

Tableros de partículas fabricados con residuos industriales de madera de *Pinus patula*

Particle boards manufactured from industrial residues of *Pinus patula* wood

Luis Zambrano,¹ Pablo Moreno,^{2*} Freddy Muñoz,³ Jorge Durán,² Darío Garay² y Styles Valero²

RESUMEN

Este estudio es una propuesta para dar un aprovechamiento y uso a los residuos industriales del aserrío de la madera de *Pinus patula* para la elaboración de tableros aglomerados de partículas. Por lo tanto, los objetivos fueron manufacturar tableros aglomerados de partículas homogéneas a dos niveles de densidad, determinar sus propiedades físico-mecánicas y evaluar los resultados bajo las normas alemana y venezolana. La absorción de agua promedio a 2 y 24 horas de los tableros a ambas densidades cumplió con lo estipulado en las normas. La variación del espesor (hinchamiento) promedio por inmersión en agua a 2 y 24 horas para los tableros con densidad de 767 kg m⁻³ cumplió con lo exigido en ambas normas. Para el caso de los tableros con densidad de 672 kg m⁻³ la variación de espesor a 24 horas cumplió con las normas, mientras que la variación del espesor a 2 horas no. Respecto de las propiedades mecánicas, tanto el módulo de ruptura en flexión estática como la tensión perpendicular (adhesión interna) para ambos niveles de densidad superaron el valor mínimo aceptado en las normas; demostrando que los residuos industriales de la madera de *P. patula* presentan buenas características tecnológicas para la fabricación de tableros de partículas de densidad media.

PALABRAS CLAVE

Flexión estática, densidad, propiedades físico-mecánicas, tableros de partículas de densidad media, tensión perpendicular, urea-formaldehído.

ABSTRACT

This study is a proposal to generate uses of industrial residues from sawmills of *Pinus patula* wood for the manufacturing of particleboards. The aims are to manufacture homogeneous particleboards with two density levels, determine their physical and mechanical properties and evaluate the results with German and Venezuelan standards. The average water absorption at 2 and 24 hours of both density levels of boards meets the requirements for both standards. The average thickness variation (swelling) by immersion in water at 2 and 24 hours for boards with average density of 767 kg m⁻³ meets the requirements for both standards. For the case of the panels with average density of 672 kg m⁻³ thickness variation at 24 hours meets the requirements of both standards, while the swelling at 2

1 Instituto Universitario de Tecnología de Administración Industrial. Maracay-Venezuela. C.e.: luiz.contreras@hotmail.com

2 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida-Venezuela. C.e.: jorduran@ula.ve, dargaray@ula.ve, styles@ula.ve

3 Tecnológico de Costa Rica (TEC). Escuela de Ingeniería Forestal. Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria (CIIBI). Cartago-Costa Rica. C.e.: fmunoz@tec.ac.cr

* Autor para correspondencia: C.e.: pmoreno@ula.ve

hours does not. Regarding the mechanical properties both the modulus of rupture in static bending and tension perpendicular (internal bond) for both real density levels exceed the minimum accepted by standards, demonstrating that industrial residues from *P. patula* wood exhibit good technological characteristics for medium density particleboards manufacture.

KEY WORDS

Static bending, density, physical and mechanical properties, medium density particleboard, perpendicular tension, urea-formaldehyde.

INTRODUCCIÓN

Para un buen desarrollo de la industria forestal y maderera venezolana es imprescindible el aprovechamiento integral de la madera, optimizando el rendimiento de los recursos maderables, es decir, utilizando en los procesos productivos el mayor porcentaje posible de la madera cosechada del bosque. Tradicionalmente, en Venezuela se aprovechan solamente las trozas provenientes del fuste principal hasta una altura comercial aproximada de 15 m, lo cual implica la pérdida de un volumen considerable de madera que incluye trozas de altura superior, copa y ramas. De igual manera, los residuos producidos por el procesamiento primario en las industrias madereras no son aprovechados, generando un volumen considerable de subproductos de material lignocelulósico, que particularmente en Venezuela no han sido aprovechados, debido a la existencia de recursos maderables abundantes y falta de políticas de aprovechamiento integral de los subproductos generados del procesamiento forestal industrial. Sin embargo, estos subproductos pueden ser utilizados en la fabricación de otros productos de ingeniería con múltiples aplicaciones.

Según lo señalan Alma *et al.*, (2004), la población del mundo consume actual-

mente más de 3,5 millones de toneladas de madera verde al año. Si la tasa de consumo de fibra de madera y la tasa de crecimiento de la población (de aproximadamente 90 millones de personas por año) se mantienen constantes, la demanda de fibra de madera se incrementará en más de 60 millones de toneladas cada año, lo que podría aumentar la tasa de deforestación (Zheng *et al.*, 2006), propiciando el agotamiento de algunas especies forestales de bosque natural. Aprovechar de manera óptima e integral el recurso forestal, los residuos industriales, las especies de rápido crecimiento y las fibras no leñosas, como los residuos agrícolas (bagazo y paja de trigo), es una buena opción para mitigar y disminuir presiones políticas y sociales, sobre la explotación de maderas procedentes de bosque natural (Latibari y Roohnia, 2010).

Un producto de ingeniería que se adapta a los requerimientos anteriormente mencionados son los tableros de partículas, pues el suministro de materia prima para su elaboración potencia el uso de subproductos originados por las operaciones forestales (podas y raleos) hasta los del proceso primario y secundario de la madera (despuntos, descuadres, costaneras, corteza, entre otros). De esta manera se generan nuevas alternativas para promover el desarrollo de la industria maderera venezolana con nuevos productos de ingeniería con diferentes aplicaciones.

Existen diversos antecedentes bibliográficos referidos al uso exitoso de residuos provenientes de la industria forestal y maderera en la elaboración de tableros aglomerados de partículas, como ejemplo están las investigaciones realizadas por (Ginzel y Peraza, 1966; Moslemi, 1974; Peredo y Deppe, 1984; Suchsland y Xu, 1989; Poblete y Sánchez, 1991; Peredo y Torres, 1991; Van Niekerk y Pizzi, 1994; Blanchet *et al.*, 2000; Moreno *et al.*, 2005; Pedieu *et al.*, 2008; Latibari y Roohnia,

2010; Bazyar *et al.*, 2011). Por otro lado, Garay *et al.* (2009), estiman que las propiedades de un tablero están determinadas por los siguientes factores: tipo, tamaño, distribución y orientación de las partículas, así como también el tipo y la calidad del proceso, contenido de humedad durante el prensado y tratamiento post-manufactura del tablero.

El presente estudio es una propuesta sobre el aprovechamiento y uso de los residuos industriales del aserrío de la madera de *P. patula* para la elaboración de tableros aglomerados de partículas.

OBJETIVOS

Los objetivos fueron: a) manufacturar tableros aglomerados de partículas homogéneas a dos niveles de densidad, b) determinar sus propiedades físico-mecánicas y c) evaluar los resultados de acuerdo con lo establecido en la norma alemana DIN (1981) y venezolana COVENIN (1991).

MATERIALES Y MÉTODOS

Como materia prima se utilizaron costaneras derivadas del proceso de aserrío de árboles de *P. patula* de 25 años de edad, procedentes del bosque La Carbonera-San Eusebio, Mérida-Venezuela. La elaboración de los tableros, la preparación de probetas y la ejecución de los ensayos, se realizaron en el Laboratorio Nacional de Productos Forestales: Sección tableros aglomerados de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes, Venezuela.

Determinación de la densidad y contenido de humedad de la materia prima

De los segmentos de costaneras seleccionadas al azar, se prepararon 30 probetas

con dimensiones de 30 mm x 30 mm x 100 mm para la determinación de la densidad en la condición verde, seca al aire y seca al horno, según la norma DIN (1976). El cálculo del contenido de humedad se realizó con la siguiente ecuación:

$$\%CH = \left(\frac{P_i - P_o}{P_o} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

donde:

% CH = contenido de humedad.

p_i = peso inicial de la muestra (g).

p_o = peso de la muestra secada al horno (g).

Viruteado de los residuos de *P. patula* y secado de partículas

Las costaneras fueron procesadas en una viruteadora de cuchillos para obtener partículas con una dimensión promedio de 20 mm de longitud, ancho variable y espesor de 0,25 mm. Desde la viruteadora las partículas fueron transferidas por un sistema neumático de ciclones a la secadora de suspensión Keller, donde fueron secadas a un contenido de humedad final de 4%.

Coefficiente de esbeltez

De manera aleatoria se tomaron 30 g de las partículas secas para determinar su geometría y tamaño, éstas se clasificaron de manera visual en tres categorías de tamaño: grandes, medianas y pequeñas. Cada categoría fue pesada y se tomaron 30 muestras de cada una. Con un vernier digital de 0,02 mm (0,0001 pulgadas) de resolución, se midió largo, ancho y espesor de las partículas y se determinó su coeficiente de esbeltez (E), con la ecuación (2). La proporción de participación de cada categoría de tamaño de partícula para conformar el tablero, se determinó mediante su peso.

$$E = \left(\frac{L}{e} \right) \quad (2)$$

donde:

E = coeficiente de esbeltez.

L = longitud de las partículas (mm).

e = espesor de las partículas (mm).

Componentes para la fabricación de los tableros

Se utilizaron los siguientes insumos: partículas de *P. patula* a 4% de contenido de humedad, adhesivo urea formaldehído (UF) a 60% de sólidos con viscosidad = 250 cP, pH = 8,5 y como catalizador una solución de sulfato de amonio al 30% (p/p) de concentración, la cantidad de catalizador corresponde al 8% (p/p) de la cantidad de adhesivo aplicada a cada tablero. Se fabricaron cinco tableros homogéneos para cada nivel de densidad.

Encolado de las partículas

El encolado de las partículas secas a 4% se realizó por el método de aspersión a 0,203 MPa (2 atm) por un tiempo de 8 minutos en una encoladora Drais usando una carga de adhesivo UF catalizado de 12 % respecto al peso seco de las partículas.

Formación del colchón, proceso de pre-prensado y prensado del tablero de partículas

Luego de encoladas las partículas fueron distribuidas, manualmente, sobre una lámina de aluminio previamente parafinada y humectada con agua. Para retener las partículas en todos los costados del colchón se utilizó un marco o formaleta de madera. Una vez conformado el colchón de partículas se aplicó una carga

de aproximadamente 785 N (80 kg) a temperatura ambiente con la finalidad de compactar y disminuir el espesor, evitando la deformación del tablero en el proceso de prensado. Finalmente, para obtener los dos niveles de densidad en los tableros de partículas se aplicaron los respectivos ciclos de prensado (Fig. 1) en una prensa Becker van Huller bajo las siguientes condiciones operacionales: presión específica sobre el tablero: 3,05 MPa (31,14 kg cm⁻²), presión manométrica de la prensa simple: 14,71 MPa (150 kg cm⁻²), temperatura de los platos de la prensa: 180 °C a 200 °C, tiempo de prensado total: 9 min para densidad teórica 650 kg m⁻³ y 18 min para densidad teórica 750 kg m⁻³.

Acondicionamiento y dimensionado de los tableros

Los tableros fabricados fueron almacenados en un cuarto de acondicionamiento a 20 °C ± 1 °C y una humedad relativa de 65% ± 2%. Los tableros permanecieron bajo esas condiciones hasta que alcanzaron un contenido de humedad de equilibrio de 12% aproximadamente. Luego los tableros fueron dimensionados en una sierra circular con escuadría de 500 mm x 500 mm, conservando el espesor de prensado de 19 mm.

Ensayos físicos y mecánicos de los tableros

A partir de los tableros dimensionados se obtuvieron 10 probetas para cada uno de los ensayos, según las normas DIN (1965^{a, b, c, d y e}). Los ensayos físicos fueron: contenido de humedad, densidad del tablero, absorción por inmersión en agua y variación de espesor por inmersión en agua a 2 y 24 horas. Los ensayos mecánicos fueron: resistencia a flexión estática (módulo de ruptura, MOR) y tensión per-

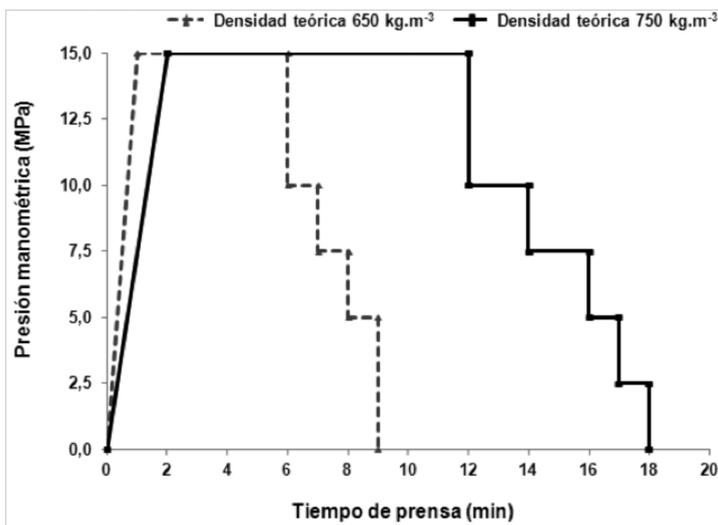


Figura 1. Diagrama del ciclo de prensado aplicado para densificar los tableros homogéneos de partículas de *Pinus patula* a las densidades teóricas propuestas.

pendicular a la superficie del tablero (adhesión interna) usando una máquina universal Instron y una velocidad de ensayo de 5 mm/min para ambos ensayos. La evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros se realizó según lo estipulado por la norma venezolana COVENIN (1991) y alemana DIN (1981), utilizadas para tableros de partículas de madera de uso general con prensado plano.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño con un sólo factor (densidad) con dos niveles categóricos y seis variables respuesta (absorción de agua a 2 h y 24 h, variación de espesor o hinchamiento a 2 h y 24 h, módulo de ruptura en flexión estática y tensión paralela a la superficie del tablero).

El análisis de varianza (ANDEVA) se realizó con un nivel de confianza $\alpha = 0,05$ y con el software estadístico Design Expert® V 8.0.

RESULTADOS

Análisis de varianza (ANDEVA) de un solo factor

El ANDEVA (Tabla 1) indica que el factor densidad del tablero es significativo para todas las variables respuesta. La probabilidad normal de residuales de los datos obtenidos en todas las variables respuesta cumple con el supuesto de normalidad, no se observaron fluctuaciones significativas de las muestras ensayadas ni datos atípicos. La proporción de variabilidad de cada parámetro respuesta es explicada por el modelo estadístico mediante el valor de R^2 . Por otra parte, el valor R^2 ajustado indica que el número de factores presentes en el modelo es adecuado, por lo tanto, ambos confirman la validez del ANDEVA.

En la figura 2 se modela el efecto del factor densidad sobre las propiedades físico-mecánicas determinadas para los tableros aglomerados de *P. patula*.

Tabla 1. Valor-*p* para las variables respuesta.

| Factor | Valor- <i>p</i> * ($\alpha = 0,05$) | | | | | |
|-------------|---------------------------------------|----------|--------|--------|----------|--------|
| | ABS 2h | ABS 24h | VE 2h | VE 24h | MOR | TPST |
| Modelo | < 0,0001 | < 0,0001 | 0,0002 | 0,0022 | < 0,0001 | 0,0002 |
| Densidad | < 0,0001 | < 0,0001 | 0,0002 | 0,0022 | < 0,0001 | 0,0002 |
| R2 | 0,9964 | 0,9881 | 0,8371 | 0,7103 | 0,9768 | 0,8347 |
| R2 ajustado | 0,9959 | 0,9867 | 0,8167 | 0,6741 | 0,9739 | 0,8140 |

FUENTE: software estadístico Design Expert® V 8.0

ABS= absorción de agua a 2 y 24 h; VE= variación de espesor a 2 y 24 h; MOR= módulo de ruptura en flexión estática; TPST= tensión perpendicular a la superficie del tablero

* Valor-*p* < 0,05 indica que los términos del modelo son significativos.

* Valor-*p* > 0,05 indica que los términos del modelo no son significativos.

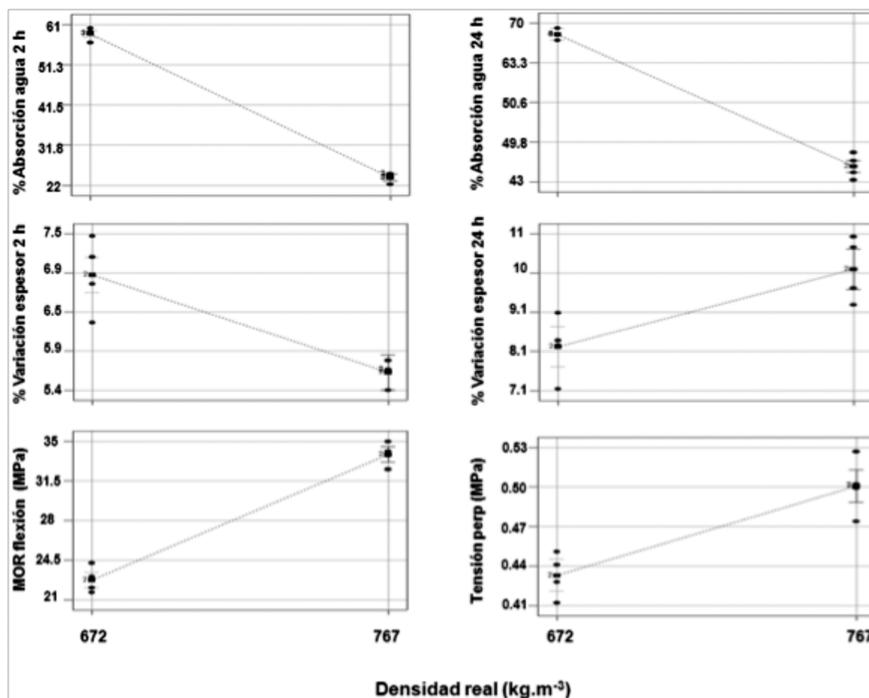


Figura 2. Modelamiento con software Design Expert® del efecto del factor densidad sobre las propiedades físico-mecánicas de los tableros homogéneos de *Pinus patula*.

Densidad de la madera de *P. patula* y tableros de partículas

Los valores de la densidad promedio obtenidos para madera sólida utilizada como materia prima para la fabricación de tableros aglomerados de partículas, se presentan en la tabla 2. Los intervalos de densidad y coeficientes de variación para los tableros se muestran en la tabla 3.

Una comparación entre la densidad teórica y la real de los tableros de partículas y madera sólida de *P. patula* se presenta en la figura 3.

Coefficiente de esbeltez

Los valores promedio de participación de cada intervalo de partículas de *P. patula* seleccionado y su respectivo coeficiente de esbeltez se muestran en la tabla 4.

El valor promedio del coeficiente de esbeltez para las partículas de *P. patula* (148,92) se encuentra dentro del intervalo de esbeltez comprendido entre 120 y 200, intervalo que es considerado por Moslemi (1974), Medina (1975), Peredo (1988), Garay (1997) y Moreno *et al.* (2002), como óptimo para la elaboración de tableros de partículas con propiedades físicas y mecánicas aceptables.

Tabla 2. Densidad promedio para la madera sólida de *Pinus patula* utilizada para la fabricación de tableros aglomerados de partículas.

| Condición | Densidad promedio (kg m^{-3}) | Coefficiente de variación (%) | Contenido de humedad (%) |
|---------------|--|-------------------------------|--------------------------|
| Verde | 684 | 4,4 | 30,50 |
| Seca al aire | 668 | 6,2 | 13,31 |
| Seca al horno | 618 | 5,3 | ----- |

Tabla 3. Densidad promedio y coeficiente de variación de los tableros aglomerados de partículas de *Pinus patula*.

| Densidad real promedio (kg m^{-3}) | Coefficiente de variación (%) |
|---|-------------------------------|
| 672 | 3,25 |
| 767 | 2,88 |

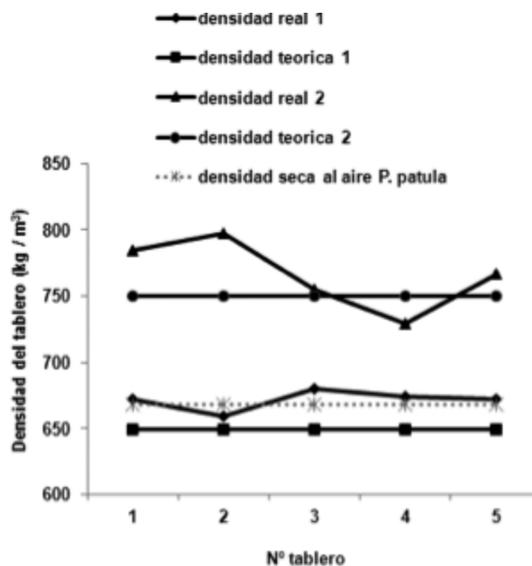


Figura 3. Comparación entre densidad teórica y real obtenida para los tableros homogéneos de partículas y la densidad de la madera sólida seca al aire de *Pinus patula*.

Tabla 4. Coeficiente de esbeltez (E) de las partículas de *Pinus patula*.

| Rango de tamaño en ancho (mm) | Proporción en peso (%) | Largo (mm) | Espesor (mm) | E |
|-------------------------------|------------------------|------------|--------------|--------|
| > 18 | 60,00 | 41,07 | 0,23 | 178,56 |
| 9 – 18 | 27,50 | 29,62 | 0,22 | 134,63 |
| < 9 | 12,50 | 29,39 | 0,22 | 133,59 |
| Promedio | 100 | 26,69 | 0,22 | 148,92 |

Absorción de agua por inmersión

En las figuras 4a y 4b, se presenta el comportamiento de la absorción de agua, por inmersión a 2 y 24 horas, de los tableros a ambas densidades y de acuerdo con la norma COVENIN (1991)

que solicita 25% y 60% de absorción para 2 horas y 24 horas, respectivamente. Los tableros con densidad de $672 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y absorción de agua a 2 y 24 horas no cumplen con lo solicitado por la norma. Mientras que, los tableros con densidad de $767 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ sí lo cumplen.

Variación de espesor por inmersión en agua

En las figuras 4c y 4d, se presenta el comportamiento de la variación de espesor por inmersión en agua a 2 y 24 horas de los tableros con ambas densidades y de acuerdo con las normas COVENIN (1991) y DIN (1981) que solicitan una variación no mayor a 6% y 15 % a 2 horas y 24 horas, respectivamente. Los tableros con densidad de 672 kg m⁻³ no cumplen con la exigencia de la norma COVENIN (1991) para la variación de espesor por inmersión en agua a 2 horas, pero sí cumplen los requerimientos para la variación de espesor a 24 horas.

Los tableros con densidad de 767 kg m⁻³ sí cumplen con lo solicitado por las normas para la variación de espesor por inmersión en agua a 2 y 24 horas.

Flexión estática (MOR)

En la figura 5a, se presentan los valores del MOR en flexión estática de los tableros de *P. patula* para ambas densidades. Los tableros con densidad de 672 kg m⁻³ y 767 kg m⁻³ superan en 23% y 52 %, respectivamente, al valor mínimo de 17,16 MPa (175 kg cm⁻²) establecido por las normas COVENIN (1991) y DIN (1981).

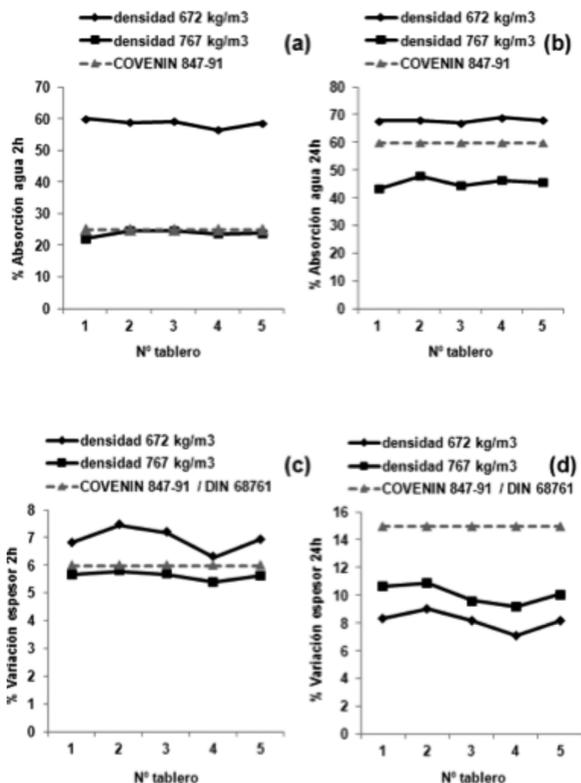


Figura 4. Absorción de agua por inmersión (a) 2 h (b) 24 h y variación de espesor o hinchamiento por inmersión en agua (c) 2 h (d) 24 h. Para tableros homogéneos de partículas de *Pinus patula*. De acuerdo a las normas COVENIN (1991) y DIN (1981).

Tensión perpendicular a la superficie del tablero

En la figura 5b se presentan los valores obtenidos para la tensión perpendicular a la superficie de los tableros de *P. patula* para ambas densidades. Los tableros con densidad de $672 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $767 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ superan en 19 % y 30 %, respectivamente, al valor mínimo de $0,34 \text{ MPa}$ ($3,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) solicitado por las normas COVENIN (1991) y DIN (1981).

DISCUSIÓN

El ciclo de prensado permitió obtener tableros con valores similares a la densidad de la madera seca al aire de *P. patula*. Sin embargo, aun cuando en la conformación del producto participe una sola especie, la variabilidad de la densidad dentro y entre tableros es posible, situación que menciona en su investigación Moreno *et al.* (2005) con tableros de partículas de ramas de *Fraxinus americana*. No

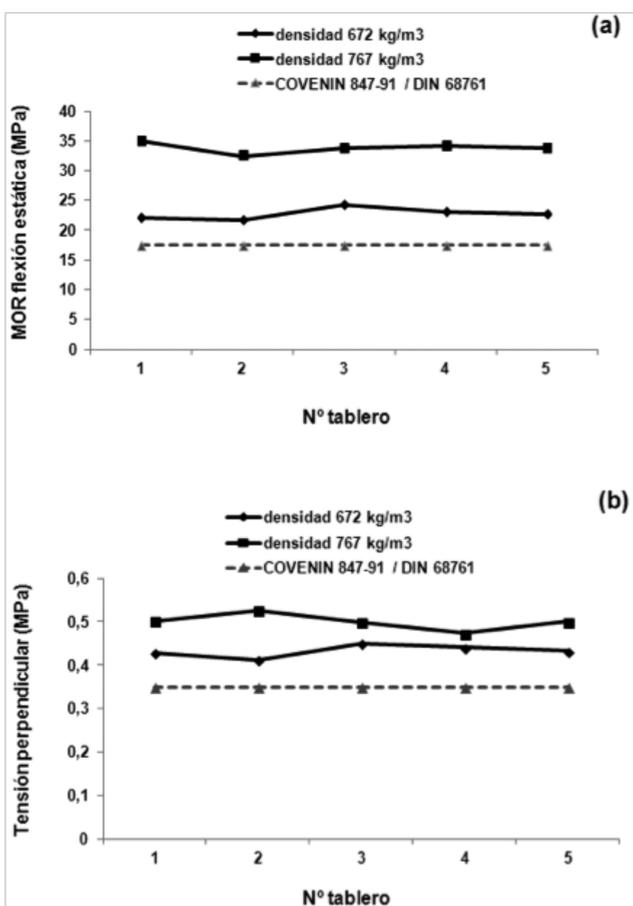


Figura 5. (a) Módulo de ruptura (MOR) promedio en flexión estática y (b) adhesión interna promedio para tableros homogéneos de partículas de *Pinus patula*. De acuerdo a normas COVENIN (1991) y DIN (1981).

obstante, los coeficientes de variación determinados para la densidad de los tableros de *P. patula* indican una buena distribución de las partículas en el producto final, de acuerdo con lo propuesto por Durán (1981).

La densidad del tablero es una medida de la compactación individual de una partícula dentro del tablero y es dependiente, principalmente, de la densidad de la madera y la presión aplicada durante el prensado (Rocha *et al.*, 1974). Un incremento en la densidad del tablero resulta en una mejor eficiencia de la resina, debido a la mejora de uniones adhesivas entre partícula y adhesivo (Gatchell *et al.*, 1966). Por ejemplo, Poblete y Peredo (1990) lograron establecer, para tableros de partículas con especies nativas chilenas, ecuaciones de regresión lineal entre la propiedad de flexión y densidad, logrando producir tableros de partículas con densidad de $650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ que cumplieron con el valor mínimo de $15,99 \text{ MPa}$ (163 kg cm^{-2}) solicitado por la norma DIN (1965°).

De acuerdo con Rocha *et al.* (1974), la densidad de la madera de la especie influye en el consumo de adhesivo y la rugosidad superficial del tablero. El usar especies que tengan una alta densidad provoca una disminución de la resistencia mecánica del tablero ya que habría poca tasa de compresibilidad de las partículas, provocando el aumento de la expansión lineal e hinchamiento del espesor en el tablero.

Independiente del tiempo de inmersión, el incremento de la densidad del tablero produce una disminución en la absorción de agua, comportamiento que señalan (Rocha *et al.*, 1974; Durán, 1982; Poblete y Peredo, 1990; Moreno *et al.*, 2002) para tableros de partículas. Esta tendencia se debe a que una mayor densificación produce una disminución en la

porosidad del tablero, menor cantidad de espacio vacío entre partículas y adhesivo, lo que impide la penetración del agua. Así lo demuestran las investigaciones de Durán (1981 y 1982); Poblete y Peredo (1990); Maloney (1993) y Moreno *et al.* (2005), quienes indican que la facilidad de absorción de agua está en función de la relación de compresibilidad del tablero, eficiencia del adhesivo y la facilidad de penetración del fluido (permeabilidad del tablero) por los espacios existentes entre partículas. Relaciones de compresibilidad bajas permiten al tablero absorber más humedad en comparación con tableros con alta tasa de compresibilidad.

Los tableros encolados con adhesivo UF no son aptos para uso a la intemperie (Peredo y Torres, 1991) una exposición prolongada a la humedad lleva a la ruptura de los enlaces que forman la adhesión entre los grupos activos de la madera (partículas) y el adhesivo (Stark *et al.*, 2010) afectando sus propiedades físico-mecánicas. Un calor excesivo también produce una degradación química del fraguado de la resina UF, por lo que, típicamente los tableros son enfriados rápidamente luego de finalizado el ciclo de prensado (Stark *et al.*, 2010).

La variación de espesor para los tableros de baja densidad se debe a la facilidad de penetración del agua en los capilares y espacios entre partículas, originando un mayor hinchamiento de la masa de partículas a este nivel de densidad. En los tableros de mayor densidad existe un mayor grado de compresibilidad, contribuyendo a disminuir el grado de higroscopicidad de las partículas de madera.

Los porcentajes de variación en espesor después de 24 horas de inmersión obtenidos para los tableros de *P. patula* son similares a los encontrados por Moreno *et al.* (2005) en tableros con parti-

culas de *F. americana* a dos niveles de densidad ($600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ - $800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) y por Guler *et al.* (2008) en tableros de partículas de *Pinus nigra* con una densidad de $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Por otra parte, los resultados aquí obtenidos para la variación de espesor a 24 horas de inmersión están en concordancia con lo que exponen Durán (1981) y Moreno *et al.* (2005 y 2010) que, a mayor densidad del tablero, mayor será el hinchamiento; pero es contrario a lo mencionado por Poblete y Peredo (1990) quienes no encontraron una correlación adecuada entre hinchamiento y densidad del tablero.

Aumentar el tiempo de inmersión a 24 horas permite saturar paredes celulares que por su bajo contenido de humedad tienen capacidad de absorción produciendo un hinchamiento en las partículas, manifestándose finalmente en la variación del espesor del tablero. Como se ha mencionado anteriormente existe variación de la densidad dentro del tablero, por lo que el hinchamiento del tablero tampoco será uniforme, es decir, el tablero se deforma y pierde estabilidad dimensional.

El hinchamiento del espesor está directamente afectado por muchas variables de proceso, pero las interacciones entre las variables pueden cambiar este comportamiento, por ejemplo, la durabilidad del tablero depende de hinchamientos bajos siendo una práctica aplicar un alto contenido de resina adhesiva para controlar el hinchamiento del tablero. Sin embargo, Halligan (1970), menciona que varias investigaciones sobre la eficiencia de los tratamientos para el control del hinchamiento han dado resultados contradictorios y propone que un vaporizado post-tratamiento parece ser una opción prometedora. Al respecto, Peredo y Torres (1991), indican en su investigación que la

aplicación de agentes hidrófobos reduce el efecto negativo de la humedad sobre la resina UF, disminuyendo significativamente la absorción de humedad e hinchamiento del tablero de partículas y en consecuencia mejorando las propiedades mecánicas del mismo.

Gatchell *et al.* (1966), así como Roffael y Rauch (1972), exponen que incrementando la densidad del tablero podrían esperarse mayores hinchamientos; sin embargo, de acuerdo con Lehmann (1960), el beneficio de obtener aumento de la resistencia mecánica es razón suficiente para compensar la tendencia de hinchamiento.

El módulo de ruptura es aceptado como una medida de esfuerzo y representa la carga máxima de un miembro que sometido a flexión llega a su fractura (Cai y Ross, 2010). Sin embargo, la resistencia al esfuerzo en flexión debe ser considerada hasta el límite elástico, para efectos de seguridad (McNatt, 1973). Mientras que, la adhesión interna o tensión perpendicular determina la resistencia del tablero a la delaminación o separación de sus capas (Cai y Ross, 2010).

El MOR en flexión estática se incrementa a mayor densidad del tablero, esto se debe entre otros factores a una mayor eficiencia en la distribución de la resina y a un mejor contacto entre partículas-adhesivo, así como también a una mayor densificación de las partículas (mayor razón de compresibilidad), disminuyendo el volumen de espacios vacíos. Esto conlleva a que el tablero de mayor densidad transmita los esfuerzos de partícula a partícula de manera más uniforme traduciéndolos en un aumento de la resistencia mecánica (Durán, 1981; Maloney, 1993 y Bazyar *et al.*, 2011).

En general, el MOR en flexión obtenido en este estudio con los tableros de

ambas densidades (Fig. 5a) supera al intervalo de MOR de 15,20 MPa - 21,97 MPa (155 kg cm^{-2} - 224 kg cm^{-2}) encontrado por Cai y Ross (2010) para tableros de partículas tipo industrial con densidad de 690 kg m^{-3} .

En cuanto a la tensión perpendicular a la superficie del tablero (TPST), aumenta a medida que se incrementa la densidad del tablero y la relación de compresibilidad. Esto se puede atribuir al mayor contacto relativo entre las partículas y la mayor eficiencia de la resina, así como también a que se logra una densificación mayor en el centro del tablero debido al mayor volumen de partículas a ser prensadas. Por lo tanto, el gradiente de densidad en el espesor del tablero es menos variable que en el caso de los tableros de menor densidad (Durán, 1982; Maloney, 1993 y Moreno *et al.*, 2002).

En general, la adhesión interna obtenida en este estudio con los tableros de ambas densidades está dentro de los intervalos mencionados por Cai y Ross (2010), de 0,314 MPa - 1,177 MPa ($3,2 \text{ kg cm}^{-2}$ - $12,0 \text{ kg cm}^{-2}$) para tableros de partículas de tipo industrial con densidad de 690 kg m^{-3} , y el intervalo de 0,314 MPa - 0,490 MPa ($3,2 \text{ kg cm}^{-2}$ - $5,0 \text{ kg cm}^{-2}$) encontrado por Guler *et al.* (2008) para tableros de partículas con una densidad de 700 kg m^{-3} fabricados con residuos de *Pinus nigra*.

Finalmente, el modelamiento con el software estadístico Design Expert con una confiabilidad de 95% indica que, a mayor densidad, disminuye la absorción de humedad a ambos tiempos de inmersión, aumenta el hinchamiento o variación del espesor a 24 horas de inmersión. Los esfuerzos en flexión estática y tensión perpendicular (adhesión interna) también aumentan. Estos resultados son coincidentes con lo presentado en las figuras 4 y 5.

CONCLUSIONES

Como se demostró en el análisis de varianza y en los resultados obtenidos, la densidad del tablero es un factor que influye de manera directa sobre las propiedades físico-mecánicas de un tablero aglomerado de partículas.

El aprovechamiento de los residuos industriales de la especie *Pinus patula*, mostró buenos resultados y propiedades tecnológicas adecuadas para su transformación en un producto de ingeniería como el tablero homogéneo de una capa de partículas con densidad media. Los tableros de este estudio cumplieron con los valores mínimos solicitados por las normas, en particular, para las propiedades mecánicas de MOR y adhesión interna. Sin embargo, los porcentajes de absorción de humedad y variación de espesor en algunos casos no cumplieron con los valores mínimos aceptados por norma.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el tablero homogéneo de partículas de *P. patula* con una densidad de 767 kg m^{-3} presentó las mejores características en cuanto a propiedades mecánicas de MOR, adhesión interna y mejor comportamiento en la absorción de humedad a 2 y 24 horas y variación de espesor a 2 horas.

Finalmente, los tableros aglomerados de partículas de *P. patula* homogéneos de una capa, encolados con urea-formaldehído y de ambas densidades poseen buena resistencia mecánica y adhesión interna, por lo que se recomienda su uso en partes internas de muebles y gabinetes, como material decorativo superpuesto sobre otros materiales, como recubrimiento interno de casas prefabricadas, entre otros usos; siempre y cuando el tablero preste su servicio en sitios con poca o nula exposición directa a la humedad.

REFERENCIAS

- Alma, M., H. Kalaycroglu, I. Bektas y A. Tutus. 2004. Properties of cotton carpet based particleboards. *Industrial Crops and Products* 2:141-149.
- Blanchet, P., A. Cloutier y B. Rield, B. 2000. Particleboard made from hammer milled black spruce bark residues. *Wood Science and Technology* 34(1):11-19.
- Bazyar, B., A. Tichi y H. Rangavar. 2011. Particleboard made from fast growing Aspen wood and old rail road ties. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 5(8):548-553.
- Cai, Z y R. Ross. 2010. Mechanical properties of wood-based composite materials. *In*: R. J. Ross, ed. *Wood handbook-Wood as an engineering material*. Centennial edition. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, EUA. 12 p.
- COVENIN (Comisión Venezolana de Normas Industriales). 1991. Norma venezolana para tableros de partículas de madera (provisional) COVENIN-847-91. Ministerio de Fomento. Caracas-Venezuela.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 1965a. Testing of wood chipboards; general requirements, sampling, evaluation. German National Standard. Standard DIN 52360.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 1965b. Testing of wood chipboards; determination of dimensions, raw density and moisture content. German National Standard. Standard DIN 52361. 2p.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 1965c. Testing of wood chipboards; bending test, determination of bending strength. German National Standard. Standard DIN 52362. 2p.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 1965d. Testing of wood chipboards; determination of variation in thickness due to moisture. German National Standard. Standard DIN 52364. 1 p.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 1965e. Testing of wood chipboards; determination of tensile strength vertical to the chipboard plane. German National Standard. Standard DIN 52365. 1 p.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 1976. Testing of wood; determination of density. German National Standard. Standard DIN 52182. 3 p.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 1981. Particle boards; flat pressed boards for general purposes; FPO-board. German National Standard. Standard DIN 68761.
- Durán, J. 1981. Utilización de los aclareos de las especies de la plantación de Caparo para tableros aglomerados de partículas: Parte I, Teca. Universidad de Los Andes, Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida, Venezuela. 77 p.
- Durán, J. 1982. Utilización de los aclareos de las especies de la plantación de Caparo para tableros aglomerados de partículas: Parte II, Gmelina. Universidad de Los Andes, Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida, Venezuela. 44 p.
- Garay, D. 1997. Tableros aglomerados de partículas. Laboratorio Nacional de

- Productos Forestales, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Garay, M., F. MacDonald, M. Acevedo, B. Calderón y J. Araya. 2009. Particleboard made with crop residues mixed with wood from *Pinus radiata*. *BioResources* 4(4):1396-1408.
- Gatchell, G., B. Heebink y F. Hefty. 1966. Influence of component variables on the properties of particleboard for exterior use. *Forest Products Journal* 16(4):46-59.
- Ginzel, C y W. Peraza. 1966. Tecnología de tableros de partículas. Instituto de Investigación y Experiencias. Madrid. 185 p.
- Guler, C., Y. Copur y C. Tascioglu. 2008. The manufacture of particleboard using mixture of peanut hull (*Arachis hypogaeae* L.) and European black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood chip. *Bioresource Technology* 99(8): 2893-2897.
- Halligan, A. 1970. A review of thickness swelling in particleboard. *Wood Science and Technology* 4(4):301-312.
- Latibari, A y M. Roohnia. 2010. Potential of utilization of the residues from Poplar plantation for particleboard production in Iran. *Journal of Forestry Research* 21(4):503-508.
- Lehmann, F. 1960. The effects of moisture content, board density and press temperature on the dimensional and strength properties of flat-pressed flakeboard. *School Forestry*, North Carolina State Univ., Raleigh, N.C. 106 pp.
- Maloney, T. 1993. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. Miller Freeman Inc., San Francisco, California, EUA. 686 p.
- McNatt, J. 1973. Basic engineering properties of particleboard. Res. Pap. FPL-206. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 14 p.
- Medina, A. 1975. Seminario sobre proceso de fabricación de tableros de partículas de madera. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida-Venezuela.
- Moreno, P., J. Durán, y D. Garay. 2002. Efecto de las Sales CCA sobre las propiedades físicas y mecánicas en tableros de partículas de pino caribe. *Revista Forestal Latinoamericana* 17 (1):1-34.
- Moreno, P., J. Durán, D. Garay, S. Valero, T. Shakespeare y R. Nieto. 2005. Utilización de la madera de *Fraxinus americana* (fresno) en la fabricación de tableros de partículas. *Revista Theoria* 14(2):57-64.
- Moreno, P., J. Durán, D. Garay y S. Valero. 2010. Utilización de tallos de *Guadua angustifolia* en la fabricación de tableros de partículas. *Forest Systems* 19(2):241-248.
- Moslemi, A. 1974. Particleboard. Vol. I Materials. Southern Illinois University Press. 239 p.
- Peredo, M y H. Deppe. 1984. Zur Verwendung von Biomasse bei der Herstellung von Holzspanplatten für das Bauwesen. *Forstarchiv* 55(2):65-70.

- Peredo, M. 1988. Fabricación de tableros de partículas para uso exterior. *Bosque (Valdivia)* 9(1):35-42.
- Peredo, M y E. Torres. 1991. Fabricación de tableros de partículas con desechos industriales. *Bosque (Valdivia)* 12(1):49-57.
- Pedieu, R., B. Riedl y A. Pichette. 2008. Physical and mechanical properties of panel based on outer bark particles of white birch: mixed panels with wood particles versus wood fibres. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 10(3):195-206.
- Poblete, H y M. Peredo. 1990. Tableros de desechos del debobinado de especies chilenas. *Bosque (Valdivia)* 11(2):45-58.
- Poblete, H y J. Sánchez. 1991. Tableros con corteza de *Pinus radiata*. *Bosque (Valdivia)* 12(1):17-26.
- Rocha, B., W. Lehmann y R. Sidney. 1974. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. *Forest Product Journal* 24(12):37-45.
- Roffael, E y W. Rauch. 1972. Influence of density on the swelling behavior of the phenolic resin bonded particle-boards. *Holz als Roh-und Werkstoff* 30(1):178-181.
- Stark, N., Z. Cai y C. Carll. 2010. Wood-based composite materials panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials. In: R.J. Ross, ed. *Wood handbook—Wood as an engineering material. Centennial edition. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, EUA* p:1-28.
- Suchsland, O y H. Xu. 1989. A Simulation of the horizontal density distribution in a flake-board. *Forest Products Journal* 39 (5):29-33.
- Van Niekerk, I y A. Pizzi. 1994. Characteristic industrial technology for exterior *Eucalyptus* particleboard. *Holz als Roh-und Werkstoff* 52(2):109-112.
- Zheng, Y., R. Pan, B. Jenkins y S. Blunk. 2006. Properties of medium-density particleboard from saline Athel wood. *Industrial Crops and Products* 23(3):318-326.

Manuscrito recibido el 23 de julio de 2012.

Aceptado el 13 de junio de 2013.

Este documento se debe citar como:

Zambrano, L., P. Moreno, F. Muñoz, J. Durán, D. Garay y S. Valero. 2013. Tableros de partículas fabricados con residuos industriales de la madera *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 19(3):65-80.