

Extrusion of foamed wood-plastic composites. Part I: Physical and morphological characterization

Extrusión de compuestos madera plástico espumados.
Parte I: Caracterización física y morfológica

Pablo A. Moreno^{1*}; Aldo Ballerini²; William Gacitúa²; Denis Rodrigue³

¹Universidad de Los Andes, Conjunto Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Av. Chorro de Milla, Campus Universitario Forestal. Mérida-Venezuela.

*Corresponding author: pmoreno@ula.ve, tel.: +58(274)-2401664.

²Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Madera. Av. Casilla 5-C, Collao 1202. Región del Bío-Bío. Concepción, Chile.

³Université Laval, Faculté des Science et de Génie, Génie Chimique.

Pavillon Adrien-Pouliot 1065, Avenue de la Médecine Local 3546. Québec, Canada.

Abstract

Introduction: The use of wood-plastic composites (WPCs) has been limited due to their low impact strength and high density compared to natural wood.

Objective: To characterize the cellular morphology and density of WPCs prepared with virgin and recycled polyethylene, and *Pinus radiata* wood.

Materials and methods: The polymer and the foamed WPCs were manufactured by an extrusion process. The virgin and recycled high-density polyethylene was mixed separately with *P. radiata* wood. The plastic/wood ratios were 80/20 and 70/30, with an endothermic foaming agent (Hydrocerol 1700 at 1 and 3 %), a coupling agent (Licocene 4351), and a lubricating agent (Licolub H12) added.

Results and discussion: The density of virgin polymer, with 1 and 3 % foaming agent, was reduced by 39 and 20 %, respectively, but in the recycled polymer the reduction was 18 and 23 %, respectively. In the foamed WPCs, the reduction was less than 10 %. The foamed composites had smaller bubble diameter and higher cell density. The void fraction was higher in the virgin polymer at 3 % foaming.

Conclusion: The use of a foaming agent gave better physical properties to the composites.

Keywords: High-density polyethylene, cellular morphology, Hydrocerol, maleated polyethylene.

Resumen

Introducción: El uso de los compuestos madera plástico (WPC, por sus siglas en inglés) ha sido limitado, debido a su baja resistencia al impacto y alta densidad en comparación con la madera natural.

Objetivo: Caracterizar la morfología celular y la densidad del WPC preparado con polietileno virgen y reciclado, y madera de *Pinus radiata*.

Materiales y métodos: El polímero y los WPC espumados se fabricaron por un proceso de extrusión. El polietileno de alta densidad virgen y reciclado se mezcló de forma separada con madera de *P. radiata*. Las proporciones plástico/madera fueron 80/20 y 70/30, agente espumante endotérmico Hydrocerol 1700 al 1 y 3 %, agente acoplante Licocene 4351, y Licolub H12 como agente lubricante.

Resultados y discusión: La densidad del polímero virgen, con espumante al 1 y 3 %, se redujo 39 y 20 %, respectivamente; en el polímero reciclado disminuyó 18 y 23 %, respectivamente. En los WPC espumados, la reducción fue menor de 10 %. Los compuestos espumados tuvieron menor diámetro de las burbujas y mayor densidad celular. La fracción de vacío fue mayor en el polímero virgen al 3 % de espumante.

Conclusión: El uso de espumante otorgó mejores propiedades físicas a los compuestos.

Palabras clave: Polietileno alta densidad, morfología celular, Hydrocerol, polietileno maleatado.

Introduction

Wood-plastic composites, known as WPCs, are essentially made up of wood fillers (flour or fibers) and a thermoplastic matrix. These materials have gained acceptance in applications such as decking, gardening, window frames, marine installations, railways, building construction and industrial applications (Gosselin, Rodrigue, & Riedl, 2006; Smith & Wolcott, 2006). In general, WPCs have higher durability and lower maintenance costs, better dimensional stability, greater resistance to moisture and biological degradation, and lower costs than composites made from other fibers.

The use of WPCs has been limited due to their low impact strength and high density compared to natural wood. The high density of WPCs has become a problem when competing with other products such as solid wood, plastic and aluminum, increasing the cost of manufacturing and, consequently, the final product (Kim & Pal, 2010; Klyosov, 2007; Pickering, 2008).

Today the industrial sector devoted to producing composite materials based on wood and plastic is using new treatments and products to address the existing problems in the composite. Such treatments, aimed at reducing the cost of materials, are related to the generation of a low-density foamed structure, improving the specific mechanical properties (impact and tensile strength), as well as the nailing and screwing properties of the composite (Gosselin, Rodrigue, & Riedl, 2006).

In recent years, studies conducted with different polyolefins in virgin condition, reinforced with wood fiber, have been published (Adhikary, Pang, & Staiger, 2008; Ashori & Nourbakhsh, 2008; Ashori & Nourbakhsh, 2009; Moreno, Rodrigue, Giroux, Ballerini, & Gacitúa, 2013). There is information available regarding the foaming of recycled thermoplastics reinforced with wood byproducts through injection molding and compression processes. However, to our knowledge, with the exception of Moreno et al. (2013), no research has been conducted to foam recycled polymers by an extrusion process and to perform a well-detailed morphological and physical characterization when the polymer is of post-consumer origin. In this context, the objective of this study was to characterize the cellular morphology and density of the foamed wood-plastic composite.

Materials and methods

The virgin high-density polyethylene thermoplastic polymer (FI0750) was obtained from Saudi Basic Industries Corporation, Kingdom of Saudi Arabia. The recycled plastic, with three extrusion cycles, consisted of pellets made from material rejected by a plastic

Introducción

Los compuestos madera plástico, conocidos como WPC (*wood-plastic composites*), están esencialmente conformados de rellenos de madera (partículas o fibras) y una matriz termoplástica. Estos materiales han ganado aceptación en aplicaciones como pisos, jardinerías, perfiles para ventanas, instalaciones marinas, líneas férreas, así como en construcciones de edificios y aplicaciones industriales (Gosselin, Rodrigue, & Riedl, 2006; Smith & Wolcott, 2006). En general, los WPC tienen mayor durabilidad y menor costo de mantenimiento, mejor estabilidad dimensional, mayor resistencia a la humedad y degradación biológica, y menor costo que los compuestos fabricados con otras fibras.

El uso de los WPC ha sido limitado, debido a su baja resistencia al impacto y alta densidad en comparación con la madera natural. La alta densidad del WPC se ha transformado en un problema al competir con otros productos como la madera sólida, el plástico y el aluminio, aumentando el costo de fabricación y, por consiguiente, el del producto final (Kim & Pal, 2010; Klyosov, 2007; Pickering, 2008).

Hoy en día, el sector industrial de materiales compuestos a base de madera y plástico está utilizando nuevos tratamientos y productos que permiten abordar las problemáticas existentes en el compuesto. Dichos tratamientos, tendientes a la reducción del costo de materiales, están relacionados con la generación de una estructura espumada de baja densidad, mejorando las propiedades mecánicas específicas (resistencia al impacto y a la tracción) y las propiedades de clavado y atornillado del compuesto (Gosselin, Rodrigue, & Riedl, 2006).

En los últimos años se han publicado trabajos realizados con diversas poliolefinas en condición virgen, reforzados con fibra de madera (Adhikary, Pang, & Staiger, 2008; Ashori & Nourbakhsh, 2008; Ashori & Nourbakhsh, 2009; Moreno, Rodrigue, Giroux, Ballerini, & Gacitúa, 2013). Existe información disponible respecto a la espumación de termoplásticos reciclados reforzados con subproductos de la madera a través de procesos de moldeo por inyección y compresión. No obstante, a nuestro conocimiento, con la excepción de Moreno et al. (2013), en ninguna investigación se ha considerado espumar polímeros reciclados por un proceso de extrusión y realizar una caracterización morfológica y física bien detallada, cuando el polímero es de origen postconsumo. En tal contexto, el objetivo de este estudio fue caracterizar la morfología celular y la densidad del compuesto madera plástico espumado.

Materiales y métodos

El polímero termoplástico polietileno de alta densidad virgen (FI0750) fue obtenido de Saudi Basic Industries

bag factory operated by the Chilean company *Plásticos Bessalle Limitada*.

The polymers were subjected to differential scanning calorimetry (DSC) analysis based on three replicates in a temperature range between 20 and 300 °C and at a heating rate of 10 °C·min⁻¹. The area on the curve of each endotherm and the enthalpy of fusion were calculated.

The virgin and recycled polymer had a density of 905 and 917 kg·m⁻³ with a melt flow rate of 7.5 and 13.81 g in a period of 10 min, respectively, according to the condition established by ASTM D 1238-04 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2000a) of 190 °C for a mass of 21.60 kg. The coupling agent was a granulated maleated polyethylene (MAPE, Licocene 4351) and the lubricating agent was a fine-grained Licolub H12 commercial polyethylene wax with acid values of 15 to 19 mg KOH·g⁻¹. Both agents were obtained from Clariant Corporation, Frankfurt, Germany. Hydrocerol 1700, an endothermic chemical agent in the form of a powder obtained from Clariant Additives Masterbatch (USA), was used as foaming agent. The radiata pine sawdust was provided by the paper manufacturing company CMPC Maderas S. A., Planta Coronel, Concepción, Chile. The sawdust was sieved and only the retentate at 60 mesh (250 µm) was used.

Pellet preparation and profiles extrusion

The wood particles were subjected to drying with forced air for 48 h at 80 °C until reaching a lower moisture content of 2 %, in order to obtain the wood/plastic pellet. Subsequently, the particles were mixed with the polymer for 30 min; two plastic/wood formulations were prepared at 80/20 and 70/30 ratios.

The formulations were introduced into the extruder through the feed hopper. A 35 mm counter-rotating conical twin-screw extruder (Cincinnati Milacron TC35, USA), equipped with three heating zones and a rectangular head measuring 50 mm wide and 5 mm thick, was used. The temperature was kept constant at 185 °C in the three zones and at 170 °C in the head. In the extrusion a head with 12 holes was used to obtain filaments and pelletizing was performed with a mill. The plastic/wood pellet was introduced with the coupling, lubricating and foaming agents into a thermal mixer at 80 °C for 5 min. The concentration of the coupling agent was 5 % and that of the lubricating agent was 1 % based on the wood's dry weight, while that of the foaming agent at 1 and 3 % was based on the polymer's weight. The WPCs, for the two plastic/wood formulations, were manufactured without additives as control samples and with additives as treatments. In total, 30 extrusions reported in Table 1 were made.

Corporation, Reino de Arabia Saudita. El plástico reciclado consistió de *pellet* de material rechazado de una fábrica de bolsas plásticas con tres ciclos de extrusión de la empresa chilena Plásticos Besalle Limitada.

Los polímeros se sometieron a un análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) con base en tres réplicas en un intervalo de temperatura entre 20 y 300 °C y a una velocidad de calentamiento de 10 °C·min⁻¹. Se calcularon el área sobre la curva de cada endoterma y la entalpía de fusión.

El polímero virgen y el reciclado presentaron una densidad de 905 y 917 kg·m⁻³ con un índice de fluidez de 7.5 y 13.81 g en un periodo de 10 min, respectivamente, según la condición establecida por la ASTM D 1238-04 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2000a) de 190 °C para una masa de 21.60 kg. El agente acoplante fue un polietileno maleatado granulado (MAPE, Licocene 4351) y el agente lubricante fue una cera de polietileno comercial Licolub H12 de grano fino con valores de ácido de 15 a 19 mg KOH·g⁻¹. Ambos agentes se obtuvieron de Clariant Corporation Frankfurt Alemania. Como agente espumante se usó Hydrocerol 1700, agente químico endotérmico en forma de polvo que fue obtenido de Clariant Aditivos Masterbatch (USA). El aserrín de pino radiata fue proporcionado por la compañía manufacturera de papeles CMPC Maderas S. A., Planta Coronel, Concepción, Chile. El aserrín se tamizó y se utilizó solo el retenido en 60 mesh (250 µm).

Preparación del *pellet* y extrusión de los perfiles

Las partículas de madera fueron sometidas a un secado con aire forzado por 48 h a 80 °C hasta conseguir una humedad inferior de 2 %, para la obtención del *pellet* de madera y plástico. Posteriormente, las partículas se mezclaron con el polímero por 30 min; dos formulaciones plástico/madera se prepararon en proporciones 80/20 y 70/30.

Las formulaciones se introdujeron a la extrusora a través de la tolva de alimentación. Se utilizó una extrusora (Cincinnati Milacron TC35, EUA) de doble tornillo cónico contrarrotativo de 35 mm, equipada con tres zonas de calentamiento y un cabezal rectangular con dimensiones de 50 mm de ancho y 5 mm de espesor. La temperatura se mantuvo constante a 185 °C en las tres zonas y a 170 °C en el cabezal. En la extrusión se utilizó un cabezal provisto de 12 orificios para la obtención de filamentos y la peletización se realizó con un molino. El *pellet* plástico/madera se introdujo con los agentes acoplante, lubricante y espumante en una mezcladora térmica a 80 °C por 5 min. La concentración del agente acoplante se mantuvo constante a 5 % con base en el peso seco de la madera; el agente lubricante en 1 %; y la del agente espumante en 1 y 3 % con base en el peso

Table 1. Extrusion formulations to determine the effect of the chemical foaming agent (Hydrocerol 1700) on the cellular morphology and density of the foamed wood-plastic composite.

Cuadro 1. Extrusiones evaluadas para determinar el efecto del agente espumante químico (Hydrocerol 1700) sobre la morfología celular y la densidad del compuesto madera plástico espumado.

| Code / Código | Composite formulation / Formulación del compuesto |
|--|---|
| Virgin polymer and additives / Polímero virgen y aditivos | |
| 1 | Virgin polymer / Polímero virgen |
| 2 | Virgin polymer + 1 % Hydrocerol 1700 / Polímero virgen + 1 % Hydrocerol 1700 |
| 3 | Virgin polymer + 3 % Hydrocerol 1700 / Polímero virgen + 3 % Hydrocerol 1700 |
| 4 | Recycled polymer / Polímero reciclado |
| 5 | Recycled polymer + 1 % Hydrocerol 1700 / Polímero reciclado + 1 % Hydrocerol 1700 |
| 6 | Recycled polymer + 3 % Hydrocerol 1700 / Polímero reciclado + 3 % Hydrocerol 1700 |
| 80/20 (80 % virgin HDPE/20 % wood fiber) / 80/20 (80 % HDPE virgen/20 % fibra madera) | |
| 7 | WPC without additives (control) / WPC sin aditivos (control) |
| 8 | WPC + 5 % Licocene + 1 % Licolub (control) |
| 9 | WPC + 1 % Hydrocerol + 1 % Licolub (control) |
| 10 | WPC + 3 % Hydrocerol + 1 % Licolub (control) |
| 11 | WPC + 5 % Licocene + 1 % Hydrocerol + 1 % Licolub |
| 12 | WPC + 5 % Licocene + 3 % Hydrocerol + 1 % Licolub |
| 70/30 (70 % virgin HDPE/30 % wood fiber) / 70/30 (70 % HDPE virgen/30 % fibra madera) | |
| 13 | WPC without additives (control) / WPC sin aditivos (control) |
| 14 | WPC + 5 % Licocene + 1 % Licolub (control) |
| 15 | WPC + 1 % Hydrocerol + 1 % Licolub (control) |
| 16 | WPC + 3 % Hydrocerol + 1 % Licolub (control) |
| 17 | WPC + 5 % Licocene + 1 % Hydrocerol + 1 % Licolub |
| 18 | WPC + 5 % Licocene + 3 % Hydrocerol + 1 % Licolub |
| 80/20 (80 % recycled HDPE/20 % wood fiber) / 80/20 (80 % HDPE reciclado/20 % fibra madera) | |
| 19 | WPC without additives (control) / WPC sin aditivos (control) |
| 20 | WPC + 5 % Licocene + 1 % Licolub (control) |
| 21 | WPC + 1 % Hydrocerol + 1 % Licolub (control) |
| 22 | WPC + 3 % Hydrocerol + 1 % Licolub (control) |
| 23 | WPC + 5 % Licocene + 1 % Hydrocerol + 1 % Licolub |
| 24 | WPC + 5 % Licocene + 3 % Hydrocerol + 1 % Licolub |
| 70/30 (70 % recycled HDPE/30 % wood fiber) / 70/30 (70 % HDPE reciclado/30 % fibra madera) | |
| 25 | WPC without additives (control) / WPC sin aditivos (control) |
| 26 | WPC + 5 % Licocene + 1 % Licolub (control) |
| 27 | WPC + 1 % Hydrocerol + 1 % Licolub (control) |
| 28 | WPC + 3 % Hydrocerol + 1 % Licolub (control) |
| 29 | WPC + 5 % Licocene + 1 % Hydrocerol + 1 % Licolub |
| 30 | WPC + 5 % Licocene + 3 % Hydrocerol + 1 % Licolub |

WPC: Wood-plastic composite, HDPE: high-density polyethylene.

WPC: compuesto madera plástico, HDPE: polietileno de alta densidad.

In all cases, the extruder's screw speed was maintained at 5 rpm and temperatures were kept at 170 °C in feed zone 1 (compaction), 180 °C in transition zone 2 (melt) and 190 °C in dosing zone 3; the temperature in the head was 190 °C. The extruded specimens, which at the outlet end head had a width of 70 mm and 7 mm thickness, were cooled at room temperature after drawing the profile manually.

Characterization of the foamed microstructure

The density of the samples was determined for 10 specimens per treatment in accordance with standard ASTM D792-00 (ASTM, 2000b), using Archimedes' water displacement technique.

The fracture of the foamed composites was analyzed in small rectangular pieces taken from their central area. The pieces were immersed for 30 min in liquid nitrogen to achieve a brittle fracture in the longitudinal and transversal directions of the extruded samples. The fractured samples were coated with a gold and platinum alloy and inspected under an electron microscope (SEM, JOEL brand, model 6610LV, Japan). The surface of the fractured foamed composites was observed using magnifications of 27x and 40x. The area and diameter of the composite bubbles were measured through Image-Pro Plus 6.2 image analysis software (Media Cybernetics, Inc., 2007).

The void fraction V_f (%) was calculated using the following formula:

$$V_f (\%) = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_m}\right) \times 100$$

where,

ρ_f = density of the foamed samples ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

ρ_m = density of the unfoamed samples ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

The average diameter of the cells in the virgin and recycled polymers was determined for 100 bubbles that were elliptical in shape, which is why the major axis and the minor axis of each one were measured and the measurements of the longitudinal and transversal directions were averaged. In the foamed composites, the bubbles were irregular. Therefore, 100 bubbles were measured in each composite and the equivalent diameter of the circle represented by each of them was determined by the following formula:

$$De_{\text{equiv}} = \sqrt{\frac{(4 \times A)}{\pi}}$$

where,

De_{equiv} = equivalent diameter (μm)

A = area of each bubble (cm^2).

del polímero. Los WPC, para las dos formulaciones de plástico/madera, se fabricaron sin aditivos como muestras control y con aditivos como tratamientos. En total se hicieron 30 extrusiones indicadas en el Cuadro 1.

En todos los casos, la velocidad de los tornillos de la extrusora se mantuvo en 5 rpm y las temperaturas se mantuvieron en 170 °C en la zona 1 de alimentación (compactación), 180 °C en la zona 2 de transición (fusión) y 190 °C en la zona 3 de dosificación; la temperatura en el cabezal fue 190 °C. Las muestras extruidas, que presentaron a la salida del cabezal un ancho de 70 mm y 7 mm de espesor, se enfriaron a temperatura ambiente, previo arrastre o halado del perfil realizado de forma manual.

Caracterización de la microestructura espumada

La densidad de las muestras se determinó en 10 probetas por cada tratamiento de acuerdo con la norma ASTM D792-00 (ASTM, 2000b), utilizando la técnica del desplazamiento de agua de Arquímedes.

La fractura de los compuestos espumados se analizó en pequeñas piezas rectangulares de la parte central de éstos. Las piezas se sumergieron durante 30 min en nitrógeno líquido para lograr una fractura frágil en la dirección longitudinal y transversal de las muestras extruidas. Las muestras fracturadas se recubrieron con una aleación de oro y platino y se inspeccionaron en un microscopio electrónico (SEM, marca JEOL modelo 6610LV, Japón). La superficie de los compuestos espumados fracturados se observó utilizando aumentos de 27x y 40x. El área y diámetro de las burbujas de los compuestos se midieron a través del software de análisis de imágenes Image-Pro Plus 6.2 (Media Cybernetics, Inc., 2007).

La fracción de vacío V_f (%) se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$V_f (\%) = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_m}\right) \times 100$$

donde,

ρ_f = densidad de las muestras espumadas ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

ρ_m = densidad de las muestras no espumadas ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

El diámetro promedio de las células en los polímeros virgen y reciclado se determinó en 100 burbujas que tenían forma elíptica, razón por la cual se midieron el eje mayor y el eje menor de cada una y se promediaron las mediciones de la dirección longitudinal y transversal. En los compuestos espumados, las burbujas fueron irregulares y no se aproximaban a una elipse, por tanto, se midieron 100 burbujas en cada compuesto y se determinó el diámetro equivalente del

The bubble density of the polymer (N_{fi}), which represents the number of cells per cm^3 in virgin and recycled condition, was determined with the following formula (Gosselin & Rodrigue, 2005):

$$N_{fi} = N_1(N_2)^{1/2}$$

where,

N_1 = surface bubble density in the longitudinal direction

N_2 = surface bubble density in the transversal direction.

This equation is particularly suitable for representing extruded foams where the cells are exposed to shear forces and are elongated in the flow direction.

Based on the analysis of Rodrigue, Souici, and Kabamba (2006), the bubble density (N_f) in the foamed WPCs can be approximated and calculated by the equation:

$$N_f = \left(\frac{n}{A}\right)^{3/2}$$

where,

n = average number of bubbles of both directions (longitudinal and transversal), measured in three micrographs

A = total area of the micrograph (cm^2).

Data were analyzed in a complete factorial design (2^3) with three factors and two categorical levels (type of plastic [virgin and recycled], foaming agent concentration [1 and 3 %] and plastic/wood ratio [80/20 and 70/30]) in formulations 11-12, 17-18, 23-24 and 29-30, shown in Table 1. The selected treatments contain the three factors to be analyzed from the design and the remaining treatments were control patterns. The analysis of variance (ANOVA) and the LSD (least significant difference) test were performed with 95 % reliability, using the Design Expert® statistical software v. 8.0 (Stat-Ease, Inc., 1998).

Results and discussion

Figure 1 shows differential scanning calorimetry (DSC) analysis for virgin and recycled thermoplastic.

The melting temperature of the virgin HDPE was 136 °C. In the case of the recycled polymer there is a similar peak to the virgin polymer, indicating a melting temperature of 133 °C; after 180 °C two exotherms are present, one minimum and the second with higher magnitude, with an irregular behavior of the polymer after 240 °C. This may be associated with the composition of the plastic. According to the manufacturer's description, the recycled plastic was made up of 73.1 % virgin HDPE, 14.6 % calcium

círculo representado por cada una de ellas, mediante la siguiente fórmula:

$$Dequiv = \sqrt{\frac{(4 \times A)}{\pi}}$$

donde,

Dequiv = diámetro equivalente (μm)

A = área de cada burbuja (cm^2).

La densidad de burbujas del polímero (N_{fi}), la cual representa el número de células por cm^3 en condición virgen y reciclada, se determinó con la siguiente fórmula (Gosselin & Rodrigue, 2005):

$$N_{fi} = N_1(N_2)^{1/2}$$

donde,

N_1 = número de burbujas en la dirección longitudinal

N_2 = número de burbujas en la dirección transversal.

Esta ecuación es particularmente adecuada para representar espumas extruidas donde las células son expuestas a esfuerzos de corte y son elongadas en la dirección del flujo.

Con base en el análisis de Rodrigue, Souici, y Kabamba (2006), la densidad de burbujas (N_f) en los WPC espumados puede ser aproximada y calculada por la ecuación:

$$N_f = \left(\frac{n}{A}\right)^{3/2}$$

donde,

n = número de burbujas promedio de ambas direcciones (longitudinal y transversal), medido en tres micrografías

A = área total de la micrografía (cm^2).

Los datos se analizaron en un diseño factorial completo (2^3) con tres factores y dos niveles categóricos (tipo de plástico [virgen y reciclado], concentración de agente espumante [1 y 3 %] y proporción plástico/madera [80/20 y 70/30]) en las formulaciones 11-12, 17-18, 23-24 y 29-30, mostradas en el Cuadro 1. Los tratamientos seleccionados contienen los tres factores a analizar del diseño y los tratamientos restantes fueron patrones de control. El análisis de varianza (ANDEVA) y la prueba DMS (diferencia mínima significativa) se realizaron con una confiabilidad del 95 %, utilizando el software estadístico Design Expert® v. 8.0 (Stat-Ease, Inc., 1998).

Resultados y discusión

La Figura 1 muestra el análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) para el termoplástico virgen y reciclado.

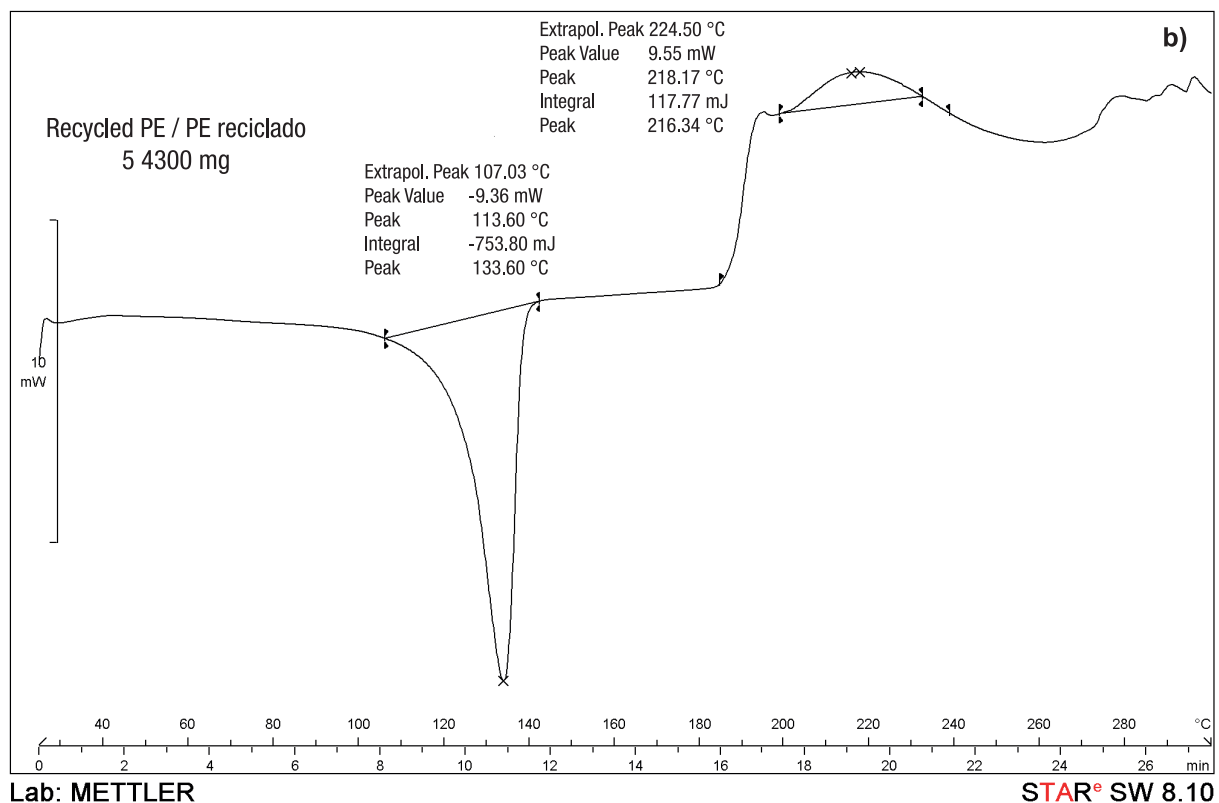
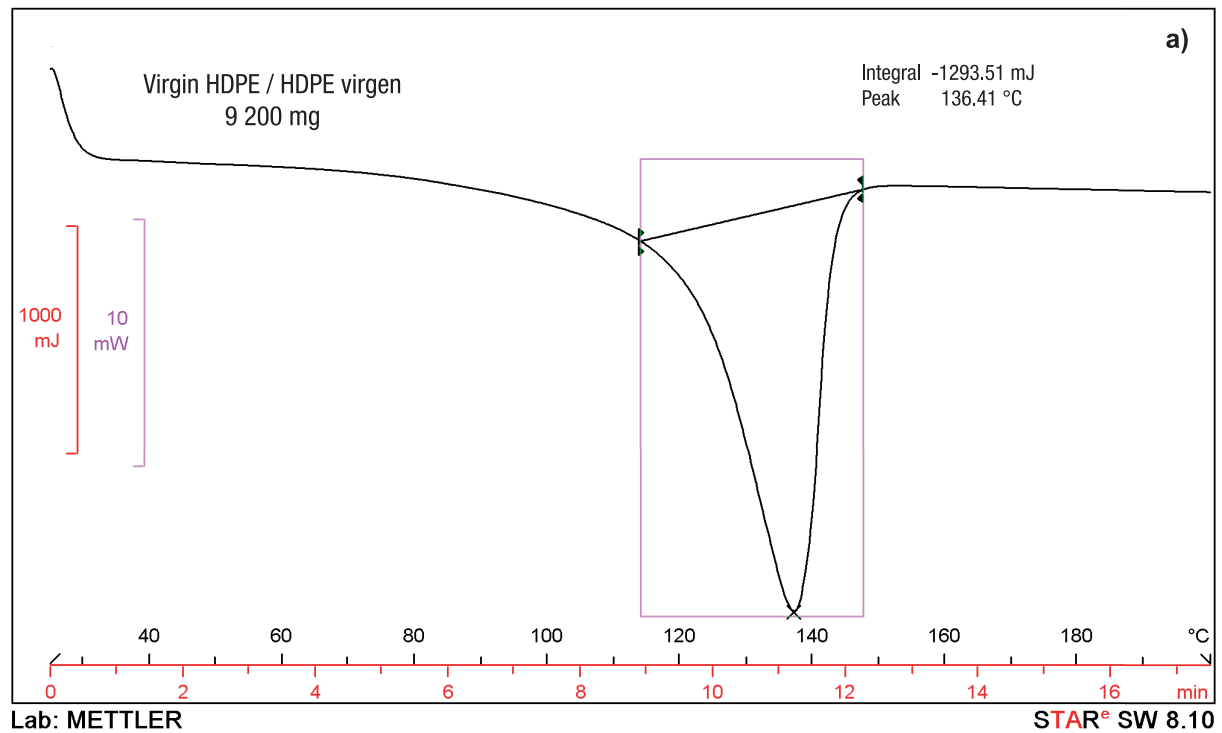


Figure 1. Differential scanning calorimetry analysis of virgin HDPE (high-density polyethylene) (a) and recycled HDPE (b) polymers.

Figura 1. Análisis de calorimetría diferencial de barrido del polímero HDPE (polietileno de alta densidad) virgen (a) y HDPE reciclado (b).

carbonate, 3.5 % masterbatch (white dye whose main components are titanium dioxide and calcium carbonate) and 8.8 % linear polyethylene. In addition, the recycled polyethylene sustained three extrusion cycles that could affect the molecular behavior.

Characterization of the foamed microstructure

Density of the composites

Figure 2 shows the density of the polymer and the foamed wood-plastic composites. The results of the analysis of variance indicate that the model was significant ($P < 0.05$).

The density of the virgin polymer with 1 and 3 % foaming decreased by 39 and 20 %, respectively, relative to the control. The density of the recycled polymer with 1 and 3 % foaming decreased by 18 and 23 %, respectively. Prior to this experiment, it was expected that increasing the foaming agent concentration would generate more bubbles and hence the density would decrease to a greater extent, but the situation was different, possibly because of the loss of foaming agent to the environment during extrusion of the polymers.

In the foamed composites in 80/20 virgin condition with 1 % (treatment 11) and 3 % (treatment 12) foaming, the density decreased by 7 and 8 %, respectively, relative to the control (5 % coupling agent, 1 % lubricating agent and no foaming; treatment 8), which showed a density of $934 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figure 2a). A similar situation was found in 70/30 composites in virgin condition (treatment 17-18) relative to the control with 5 % coupling agent, 1 % lubricant and no foaming agent (treatment 14; $951 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

In the case of foamed composites in 80/20 recycled condition with 1 and 3 % foaming, the density decreased by 7 % (treatment 23) and 8 % (treatment 24), respectively, relative to the control (5 % coupling agent, 1 % lubricant and no foaming; treatment 20), which had a density of $939 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figure 2b). The situation was similar in the 70/30 composites in recycled condition (treatment 29-30) relative to the control (treatment 26; $950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Density reduction was less than 10 % in the foamed composites; these results are similar to those found by Bledzki and Faruk (2006).

In Figure 2 it can be seen that density tends to be higher with increasing wood fiber concentration and with the presence of the coupling agent (70/30 vWPC and rWPC with 1 and 3 % FA + 5 % CA + 1 % LA). The increase in the amount of fiber generates a greater densification of the composite, because it collapses plastically due to the high pressures and temperatures inside the extruder barrel. In addition, the fiber does not undergo foaming, so increasing the amount of wood in the composite necessarily decreases the total void fraction by increasing the density. For this reason,

La temperatura de fusión del HDPE virgen se situó en $136 \text{ }^\circ\text{C}$. En el caso del polímero reciclado existe un pico similar al polímero virgen, que indica una temperatura de fusión de $133 \text{ }^\circ\text{C}$; después de $180 \text{ }^\circ\text{C}$ se manifiestan dos exotermas, una mínima y la segunda con mayor magnitud, con un comportamiento irregular del polímero después de los $240 \text{ }^\circ\text{C}$. Esto puede estar asociado con la composición del plástico. Según la descripción aportada por el fabricante, el plástico reciclado estaba conformado con 73.1 % de HDPE virgen, 14.6 % de carbonato de calcio, 3.5 % de *masterbatch* (colorante blanco cuyos componentes principales son dióxido de titanio y carbonato de calcio) y 8.8 % de polietileno lineal. Además, el polietileno reciclado presentó tres ciclos de extrusión que pudieron afectar el comportamiento molecular.

Caracterización de la microestructura espumada

Densidad de los compuestos

La Figura 2 muestra la densidad del polímero y los compuestos madera plástico espumado. Los resultados del análisis de varianza indican que el modelo fue significativo ($P < 0.05$).

La densidad del polímero virgen con 1 y 3 % de espumante disminuyó 39 y 20 %, respectivamente, con relación al control. La densidad del polímero reciclado con 1 y 3 % de espumante disminuyó 18 y 23 %, respectivamente. En el presente estudio se esperaba que al aumentar la concentración de espumante se generaran más burbujas y, por ende, la densidad disminuyera en mayor medida, pero la situación fue diferente, posiblemente a causa de la pérdida de agente espumante al medio ambiente durante la extrusión de los polímeros.

En los compuestos espumados en condición virgen 80/20 con 1 % (tratamiento 11) y 3 % (tratamiento 12) de espumante, la densidad disminuyó 7 y 8 %, respectivamente, con relación al control (5 % de agente acoplante, 1 % de agente lubricante y sin espumante; tratamiento 8), el cual mostró una densidad de $934 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 2a). Una situación similar se presentó en los compuestos 70/30 en condición virgen (tratamiento 17-18) respecto al control con 5 % de agente acoplante, 1 % de lubricante y sin espumante (tratamiento 14; $951 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

En el caso de los compuestos espumados en condición reciclado 80/20 con 1 y 3 % de espumante, la densidad disminuyó 7 % (tratamiento 23) y 8 % (tratamiento 24), respectivamente, con relación al control (5 % de agente acoplante, 1 % de lubricante y sin espumante; tratamiento 20), el cual tuvo una densidad de $939 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 2b). La situación fue similar en los compuestos 70/30 en condición reciclada (tratamiento 29-30) respecto al control (tratamiento 26; $950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). La

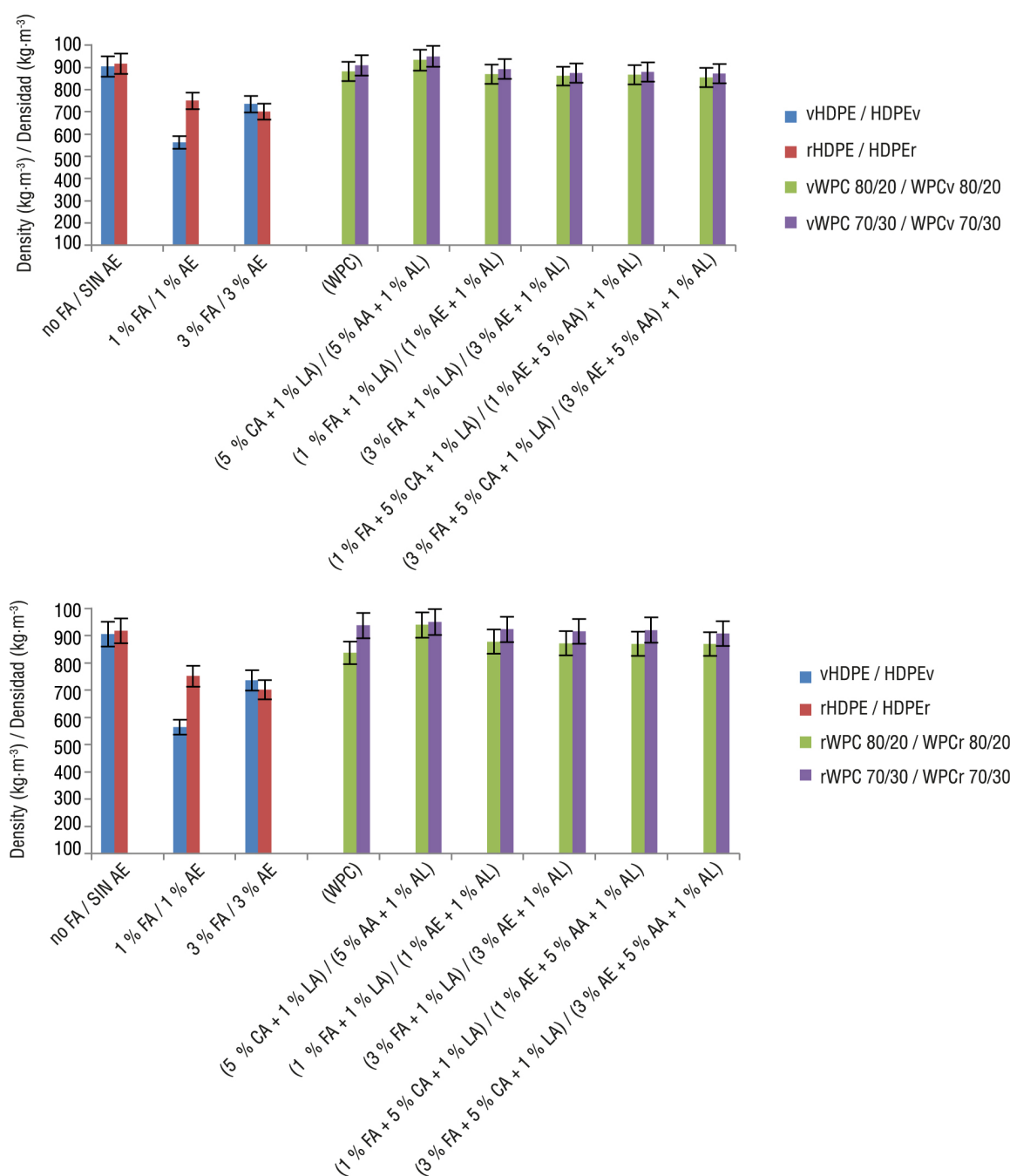


Figure 2. Density of the virgin polymer (vHDPE: virgin high-density polyethylene), recycled polymer (rHDPE: recycled high-density polyethylene) and foamed wood-plastic composites (WPCs) at 80/20 and 70/30 ratios in virgin (v, 2a) and recycled (r, 2b) conditions. FA: foaming agent, CA: coupling agent, LA: lubricating agent. The foamed composites were statistically similar (LSD, $P = 0.05$). The vertical bars represent the standard error of the means.

Figura 2. Densidad del polímero virgen (HDPEv: Polietileno de alta densidad virgen), polímero reciclado (HDPEr: Polietileno de alta densidad reciclado) y compuestos madera plástico (WPC) espumado en proporciones 80/20 y 70/30 en condición virgen (v, 2a) y reciclado (r, 2b). AE: agente espumante, AA: Agente acoplante, AL: Agente lubricante. Los compuestos espumados fueron similares estadísticamente (DMS, $P = 0.05$). Las barras verticales representan el error estándar de las medias.

higher density can be seen in WPCs compared to thermoplastic polymers.

Figure 3 shows selected SEM images, where it can be seen that the foam in the virgin polymer was almost uniform in the longitudinal (Figure 3a) and transversal (Figure 3b) directions. In the longitudinal direction, the cells had similar elliptical shapes, generally of the closed type, with the bubbles in the extruded profile's flow direction predominating. In the transversal direction, the bubbles did not present an elliptical morphology.

reducción de la densidad fue inferior a 10 % en los compuestos espumados; estos resultados son similares a los encontrados por Bledzki y Faruk (2006).

En la Figura 2 se puede observar que la densidad tiende a ser mayor con el aumento de la concentración de fibra de madera y con la presencia del agente acoplante (WPCv y WPCr proporción 70/30 con 1 y 3 % AE + 5 % AA + 1 % AL). El incremento de la cantidad de fibra genera mayor densificación del compuesto, debido a que ésta colapsa plásticamente por las altas presiones

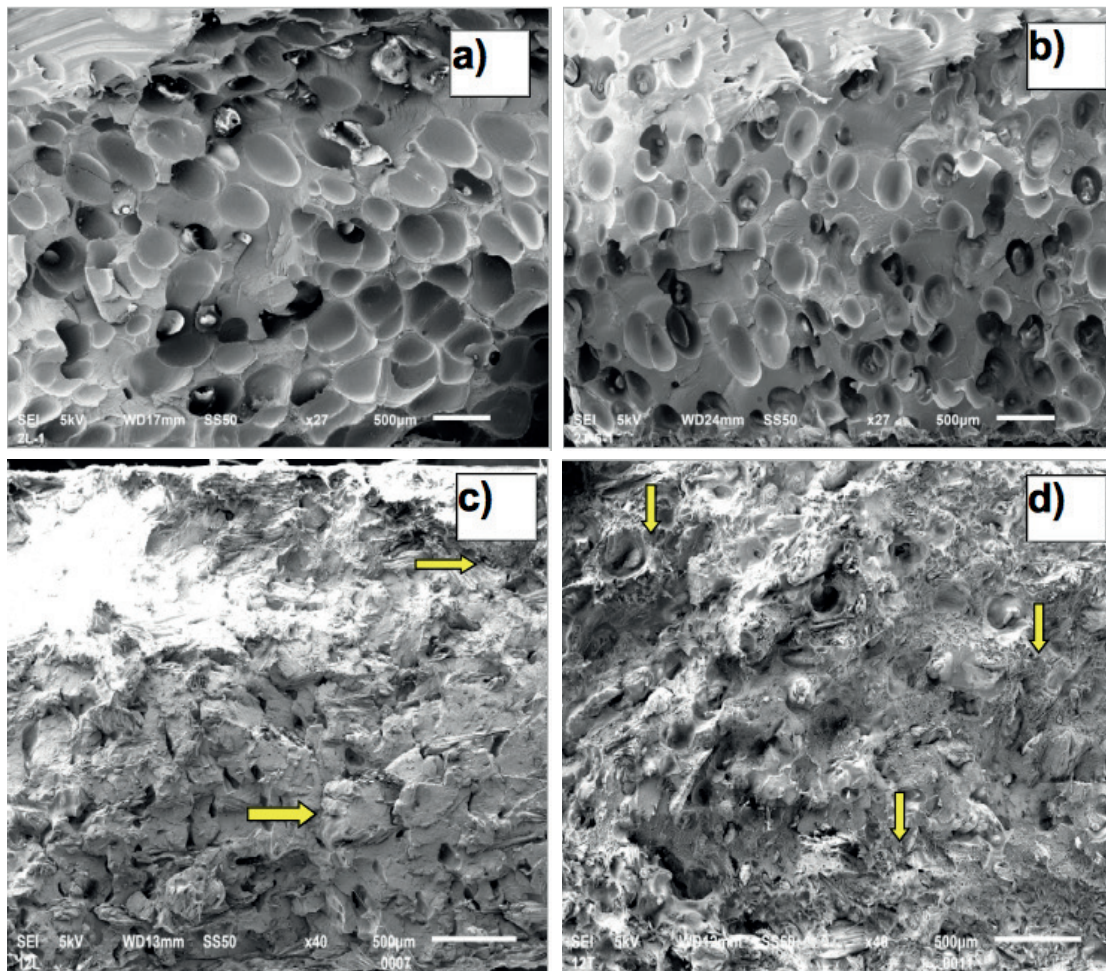


Figure 3. Micrographs of virgin and recycled polyethylene with and without wood fiber obtained by a scanning electron microscope. a) Virgin HDPE (high-density polyethylene) in the longitudinal direction. b) Virgin HDPE in the transversal direction. c) Foamed virgin wood-plastic composite (80/20) in the longitudinal direction; the arrows indicate the orientation direction of the wood particles and the shapes of the bubbles. d) Foamed virgin wood-plastic composite (80/20) in the transversal direction; the arrows indicate the fracture of particles, observing good interfacial adhesion, shape and transversal section of the bubble.

Figura 3. Micrografías de polietileno virgen y reciclado con y sin fibra de madera obtenidas por un microscopio electrónico de barrido. a) HDPE (polietileno de alta densidad) virgen extruido en dirección longitudinal. b) HDPE virgen extruido en dirección transversal. c) Compuesto madera plástico virgen espumado (80/20) en dirección longitudinal; las flechas indican el sentido de orientación de las partículas de madera y las formas de las burbujas. d) Compuesto madera plástico virgen espumado (80/20) dirección transversal; las flechas indican la fractura de partículas observando buena adhesión interfacial, la forma y sección transversal de la burbuja.

Moreno et al. (2013) found a similar pattern and pointed out that this behavior is due to the extrusion and injection conditions. Likewise, the lack of control over the density in the extrusion process is associated with the number of spaces or bubbles and is related to the escape of the gas produced by the foaming agent, which also generates an inhomogeneous morphology. Gosselin et al. (2006) studied the morphology of recycled WPCs by injection molding and mentioned that increasing the fiber concentration can increase the melt viscosity and matrix stiffness, causing a reduction in the average cell or bubble size.

Figure 3 also shows 80/20 WPCs in foamed virgin condition. It can be seen in the longitudinal direction (Figure 3c) that the wood fibers tend to be oriented in the flow direction; in the transversal direction (Figure 3d), the fibers and foams are also oriented in the flow direction.

Figure 4 shows the void fraction of the foamed treatments. The void fraction in the virgin polymer with 1 % (treatment 2) and 3 % (treatment 3) foaming agent was 37.7 and 18.7 %, respectively. In the recycled polymer with 1 % (treatment 5) and 3 % (treatment 6) foaming agent, the void fractions were 18.1 and 23.5 %, respectively. In the foamed treatments, the results of the analysis of variance indicate that there are significant differences ($P < 0.05$) in the void fraction when varying the foaming agent concentration and the plastic/wood ratio. According to the LSD test ($P = 0.05$),

y temperaturas al interior del barril de la extrusora. Además, la fibra no experimenta espumación, de tal modo que el incremento de la cantidad de madera en el compuesto disminuye necesariamente la fracción total de espacios vacíos aumentando la densidad. Por esta razón, se puede apreciar mayor densidad en los WPC en comparación con los polímeros termoplásticos.

La Figura 3 muestra imágenes seleccionadas del SEM, donde se puede observar que el espumado en el polímero virgen fue casi uniforme en las direcciones longitudinal (Figura 3a) y transversal (Figura 3b). En la dirección longitudinal, las células tuvieron formas elípticas similares, generalmente del tipo cerradas, predominando las burbujas en dirección al flujo del perfil extruido. En la dirección transversal, las burbujas no presentaron la morfología elíptica.

Moreno et al. (2013) encontraron un patrón similar y señalaron que este comportamiento se debe a las condiciones de extrusión e inyección. De igual manera, la falta de control de la densidad en el proceso de extrusión está asociada a la cantidad de espacios o burbujas y se relaciona con el escape del gas producido por el agente espumante, lo que genera además una morfología no homogénea. Gosselin et al. (2006) trabajaron en la morfología de WPC reciclado por moldeo en inyección y mencionan que al aumentar la concentración de fibra se puede aumentar la viscosidad de la mezcla fundida y la rigidez de la matriz, provocando una reducción en el tamaño promedio de células o burbujas.

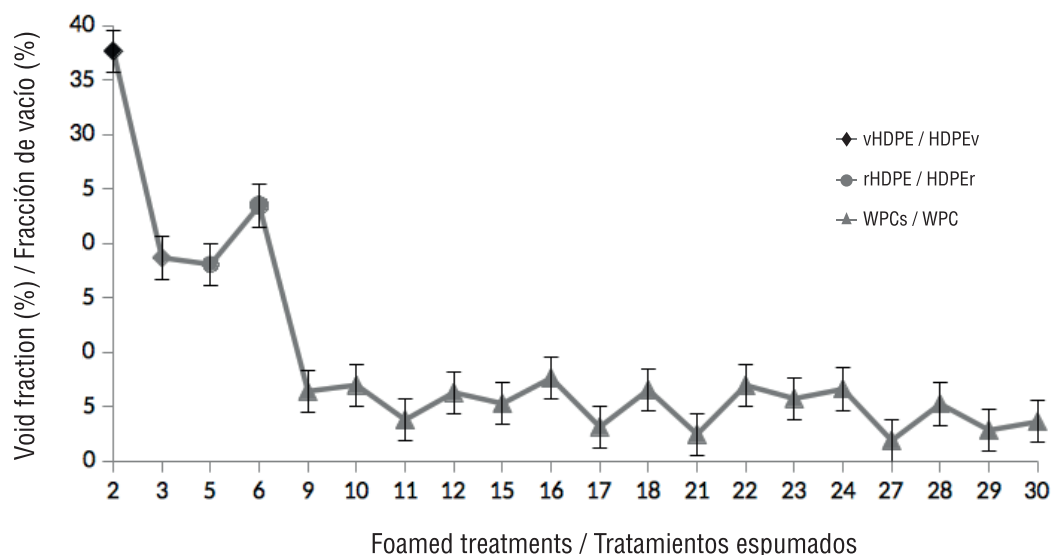


Figure 4. Void fraction in virgin polymer (high-density polyethylene: vHDPE), recycled polymer (rHDPE) and foamed wood-plastic composites (WPCs). Foamed treatments can be found in Table 1. The vertical bars represent the standard error of the mean.

Figura 4. Fracción de vacío en el polímero virgen (polietileno de alta densidad: HDPEv), polímero reciclado (HDPEr) y los compuestos madera plástico (WPC) espumados. Los tratamientos espumados pueden consultarse en el Cuadro 1. Las barras verticales representan el error estándar de la media.

the void fraction was higher in the treatments with 3 % foaming and an 80/20 plastic/wood ratio. It was expected that the higher the foaming agent concentration the greater the void fraction, a trend that was not met for the virgin polymer with 3 % foaming agent. This can be associated with the loss of the gas to the external medium, product of the greater cracking at the ends of the profile at the head outlet, forming *sharkskin*.

With regard to the foamed wood-plastic composites, and considering all treatments, the void decreased from 1.9 % to a maximum of 7.7 %, obtaining a greater void fraction in the formulations with 3 % foaming agent.

Because wood fiber increases matrix stiffness, the increase in fiber content along with low gas solubility and high diffusivity inhibits bubble growth and composites with high void fraction cannot be produced. The works of Matuana, Park, and Balatinecz (1997), Li and Matuana (2003), and Rachtanapun et al. (2004) support this theory. These authors worked on the extrusion of wood-plastic composites with virgin high-density polyethylene.

According to Figure 5, the cell density of the virgin polymer was in the range of 2.2×10^2 to 2.8×10^2 cells·cm⁻³; for the recycled polymer it was from 1.3×10^2 to 2.1×10^2 cells·cm⁻³, and in the foamed composites it ranged from 3.8×10^3 to 6.2×10^3 cells·cm⁻³.

En la Figura 3 se muestran también los WPC 80/20 en condición virgen espumado. Se observa que en la dirección longitudinal (Figura 3c), las fibras de madera tienden a orientarse en el sentido del flujo; en la dirección transversal (Figura 3d), las fibras y espumas también son expuestas en el sentido del flujo.

La Figura 4 muestra la fracción de vacío de los tratamientos espumados. La fracción de espacios vacíos en el polímero virgen con 1 % (tratamiento 2) y 3 % (tratamiento 3) de agente espumante fue de 37.7 y 18.7 %, respectivamente. En el polímero reciclado con 1 % (tratamiento 5) y 3 % (tratamiento 6) de espumante, las fracciones de espacios vacíos fueron 18.1 y 23.5 %, respectivamente. En los tratamientos espumados, los resultados del análisis de varianza indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) en la fracción de vacío al variar la concentración del agente espumante y la proporción plástico/madera. De acuerdo con la prueba DMS ($P = 0.05$), la fracción de vacío fue mayor en los tratamientos con 3 % de espumante y proporción plástico/madera 80/20. Se esperaba que, a mayor concentración de agente espumante, la fracción de espacios vacíos aumentara, tendencia que para el polímero virgen con 3 % de agente espumante no se cumplió. Esto puede estar asociado a la pérdida del gas al medio externo, producto del agrietamiento mayor en los extremos del perfil a la salida del cabezal, formándose *sharkskin* (piel de tiburón).

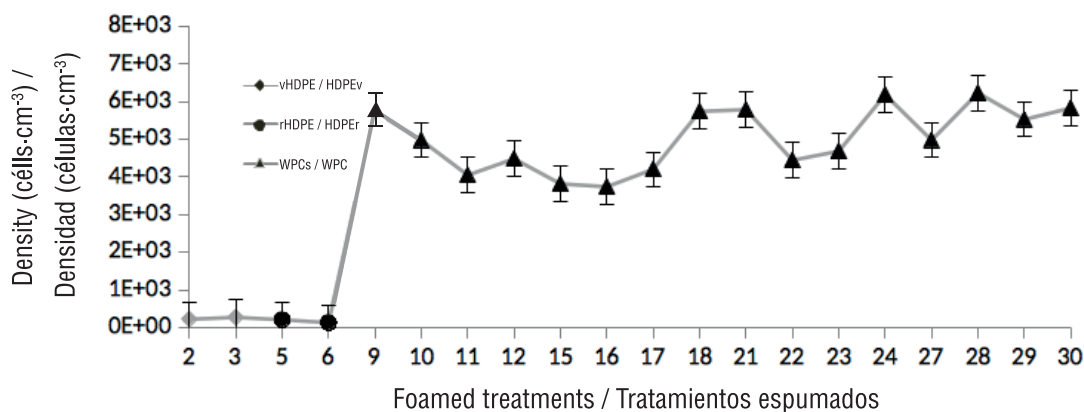


Figure 5. Cell density as a function of the foaming agent content in the virgin polymer (high-density polyethylene: vHDPE), recycled polymer (rHDPE) and foamed wood-plastic composites (WPCs). Foamed treatments can be found in Table 1. The vertical bars represent the standard error of the mean.

Figura 5. Densidad celular en función del contenido de agente espumante en el polímero virgen (polietileno de alta densidad: HDPEv), polímero reciclado (HDPEr) y los compuestos madera plástico (WPC) espumados. Los tratamientos espumados pueden consultarse en el Cuadro 1. Las barras verticales representan el error estándar de la media.

The higher foaming concentration (3 %) generated greater cell formation in the foamed polymers and in the foamed wood-plastic composites. The plastic matrix is softened at high temperatures, thereby offering less resistance against cell growth. When the expanded cells come into contact with each other, they initially share a common wall whose thickness decreases as the void fraction increases and then the cells tend to collapse. This could arise if the total free energy is reduced as a product of cell coalescence, causing the cell density to deteriorate (due to the increase in cell size). These views are supported by Baldwin, Park, and Suh (1996), Matuana et al. (1997) and Park, Behraves, and Venter (1996). This situation was verified in this study for the virgin and recycled polymers, whose cell density values were lower than those of the foamed composites, because the diameter of the polymer cells was greater. The SEM images of the composites analyzed in this research show the effect described by the mentioned authors; when using 3 % foaming, collapsed bubbles and high coalescence resulting in irregular and large bubbles were observed.

On the other hand, it is important to note that a cooling system was not used in the manufacturing process of the profiles. Initially an air system was created but it did not work, since it formed an irregular surface, producing a corrugated profile with variation in the thickness. A similar situation occurred when atomized water was added, a treatment that twisted and undulated the profile during cooling. Finally, it was decided to cool the profile at room temperature. The void fraction and cell density could be affected by the absence of a cooling system after the profile exits from the extruder head. This head would allow the outer layers to cool faster and produce a greater number and uniform size of bubbles in the center of the profile, thus maintaining stability in cell growth.

Figure 6 shows that the cell size of the virgin and recycled HDPE ranged from 461 to 660 μm in the longitudinal direction and from 323 to 653 μm in the transversal one. In the foamed wood-plastic composites, the size was smaller, being in the range from 84 to 127 μm in the longitudinal direction and 90 to 137 μm in the transversal one. In the virgin and recycled HDPE, the increase in size could be related to the expansion of cells caused by diffusion of the molten polymer gas into the nucleated cells. Matuana and Mengeloglu (2001) and Gosselin et al. (2006) state that the increase in wood content limits the development of foamed areas due to decreased gas diffusion and cell growth.

Con relación a los compuestos madera plástico espumado, y considerando todos los tratamientos, la fracción de espacios vacíos disminuyó de 1.9 % hasta un máximo de 7.7 %, obteniéndose mayor fracción de espacios vacíos en las formulaciones con 3 % de agente espumante.

Debido a que la fibra de madera incrementa la rigidez de la matriz, el incremento del contenido de fibra junto con la baja solubilidad del gas y su alta difusividad inhibe el crecimiento de burbujas y los compuestos con alta fracción de espacios vacíos no pueden ser producidos. Los trabajos de Matuana, Park, y Balatinecz (1997), Li y Matuana (2003), y Rachtanapun et al. (2004) respaldan esta teoría. Dichos autores trabajaron en extrusión de compuestos madera plástico con polietileno de alta densidad en estado virgen.

De acuerdo con la Figura 5, la densidad celular del polímero virgen se ubicó en el intervalo de 2.2×10^2 a 2.8×10^2 células- cm^{-3} ; para el polímero reciclado de 1.3×10^2 a 2.1×10^2 células- cm^{-3} ; y en los compuestos espumados varió de 3.8×10^3 a 6.2×10^3 células- cm^{-3} .

La concentración más alta de espumante (3 %) generó mayor formación de células en los polímeros espumados y en los compuestos madera plástico espumado. La matriz plástica es ablandada a altas temperaturas ofreciendo menor resistencia contra el crecimiento de las células. Cuando las células expandidas entran en contacto con otras, inicialmente, comparten una pared en común y el espesor de la pared va disminuyendo a medida que la fracción de espacios vacíos aumenta y entonces las células tienden a colapsar. Lo descrito anteriormente podría originarse si la energía libre total se reduce como producto de la coalescencia de las células, ocasionando que la densidad celular se vea deteriorada (debido al aumento del tamaño de las células). Estos planteamientos son respaldados por Baldwin, Park, y Suh (1996), Matuana et al. (1997) y Park, Behraves, y Venter (1996). Tal situación se comprobó en este estudio para los polímeros virgen y reciclado, cuyos valores de densidad celular fueron inferiores a los compuestos espumados, debido a que el diámetro de las células de los polímeros fue mayor. Las imágenes SEM de los compuestos analizados en esta investigación muestran el efecto descrito por los autores mencionados; al utilizar 3 % de espumante, se observaron burbujas colapsadas y alta coalescencia dando lugar a burbujas irregulares y de gran tamaño.

Por otra parte, es importante resaltar que dentro del proceso de fabricación de los perfiles no se utilizó un sistema de enfriamiento. Inicialmente se fabricó un sistema por aire y no funcionó, ya que formaba una superficie irregular, produciendo un perfil ondulado

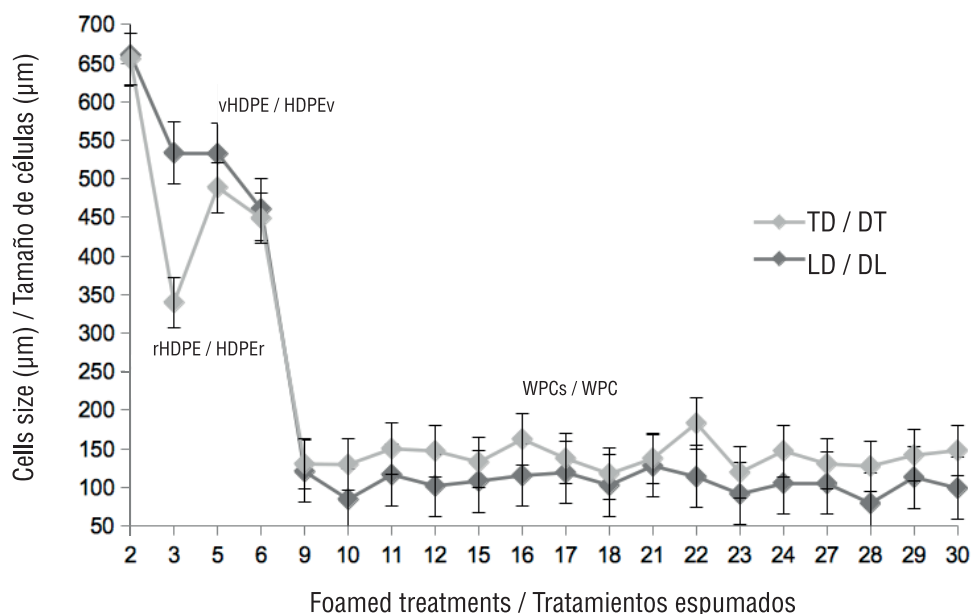


Figure 6. Cell diameter in the virgin polymer (high-density polyethylene: vHDPE), recycled polymer (rHDPE) and foamed wood-plastic composites (WPCs) in longitudinal (LD) and transversal (TD) directions. The foamed treatments can be found in Table 1. The vertical bars represent the standard error of the mean.
Figura 6. Diámetro de células en el polímero virgen (polietileno de alta densidad: HDPEv), polímero reciclado (HDPEr) y compuestos madera plástico espumados (WPC) en dirección longitudinal (DL) y transversal (DT). Los tratamientos espumados pueden consultarse en el Cuadro 1. Las barras verticales representan el error estándar de la media.

Conclusions

It is possible to obtain composites formed with foamed thermoplastic polymers, based on virgin and recycled polyethylene, reinforced with radiata pine wood fiber, under a conventional twin-screw extrusion system. Process variables and raw material characteristics play an important role in the generation of complex microcellular structures in the composites, and as a function of this, an engineering product with suitable physical properties is obtained. The extruded composite material, with 1 % chemical foaming agent (Hydrocerol 1700), showed a homogeneous cellular morphology, thereby producing closed cell-type bubbles and giving better physical properties to the material. The foaming agent decreased the density of the thermoplastic polymer in both virgin and recycled conditions. It is advisable to make adjustments and modifications in the machinery and extrusion line that favor the production of profiles with better quality at internal and superficial level. This research provides an alternative use for the high volume of byproducts called “residues” resulting from the primary and secondary processing of the species *Pinus radiata*, by proposing their use in the generation of new engineering products that can be used as construction elements.

con variación en el espesor. Una situación similar ocurrió cuando se agregó agua atomizada, tratamiento que torció y onduló el perfil durante el enfriamiento. Finalmente, se decidió enfriar el perfil a temperatura ambiente. La fracción de espacios vacíos y densidad celular pudieron ser afectados por la ausencia de un sistema de enfriamiento después de la salida del perfil del cabezal de la extrusora. Dicho cabezal permitiría que las capas externas se enfriaran con mayor rapidez y se produjera mayor número y tamaño uniforme de burbujas en el centro del perfil, manteniendo así la estabilidad en el crecimiento de las células.

En la Figura 6 se observa que el tamaño celular del HDPE virgen y reciclado varió de 461 a 660 µm en la dirección longitudinal y de 323 a 653 µm en la dirección transversal. En los compuestos madera plástico espumado, el tamaño fue menor, situándose en el intervalo 84 a 127 µm en la dirección longitudinal y entre 90 a 137 µm en la dirección transversal. En el HDPE virgen y reciclado, el incremento en el tamaño podría estar relacionado con la expansión de células causada por la difusión del gas del polímero fundido en las células nucleadas. Matuana y Mengeloglu (2001) y Gosselin et al. (2006) manifiestan que el aumento del contenido de madera limita el desarrollo de áreas

Acknowledgments

The authors thank the CMPC Maderas S. A. company for donating the *Pinus radiata* wood particles and the Clariant Corporation for donating the chemical additives, as well as the laboratory staff of the Center for Biomaterials and Nanotechnology (CBN for its initials in Spanish) and the Center for Advanced Polymers (CIPA for its initials in Spanish) of Bio-Bio University, for the support provided in the development of this research.

End of English version

References / Referencias

- Adhikary, K. B., Pang, S., & Staiger, M. P. (2008). Dimensional stability and mechanical behavior of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering*, 39(5), 807–815. doi: 10.1016/j.composites.2007.10.005
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2000a). D 1238-04. Standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer. In ASTM (Ed.), *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia, USA: Author. Retrieved from http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm_d1238.pdf
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2000b). D 792-00. Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement. In ASTM (Ed.), *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia, USA: Author.
- Ashori, A., & Nourbakhsh, A. (2008). A comparative study on mechanical properties and water absorption behavior of fiber-reinforced polypropylene composites prepared by OCC fiber and aspen fiber. *Polymer Composites*, 29(5), 574–578. doi: 10.1002/pc.20582
- Ashori, A., & Nourbakhsh, A. (2009). Characteristics of wood-fiber plastic composites made of recycled materials. *Waste Management*, 29(4), 1291–1295. doi: 10.1016/j.wasman.2008.09.012
- Baldwin, D. F., Park, Ch. B., & Suh, N. P. (1996). A microcellular processing study of polyethylene terephthalate in the amorphous and semi-crystalline states. Part I: Microcell nucleation. *Polymer Engineering and Science*, 36(11), 1437–1445. doi: 10.1002/pen.10538
- Bledzki, A., & Faruk, O. (2006). Microcellular injection molded wood fiber-PP composites: Part I- effect of chemical foaming agent content on cell morphology and physico-mechanical properties. *Journal of Cellular Plastic*, 42(1), 63–76. doi: 10.1177/0021955X06060945
- Gosselin, R., & Rodrigue, D. (2005). Test method cell morphology analysis of high density polymer foams. *Polymer Testing*, 24(8), 1027–1035. doi: 10.1016/j.polymertesting.2005.07.005
- Gosselin, R., Rodrigue, D., & Riedl, B. (2006). Injection molding of postconsumer wood-plastic composites I: espumadas por disminución de la difusión de gas, así como también el crecimiento de células.

Conclusiones

Es posible obtener compuestos formados con polímeros termoplásticos espumados, a base de polietileno virgen y reciclado, reforzados con fibra de madera de pino radiata, bajo un sistema convencional de extrusión de doble tornillo. Las variables del proceso y las características de las materias primas juegan un papel importante en la generación de estructuras microcelulares complejas en los compuestos, y en función de ello, se obtiene un producto de ingeniería con propiedades físicas adecuadas. El material compuesto extruido, con 1 % de agente espumante químico (Hydrocerol 1700), presentó una morfología celular homogénea produciendo burbujas del tipo células cerradas, otorgando mejores propiedades físicas al material. El agente espumante disminuyó la densidad del polímero termoplástico tanto en condición virgen como reciclado. Se recomienda realizar ajustes y modificaciones en la maquinaria y línea de extrusión que favorezcan la producción de perfiles con mejor calidad a nivel interno y superficial. La presente investigación aporta una alternativa de uso al alto volumen de subproductos llamados “residuos” del procesamiento primario y secundario de la especie *Pinus radiata*, generando una propuesta de aplicación en nuevos productos de ingeniería que pueden ser utilizados como elementos de construcción.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa CMPC Maderas S. A. por la donación de las partículas de madera de *Pinus radiata* y a la empresa Clariant Corporation por la donación de los aditivos químicos. Al personal del Laboratorio del Centro de Biomateriales y Nanotecnología (CBN) y al Centro de Polímeros Avanzados (CIPA) de la Universidad del Bío-Bío, por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación.

Fin de la versión en español

- Morphology. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19(6), 639–657. doi: 10.1177/0892705706067484
- Kim, J., & Pal, K. (2010). Recent advances in the processing of wood plastic composites. New York, USA: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-14877-4_9
- Klyosov, A. (2007). *Wood-plastic composites*. USA: Wiley-Interscience, Hoboken.
- Li, Q., & Matuana, L. (2003). Foam extrusion of high density polyethylene/Wood flour composites using chemical foaming agents. *Journal of Applied Polymer Science*, 88(14), 3139–3150. doi: 10.1002/app.12003
- Matuana, L., & Mengeloglu, F. (2001). Microcellular foaming of impact-modified rigid PVC/wood-flour composites. *Journal Vinyl and Additive Technology*, 7(2), 67–75. doi: 10.1002/vnl.10269
- Matuana, L., Park, C., & Balatinecz, J. (1997). Processing and cell morphology relationships for microcellular foamed PVC/wood fibre composites. *Polymer Engineering & Science*, 37(7), 1137–1147. doi: 10.1002/pen.11758
- Media Cybernetics, Inc. (2007). Image-Pro Plus 6.2. USA: Author.
- Moreno, P., Rodrigue, D., Giroux, Y., Ballerini, A., & Gacitúa, W. (2013). Caracterización mecánica y morfológica de termoplásticos reciclados espumados reforzados con subproductos de madera. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 15(1), 3–16. doi: 10.4067/S0718-221X2013005000001
- Park, C., Behraves, A., & Venter, R. (1996). A strategy for suppression of cell coalescence in the extrusion of microcellular HIPS foams. In K. Khemani (Ed.), *Polymer foams: Science and technology* (pp. 115–129). Washington, USA: American Chemical Society.
- Pickering, K. L. (2008). Properties and performance of natural fibre composites. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Rachtanapun, P., Selke, S., & Matuana, L. (2004). Characterization of microcellular foamed polyolefin blend composites with wood fiber. *International Journal of Polymeric Materials*, 53(11), 971–983. doi: 10.1080/00914030490516620
- Rodrigue, D., Souici, S., & Kabamba, E. (2006). Effect of wood powder on polymer foam nucleation. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 12(1), 19–24. doi: 10.1002/vnl.20062
- Smith, P., & Wolcott, M. (2006). Opportunities for wood fiber-plastic composites in residential and industrial applications. *Forest Products Journal*, 56(3), 4–11. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/235979210_Opportunities_for_woodnatural_fiber-plastic_composites_in_residential_and_industrial_applications
- Stat-Ease, Inc. (1998). Design Expert version 8.0. Software estadístico. Minneapolis, USA: Author.