.

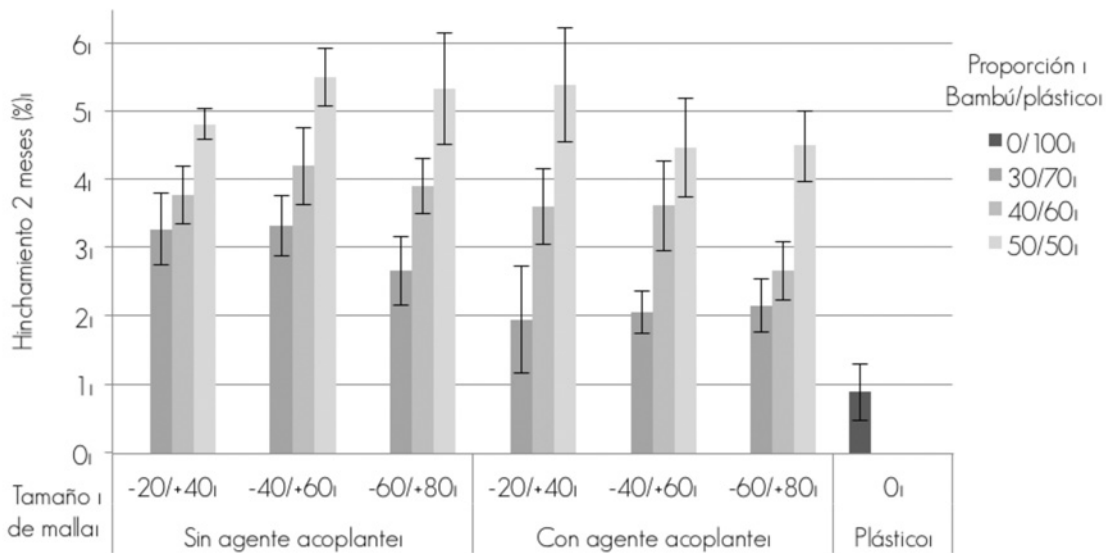


Figura 10. Absorción de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados, sumergidos a los 2 meses en agua.
 Figure 10. Absorption of the bamboo/plastic composite materials submerged in water during two months.

Según Rowell (2006), Idrus *et al.* (2011), Upadhyaya *et al.* (2012) y Lisperguer *et al.* (2013), el hinchamiento es directamente proporcional con el porcentaje de partículas en el material compuesto; Takatani *et al.* (2008) señalan que no debe superar el valor de 12 %. En un estudio de Lisperguer *et al.* (2013), se obtuvieron valores de hinchamiento que variaron de 8 y 10 %; Martínez-López *et al.* (2014) y Moya *et al.* (2012) documentan resultados de 0.06 a 0.3 %, por el método de extrusión; mientras que Cárdenas (2012) registra valores cercanos a 8 % para compuestos con 50 % de partículas. Los porcentajes en las probetas evaluadas fueron de 2 a 6 %, que coinciden con el valor citado por Takatani *et al.* (2008) y Lisperguer *et al.* (2013).

En la Figura 10 se observa que los registros en las probetas con agente acoplante son menores; sin embargo, Lisperguer *et al.* (2013) indican que el incremento de la adhesión interfacial con la presencia de MAPP no afecta el hinchamiento.

El análisis estadístico mostró que hay diferencias significativas en todas sus variables ($p < 0.0001$).

Conclusiones

Se puede elaborar compuestos con base en partículas de bambú, polipropileno y agente acoplante.

Los materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80, 30 por ciento de contenido de partícula de bambú, con agente acoplante tienen valores más altos para las propiedades físicas evaluadas. Los materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40, 50 por ciento de contenido de partícula de bambú y sin agente acoplante presentaron los menores valores.

El incremento de partículas de bambú en el material compuesto origina un incremento en las propiedades de humedad, densidad, absorción e hinchamiento.

Los materiales compuestos con agente acoplante presentan menores valores de contenido de humedad, absorción e hinchamiento, lo cual evidencia un posible efecto inhibitorio en la absorción de humedad.

Agradecimientos

Al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad, INNOVATE PERÚ, por apoyar y financiar parte de la investigación con el proyecto 414-PNICP-PIAP-2014; a la Universidad Nacional Agraria La Molina, especialmente a la Facultad Ciencias Forestales. Al Ing. Carlos Rojas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

material; Takatani *et al.* (2008) point out that it should not exceed the value of 12 %. In a study by Lisperguer *et al.* (2013), swelling values ranging between 8 and 10 % were obtained; Martínez-López *et al.* (2014) and Moya *et al.* (2012) register values of 0.06 to 0.3 %, using the extrusion method, while Cárdenas (2012) registers values of approximately 8 % for composites with 50 % particles. The percentages in the assessed test specimens were 2 to 6 %; these values agree with those cited by Takatani *et al.* (2008) and Lisperguer *et al.* (2013).

Figure 10 shows lower values for test specimens with a coupling agent; however, according to Lisperguer *et al.* (2013), the increase in interfacial adherence with the presence of MAPP does not affect the swelling.

The statistical analysis showed significant differences ($p < 0.0001$) for all its variables.

Conclusions

Composites can be made from bamboo particles, polypropylene and a coupling agent.

The highest values for the assessed physical properties were for composite materials with a -60/+80 mesh size, a content of bamboo particles of 30 % and a coupling agent. Composites made with a -20/+40 mesh, a bamboo particle content of 50 % and no coupling agent had the lowest values.

Larger numbers of bamboo particles in the composite resulted in increased moisture, density, absorption and swelling.

The composites made with a coupling agent had lower values for moisture content, absorption and swelling; this evidences a potential inhibiting effect in the absorption of moisture.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the *Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad*, INNOVATE PERÚ for its support and for funding part of the research under project 414-PNICP-PIAP-2014; to the *Universidad Nacional Agraria La Molina*--particularly to its Faculty of Forestry--and to Carlos Rojas, Eng.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Karen Catherine Lázaro León: raw material processing, assessment of properties, data analysis and writing of the paper; Héctor E. González Mora, Aldo J. Cárdenas Oscanoa and Javier Gago Campusano: review of the manuscript.

End of the English version

Contribución por autor

Karen Catherine Lázaro León: procesamiento de la materia prima, evaluación de las propiedades y análisis de datos, redacción del escrito; Héctor E. González Mora, Aldo J. Cárdenas Oscanoa, Javier Gago Campusano: revisión del manuscrito.



Referencias

- Abdul, K., H. P. S., I. U. H. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan and Y. S. Hadi. 2012. Bamboo fiber reinforced biocomposites: A review. *Materials and Design*. 42: 353-368.
- 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. 32 p.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2010. Standard Test Method for Water Absorption of Plastic. ASTM D 570 - 98 (2010) e. West Conshohocken, PA, USA. 32 p.
- Bahari, S. and A. Krause. 2016. Utilizing Malaysian bamboo for use in thermoplastic composites. *Journal of Cleaner Production* 110: 16-24.
- Bhandari, N., S. Thomas, Ch. Das and R. Adhikari. 2012. Analysis of morphological and mechanical behaviours of bamboo flour reinforced polypropylene composites. *Nepal Journal of Science and Technology* 13 (1): 95 - 100.
- Brien, M. 2013. The plastic industry: economic overview. In: *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*. Second edition. Elsevier Ltd. Oxford, United Kingdom. pp. 31- 131.
- 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.
- Clemons, C., R. Rowell, D. Plackett and B. Segerholm. 2013. Wood/nonwood thermoplastic composites. In: Rowell, Roger, ed. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Second edition. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. pp. 473 - 508.
- Crespell, P. and M. Vidal. 2008. Market and Technology Trends and Challenges for Wood Plastic Composites. In: *North America. Proceedings of the 51 st International Convention of Society of Wood Science and Technology*. 15 de enero de 2015. Concepción, Chile. 4 p.
- Cuéllar, A. y I. Muñoz. 2009. Fibra de Guadua como refuerzo de matrices poliméricas. *Revista Dyna* 77(162): 137 - 142.
- Faruk, O., A. K. Bledzki, H. P. Fink and M. Sain. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science* 37:1552 - 1596.
- González, H. 2005. Elaboración de una propuesta para la elaboración y la transformación del bambú en el ámbito del PRODAPP (Puerto Inca - Oxapampa). Informe Final. Lima, Perú. 95 p.
- Idrus, M. S., Hamdan, M. Rahman and M. Islam. 2011. Treated Tropical Wood Sawdust-Polypropylene Polymer Composite: Mechanical and Morphological Study. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* 2: 435 - 444.
- Lisperguer, J., X. Bustos, Y. Saravia, C. Escobar y H. Venegas. 2013. Efecto de las Características de Harina de Madera en las Propiedades físico-mecánicas y térmicas de Polipropileno Reciclado. *Revista Maderas. Ciencia y tecnología* 15(3): 321 - 336.
- Martínez-López, Y., R. R. Fernández-Concepción, D. A. Álvarez-Lazo, M. García-González y E. Martínez-Rodríguez. 2014. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros de madera plástica producidos en Cuba respecto a los tableros convencionales. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 20 (3): 227 - 236.
- Moya, C., H. Poblete y L. Valenzuela. 2012. Propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno reciclado y harinas de corteza de madera de *Pinus radiata* fabricados mediante moldeo por inyección. *Maderas. Ciencia y tecnología* 14 (1): 13 - 29.
- Rosa, S., E. Santos, C. Ferreira y S. Nachtigall. 2009. Studies on the Properties of Rice-Hulk-Filled-PP Composites- Effect of Maleated PP. *Materials Research* 12 (3): 333 - 338.
- Reddy, C., A. Sardashi y L. Simon. 2010. Preparation and characterization of polypropylene-wheat straw-clay composites. *Composites Science and Technology* 70: 1674 - 1680.
- Rowell, R. 2006. Advances and Challenges of Wood Polymer Composites. In: *Proceedings of the 8th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*. 15 de enero de 2015. Kuala Lumpur, Malasia. pp. 2- 11.
- Statistical Analysis System (SAS). 2008. The SAS System for Windows version 9.2. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. n/p.
- Takatani, M., A. Ishikawa, K. Sakamoto, K. Ikeda and T. Okamoto. 2008. The properties of Bamboo Flour-Plastic Composites with High Filler Content Formulations. *Journal of The Adhesion Society of Japan* 44(6): 214 - 219.
- Venkateshwaran, N., A. Elayaperumal and G. Sathiya. 2012. Prediction of tensile properties of hybrid-natural fiber composites. *Composites Part B: Engineering* 43(2): 793 - 796.
- Upadhyaya, P., M. Garg, V. Kumar and A. Nema. 2012. The effect of water absorption on mechanical properties of Wood flour/wheat husk polypropylene hybrid composites. *Materials Sciences and Applications* 3: 317 - 325.

