

Artículo Original

## Efecto del densificado de la madera de *Gyrocarpus americanus* Jacq. en su módulo dinámico determinado por ondas de esfuerzo

[Effect of the densified of *Gyrocarpus americanus* Jacq. wood in its dynamic modulus established by stress waves]

Javier Ramón Sotomayor Castellanos\*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gral. Francisco J. Mugica S/N, Ciudad Universitaria, 58030 Morelia, Mich., México

\*e-mail de contacto: [madera999@yahoo.com](mailto:madera999@yahoo.com)

---

### Resumen

El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto del densificado de la madera de *Gyrocarpus americanus* en su módulo dinámico determinado por ondas de esfuerzo. La estrategia experimental consistió en realizar pruebas de ondas de esfuerzo antes y después del tratamiento de densificado. Se determinaron la densidad de la madera, la velocidad de onda, el módulo dinámico y el coeficiente de densificado. El diseño experimental consistió en pruebas de normalidad y de diferencia de medias para la densidad, velocidad de onda y módulo dinámico para antes y después densificado. Se calcularon regresiones lineales y coeficientes de determinación para la velocidad de onda y el módulo dinámico, en función de la densidad. Los principales resultados fueron: la magnitud del coeficiente de densificado fue comparable a la reportada en la bibliografía; la velocidad de onda no varió significativamente antes y después del densificado; el densificado incrementó la densidad y el módulo dinámico de la madera de *G. americanus*.

**Palabras clave:** Densidad de la madera, velocidad de onda, coeficiente de densificado.

### Abstract

The research's goal was to evaluate the effect of the densified of *Gyrocarpus americanus* wood in its dynamic modulus established by stress waves. The experimental strategy involved stress waves tests before and after densified treatment. The wood density, the speed of wave, the dynamic modulus and the coefficient of densification were established. The design of the experiment involved tests of normality and deference of means, before and after densification, for the wood density, the speed of wave and the dynamic modulus. The lineal regressions and the coefficients of determination were calculated for the speed of wave in function of the density. The principal results were: the magnitude of the coefficient of densification was similar to the one reported in the bibliography; the speed of wave did not change significantly before and after the densification; the densified increased the density and the modulus of elasticity of the *G. americanus* wood.

**Keywords:** Wood density, speed of waves, coefficient of densification.

## INTRODUCCIÓN

La madera densificada se define como aquella que su densidad ha sido incrementada de manera artificial (Sandberg y Navi, 2007). Existen tres enfoques para el densificado de la madera. El primero es el método químico que impregna los lúmenes celulares con resina (Gabrielli y Kamke, 2010). El segundo es aplicar calor, humedad y compresión en la dirección transversal de la madera hasta alcanzar niveles de deformación más allá del límite plástico (Navi y Girardet, 2000). Una tercera vía es la combinación de ambos y se hace referencia al densificado higro-termo-mecánico (Khalil *et al.* 2014).

El proceso de densificado de la madera puede ser considerado como una tecnología prometedora, amigable para el medio ambiente y que, aprovechando especies de madera de baja densidad, puede elaborar productos con valor agregado (Sheikh *et al.*, 2013).

El densificado de la madera incrementa su densidad y sus características mecánicas (Kutnar *et al.*, 2009). Además, se mejoran su estabilidad dimensional (Navi y Girardet, 2000) y su resistencia al deterioro (Navi y Heger, 2004). Sin embargo, los problemas asociados con el densificado son el colapso celular, las fracturas y la recuperación dimensional si la madera es expuesta a la humedad (Kutnar y Šernek, 2007).

Las principales variables que interactúan en el densificado higro-termo-mecánico son, por una parte, la temperatura en el rango de 150 a 190 °C (Gabrielli y Kamke, 2010) y la presión de vapor aplicadas (Navi y Girardet, 2000). Por otra parte, la compresión mecánica la cual va más allá del límite plástico provocando un reacomodo molecular que provoca nuevos enlaces químicos, resultados de la deformación excesiva de las cadenas de los polímeros que constituyen la pared celular (Navi y Girardet, 2000).

Los métodos de evaluación no destructivos son una técnica efectiva y rápida para evaluar las características de materiales. No destruyen las propiedades físicas y mecánicas ni influyen en el comportamiento futuro del material en cuestión (Liang y Fu, 2007). Particularmente, las ondas de esfuerzo poseen un importante

potencial para evaluar propiedades físicas y mecánicas de la madera sometida a tratamientos con calor y humedad (Del Menezzi *et al.* 2014).

La caracterización mecánica de la madera inutilizando ondas de esfuerzo, aprovecha la capacidad de este material para almacenar energía, en este caso, de una onda mecánica, para medir la velocidad de transmisión a la que ésta viaja. Combinando la velocidad de onda con la densidad, es posible determinar el módulo dinámico de manera no destructiva en probetas de madera (Ilic, 2003) y en piezas con dimensiones de empleo (Liang y Fu, 2007).

La técnica de ondas de esfuerzo ha sido empleada con éxito en la evaluación del efecto de tratamiento térmico en la madera de *Eucalyptus grandis* con densidad de 636 kg/m<sup>3</sup> (García *et al.* 2012). Igualmente, las ondas de esfuerzo han sido útiles para estudiar la temperatura y el contenido de humedad en madera de *Pinus radiata* con densidad de 360 a 504 kg/m<sup>3</sup> (Carter *et al.* 2006; Bächle y Walker, 2006; Xu y Wang, 2014).

La velocidad de transmisión de las ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera se sitúa en el rango de 3810 a 6240 m/s. El módulo dinámico por ondas de esfuerzo, igualmente en la dirección longitudinal, se sitúa en un intervalo de 6400 a 23800 MPa (Illic, 2003; Soares *et al.*, 2010; Da Silva *et al.* 2014). Ambos intervalos para maderas con densidades variando de 303 a 1005 kg/m<sup>3</sup>.

La especie *Gyrocarpus americanus* Jacq., es una madera endémica de México y Centroamérica (Rivera, 2007) y presenta potencial para la fabricación de productos de valor agregado (Cordero y Boshier, 2003). Sus características físicas y mecánicas están reportadas por Sotomayor (2015). No se detectó información sobre el efecto del densificado de la madera de *G. americanus* en su módulo dinámico evaluado con ondas de esfuerzo.

El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto del densificado de la madera de *G. americanus* en su módulo dinámico determinado por ondas de esfuerzo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron piezas aserradas de madera de *G. americanus* Jacq., en el estado de Michoacán, México y se prepararon 35 probetas con sección de 0,02 m x 0,02 m de sección transversal y de 0,32 m de longitud (ISO 3129:2012). Las probetas estuvieron orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respecto al plano leñoso. La madera estuvo libre de irregularidades de crecimiento y se acondicionó durante 24 meses en una cámara con una temperatura de 20 °C ( $\pm 1$  °C) y una humedad relativa del aire de 65 % ( $\pm 2$  %) hasta que alcanzó un peso constante.

La estrategia de investigación consistió en determinar la densidad y realizar pruebas de ondas de esfuerzo antes y después del tratamiento de densificado. Los coeficientes de compresión y de densificado fueron evaluados después del tratamiento. A continuación, los parámetros se identifican con el subíndice "oe" por ser derivados de pruebas de ondas de esfuerzo.

El tratamiento de densificado consistió en hidratar la madera en un baño de agua, durante 72 horas y con una temperatura de 20 °C. Posteriormente, las probetas se suavizaron durante 4 horas en un baño de agua caliente con una temperatura de 93,53 °C. El diagrama de temperatura-tiempo se muestra en la Figura 01.

Inmediatamente después, se procedió al prensado de las probetas empleando un dispositivo de densificado fabricado *ad-hoc* (Figura 02) el cual se posicionó en una máquina universal de pruebas mecánicas *Tinius-Olsen®*. La velocidad de desplazamiento de la carga fue de 1 mm/min. El tiempo de cerrado del dispositivo de densificado fue en promedio de 15 min. Durante las pruebas, se registró el diagrama carga-desplazamiento y la prueba terminó cuando se alcanzó la tasa de compresión objetivo de 56 %.

El dispositivo de densificado consistió en dos placas de acero dulce con orificios para colocar pernos, los cuales sirvieron para mantener la deformación de las probetas en las etapas de moldeado y estabilizado. En la placa inferior se colocaron barras circundantes de 0,006 m de

espesor por 0,013 m de base. Las barras funcionaron como soporte y control de la deformación cuando ésta alcanzó la tasa de compresión objetivo. Las barras ayudaron a sostener constante la deformación de las probetas y a conservar su temperatura durante las etapas de comprimido, moldeado y estabilizado.

A continuación, las probetas se moldearon durante 24 horas manteniéndolas prensadas con el dispositivo de densificado al interior de un horno de aire seco con una temperatura de 80 °C. Finalmente, las probetas se estabilizaron durante 60 días en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C ( $\pm 1$  °C) y con una humedad relativa del aire de 65 % ( $\pm 2$  %), hasta que su peso fue constante. Una vez la madera densificada y acondicionada, se procedió a realizar una segunda ronda de pruebas de ultrasonido.

El coeficiente de densificado se calculó con la fórmula (Blomberg *et al.*, 2005):

$$\lambda_{vt} = \left( \frac{\rho_{ad} - \rho_{dd}}{\rho_{ad}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

$\lambda_{vt}$  = Coeficiente de densificado (%)

$\rho_{ad}$  = Densidad de la madera antes densificado ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{dd}$  = Densidad de la madera después densificado ( $\text{kg/m}^3$ )

La densidad de la madera (ISO, 2014b) y el contenido de humedad (ISO, 2014a) se determinaron con un grupo complementario de 35 probetas con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,06 m, en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. Este grupo de probetas fue recortado de los segmentos adyacentes a las probetas destinadas al densificado.

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula:

$$CH = \frac{P_{CH} - P_a}{P_a} \times (100) \quad (2)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

$P_{CH}$  = Peso de la probeta a un contenido de humedad CH (kg)

$P_a$  = Peso de la probeta en estado anhidro (kg)

La densidad de la madera se calculó con la fórmula:

$$\rho_{CH} = \frac{P_{CH}}{V_{CH}} \quad (3)$$

Donde:

$\rho_{CH}$  = Densidad de la madera ( $\text{kg/m}^3$ )

$P_{CH}$  = Peso de la probeta a un contenido de humedad CH (kg)

$V_{CH}$  = Volumen de la probeta a un contenido de humedad CH ( $\text{m}^3$ )

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de transmisión de una onda, entre dos posiciones en los extremos de las probetas empleando el aparato *Metriguard*<sup>®</sup> (Figura 03). Se aplicó sistemáticamente un impacto elástico con la ayuda de una esfera de acero colocada en el péndulo del aparato. La esfera impacta en un mecanismo de transmisión que induce una onda de esfuerzo en la probeta, de tal forma que la onda se desplaza a través de la madera. La emisión de la onda se registró utilizando un acelerómetro colocado en un punto de apoyo de la probeta. La recepción de la onda se registró con otro acelerómetro colocado en el otro punto de apoyo al lado opuesto de la probeta. El aparato registró el tiempo de transmisión correspondiente a la distancia entre los puntos de apoyo a partir del cual se calculó la velocidad de transmisión de la onda en la madera. Los puntos de apoyo se localizaron a 0,01 m de los extremos de las probetas (Sotomayor, 2014).

El ensayo dinámico en cada probeta fue repetido tres veces y el promedio de valores fue considerado para su análisis posterior. Para la determinación del módulo dinámico antes y después de densificado, empleando la ecuación (4), se utilizaron las densidades y las velocidades correspondientes a "antes densificado" y "después densificado".

El módulo dinámico se calculó con la fórmula (Pellerin y Ross, 2002):

$$E_{oe} = v_{oe}^2 \rho_{CH} \quad (4)$$

Donde:

$E_{oe}$  = Módulo dinámico (Pa)

$v_{oe}$  = Velocidad de onda (m/s)

$\rho_{CH}$  = Densidad de la madera ( $\text{kg/m}^3$ )

#### Diseño experimental

Con la finalidad de verificar la normalidad de las distribuciones de las variables de respuesta: densidad de la madera y velocidad de onda, se calcularon el apuntalamiento y sesgo de las muestras correspondientes. Cuando la prueba de normalidad verificó que los datos provenían de distribuciones normales se diseñó un experimento siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez y de la Vara (2012). Para todas las variables de respuesta se calculó su media, desviación estándar y coeficiente de variación.

El tratamiento de densificado se consideró el factor de variación. El experimento consistió en pruebas de diferencias de medias *t* de *Student* para muestras independientes para un nivel de confianza de 95 %. La hipótesis nula  $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$  se contrastó con la hipótesis alterna  $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$ . Los subíndices 1 y 2 representan el valor de las variables de respuesta para cada uno de los dos estados de la madera: "antes densificado" (ad) y "después densificado" (dd).

Para las variables velocidad de onda y módulo dinámico se calcularon las regresiones lineales y coeficientes de determinación, en función de la densidad antes densificado y después densificado.

Se efectuaron pruebas con 32 réplicas (probetas por especie), totalizando 64 muestras observadas para cada una de las variables de respuesta. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics*<sup>®</sup>.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas de diferencias de medias permitieron rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias para la densidad ( $P < 0,0001$ ,  $\alpha = 0,05$ ), la velocidad de onda ( $P = 0,0187$ ,  $\alpha = 0,05$ ) y el módulo dinámico ( $P < 0,0001$ ,  $\alpha = 0,05$ ). De tal forma que se puede inferir que el densificado influyó de manera significativa en estos parámetros.

Los coeficientes de variación entre las variables para antes y después densificado fueron similares (Tabla 01). Es decir, el densificado no modifica de manera importante la variabilidad natural de la madera.

La densidad de la madera densificada se incrementó en un 102 % con respecto a la de la madera no densificada, la velocidad de onda disminuyó en un 2,8 % y el módulo dinámico aumentó en un 90,5 % (Tabla 01).

La densidad de la madera (antes densificado) de *G. americanus* es similar a las reportadas por Illic (2003) para diez maderas de especies (Figura 04) con densidades comprendidas en el rango de 349 a 562 kg/m<sup>3</sup>. Para fines de comparación, los números correspondientes a las especies de referencia de la Figura 04 son presentados en la Tabla 02.

La magnitud promedio de la velocidad de onda de *G. americanus* es similar a las reportadas por Yamasaki y Sasaki (2010) para madera de *Cryptomeria japonica* ( $v_{oe} = 3814$  m/s), *Chamaecyparis obtusa* ( $v_{oe} = 4628$  m/s) y *Pseudotsuga menziesii* ( $v_{oe} = 5309$  m/s). En el mismo contexto, las velocidades de onda de *G. americanus* antes y después densificado son comparativamente bajas comparadas con las de las especies de referencia de la Figura 04.

La magnitud del módulo dinámico de *G. americanus* antes densificado es menor comparativamente a la de los módulos reportados por Illic (2003) y presentados en la Figura 05. Los números correspondientes a las especies de referencia son presentados en la Tabla 02. Sin embargo, después de densificado, el valor promedio del módulo dinámico de *G. americanus* aumenta (Figura 05) y su magnitud es similar al promedio de los módulos dinámicos reportados por Illic (2003).

La velocidad de onda no mostró un efecto derivado del densificado. La dispersión de los valores de la velocidad de onda de *G. americanus* antes y después densificado no refleja una dependencia en función de la densidad. Así, sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) mostraron correlaciones débiles (Figura 06). Este resultado es comparable con el reportado por Teles *et al.* (2011) quienes encontraron bajos coeficientes de determinación ( $R^2 = 0,40$ ) entre la velocidad de ondas de esfuerzo y la densidad de la madera no densificada de *Sextonia rubra* (682 kg/m<sup>3</sup>).

Considerando por una parte que la velocidad de onda en la madera de *G. americanus* no varía por su densificado, y por otra, que su densidad sí se incrementa, se puede sugerir que es la modificación de la densidad de la madera el factor que incrementa el módulo dinámico de la madera densificada de *G. americanus*.

Este argumento se demuestra de manera explícita en la Figura 07. Los datos del módulo dinámico para la madera densificada de *G. americanus*, se explican bien por la densidad después densificado, con un coeficiente de determinación alto. Este resultado sugiere una mejora en esta característica mecánica importante para el diseño y cálculo de productos y estructuras de madera.

El coeficiente de densificado de la madera de *G. americanus* (Tabla 01) es similar al obtenido por Aleš *et al.* (2013) para *Fagus sylvatica* ( $\lambda_{oe} = 36,5$  %) y de *Picea abies* ( $\lambda_{oe} = 52,3$  %) y se sitúa en medio del intervalo  $63\% < \lambda_{oe} < 132\%$  reportado por Kutnar *et al.* (2008) para madera de *Populus deltoides* × *Populus trichocarpa* ( $\rho_{CH} = 330$  kg/m<sup>3</sup> y CH = 12 %). El coeficiente de variación de este parámetro resultó bajo. Es decir, la densidad de las probetas de madera densificada fue similar entre ellas. En la madera densificada no se observaron fisuras o zonas con madera comprimida en exceso, lo que permite inducir que el tratamiento de densificado fue uniforme y eficiente.

**Tabla 01.** Densidad de la madera, características dinámicas y de densificado de *G. americanus*.

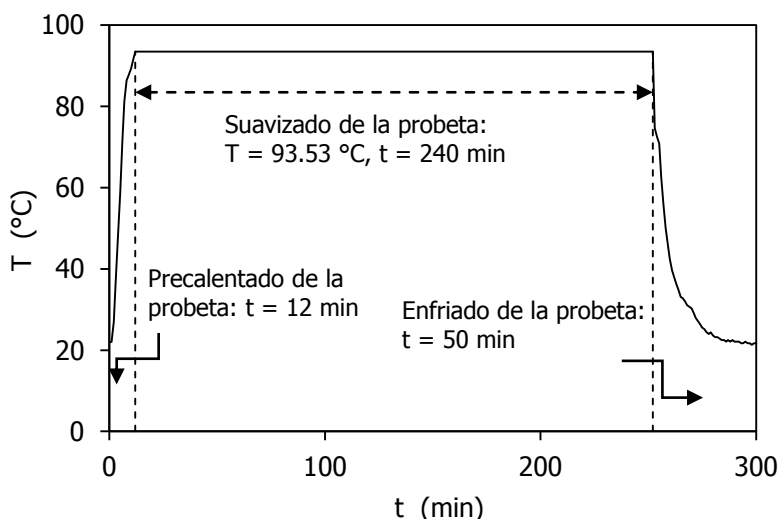
	$\rho_{CH}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{oe}$ (m/s)	$E_{oe}$ (MPa)	$\rho_{CH}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_{oe}$ (m/s)	$E_{oe}$ (MPa)	$\lambda_{oe}$ (%)
	Antes densificado			Después densificado			
$\bar{x}$	397	3463	4789	800	3367	9122	50,3
$\sigma$	28	188	697	73	143	1368	1,94
CV	7,0	5,4	14,5	9,1	4,3	15,0	3,85

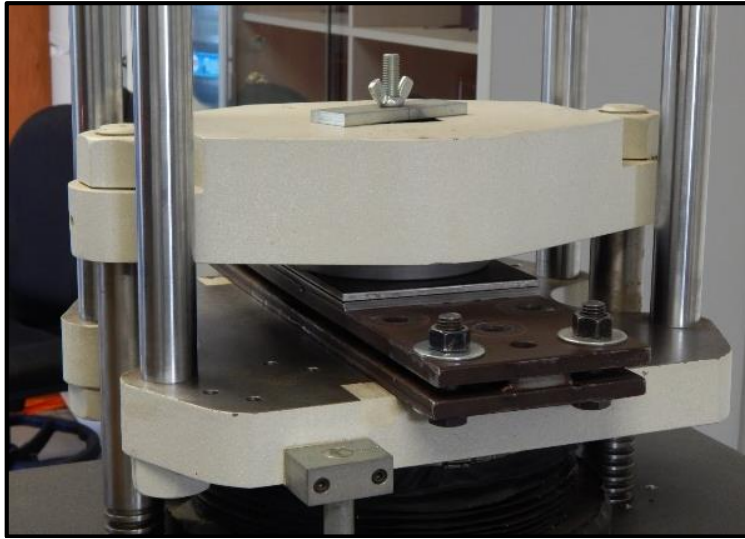
$\rho_{CH}$  = Densidad de la madera;  $v_{oe}$  = Velocidad de onda;  $E_{oe}$  = Módulo dinámico;  $\lambda_{oe}$  = Coeficiente de densificado;  $\bar{x}$  = Media;  $\sigma$  = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento.

**Tabla 02.** Especies reportadas por Illic (2003) y empleadas en las Figuras 4 y 5.

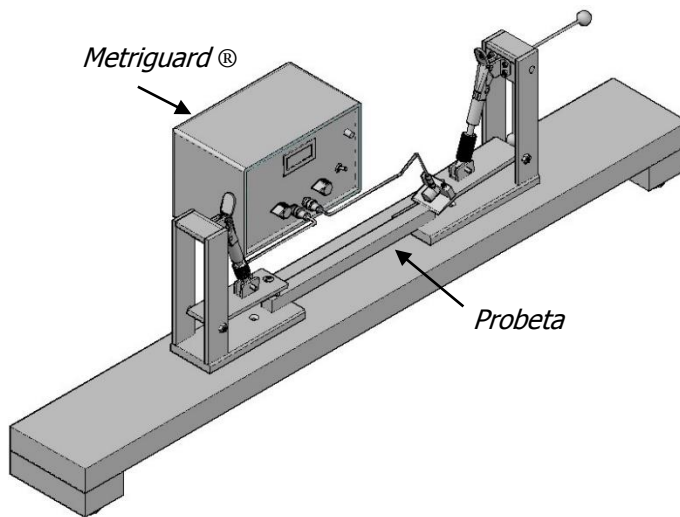
No.	Especie	$\rho_{12}$ (%)	$v_{oe}$ (m/s)	$E_{oe}$ (MPa)
1	<i>Thuja plicata</i>	349	4260	6400
2	<i>Dyera costulata</i>	379	4900	9100
3	<i>Toona sureni</i>	410	5010	10300
4	<i>Alnus glutinosa</i>	434	4790	10000
5	<i>Populus</i> sp	448	5281	13300
6	<i>Palaquium</i> spp	453	5710	14700
7	<i>Endospermum acrophyllum</i>	461	5090	11900
8	<i>Lovoa trichilioides</i>	530	4700	11700
9	<i>Palaquium amboinense</i>	535	5390	15600
10	<i>Juglans nigra</i>	562	4340	10600

$\rho_{12}$  = Densidad de la madera para un contenido de humedad de 12 %;  $v_{oe}$  = Velocidad de onda;  $E_{oe}$  = Módulo dinámico.

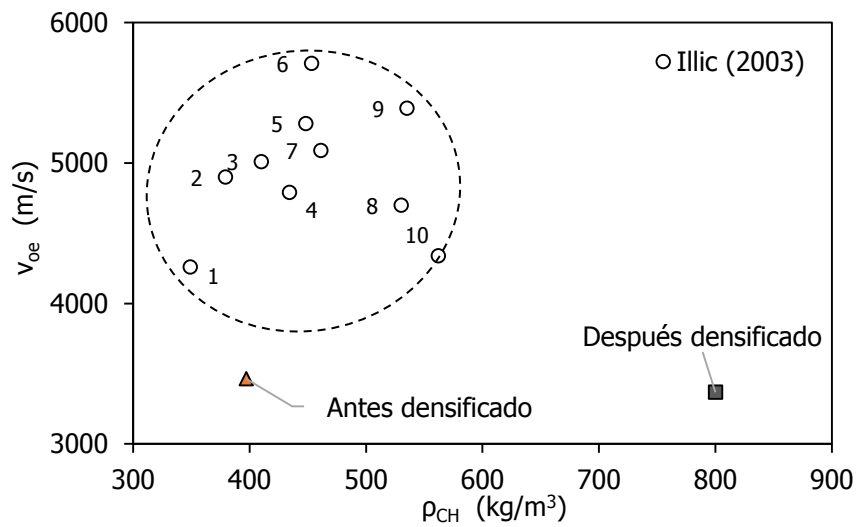
**Figura 01.** Diagrama de la temperatura ( $T$ ) en función del tiempo ( $t$ ) de las operaciones de suavizado y prensado de la madera.



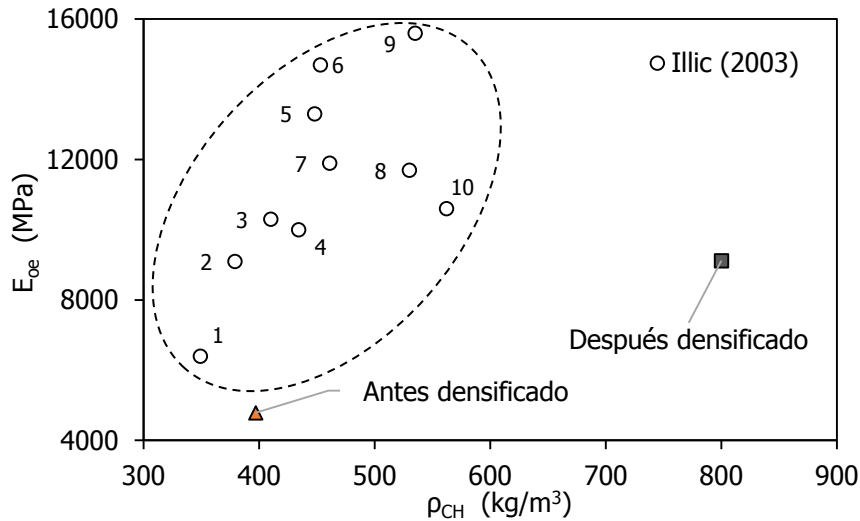
**Figura 02.** Dispositivo de densificado en la maquina universal.



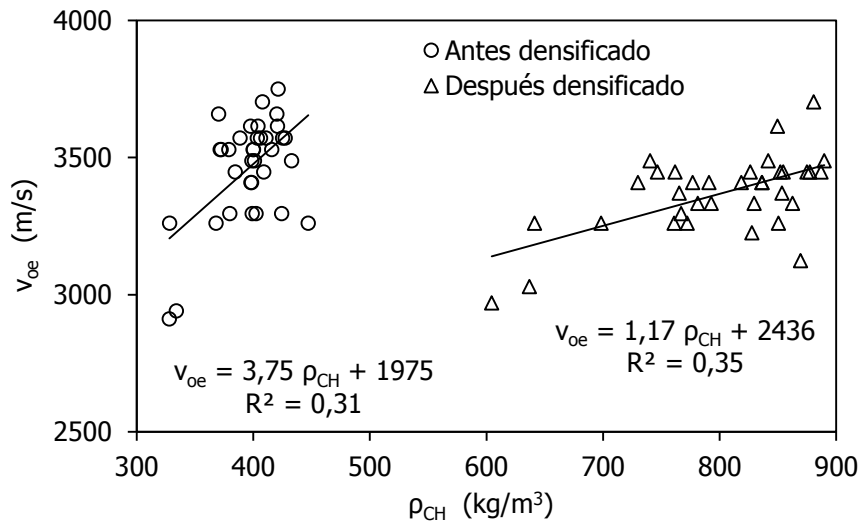
**Figura 03.** Pruebas de ondas de esfuerzo.



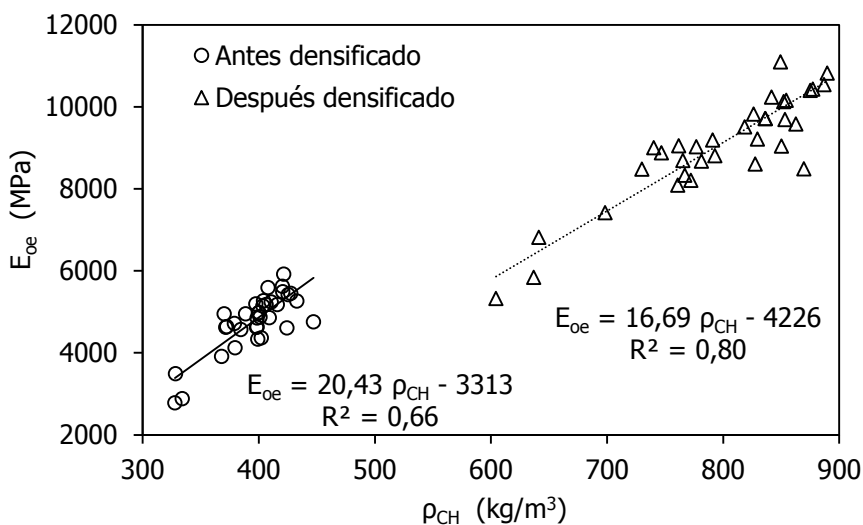
**Figura 04.** Posicionamiento de la velocidad de onda de *G. americanus* en relación con la de diez especies reportadas por Illic (2003).



**Figura 05.** Posicionamiento del módulo dinámico de *G. americanus* en relación al de las especies reportadas por Illic (2003).



**Figura 06.** Dispersión de la velocidad de onda ( $v_{oe}$ ) "antes densificado" y "después densificado" en función de la densidad de la madera ( $\rho_{CH}$ ), sus regresiones y coeficientes de determinación ( $R^2$ ).



**Figura 07.** Dispersión de la velocidad de onda ( $v_{oe}$ ) "antes densificado" y "después densificado" en función de la densidad de la madera ( $\rho_{CH}$ ), sus regresiones y coeficientes de determinación ( $R^2$ ).



## CONCLUSIONES

El coeficiente de densificado aplicado a la madera de *G. americanus* fue suficiente para lograr madera con una densidad uniforme sin detrimento de su estructura material.

El densificado de la madera de *G. americanus* incrementa el módulo dinámico determinado por ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera. En contraste, la velocidad de onda no varía por el tratamiento de densificado.

El densificado objetivo del tratamiento propuesto fue suficiente para densificar madera de *G. americanus* de manera efectiva.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleš, U., Kamke, F.A., Sernek, M., Pavlič, M. y Kutnar, A. (2013). The wettability and bonding performance of densified VTC beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) bonded with phenol-formaldehyde adhesive and liquefied wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(3), 371-379.
- Bächle, H. y Walker, J. (2006). The influence of temperature on the velocity of sound in green pine wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(5), 429-430.
- Blomberg, J., Persson, B. y Blomberg, A. (2005). Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. *Wood Science and Technology*, 39(5), 339-350.
- Carter, P., Chauhan, S. y Walker, J. (2006). Sorting logs and lumber for stiffness using DIRECTOR HM200. *Wood and Fiber Science*, 38(1), 49-54.
- Cordero, J. y Boshier, D.H. (2003). *Árboles de Centroamérica*. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Da Silva, F., Higuchi, N., Nascimento, C.C., Matos, J.L.M., de Paula, E.V.C.M. y dos Santos, J. (2014). Nondestructive Evaluation of Hardness in Tropical Wood. *Journal of Tropical Forest Science*, 26(1), 69-74.
- Del Menezzi, C.H.S., Amorim, M.R.S., Costa, M.A. y Garcez, L.R.O. (2014). Evaluation of Thermally Modified Wood by Means of Stress Wave and Ultrasound Nondestructive Methods. *Materials Science (Medziagotyra)*, 20(1), 61-66.
- Gabrielli, C.P. y Kamke, F.A. (2010). Phenol-formaldehyde impregnation of densified wood for improved dimensional stability. *Wood Science and Technology*, 44(1), 95-104.
- Garcia, R.A., Monteiro de Carvalho, A., de Figueiredo Latorraca, J.V., Monteiro de Matos, J.L., Santos, W.A. y de Medeiros Silva, R.F. (2012). Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. *Wood Science and Technology*, 46(1), 41-52.
- Gutiérrez Pulido, H. y de la Vara Salazar, R. (2011). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.
- Ilic, J. (2003). Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(3), 167-172.
- Khalil, H.P.S.A., Dungani, R., Mohammed, I.A., Hossain, M.S., Aprilia, N.A.S., Budiarso, E. y Rosamah, E. (2014). Determination of the Combined Effect of Chemical Modification and Compression of Agatis Wood on the Dimensional Stability, Termite Resistance, and Morphological Structure. *Bioresources*, 9(4), 6614-6626.
- Kamke, F.A. (2006). Densified radiata pine for structural composites. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 8(2), 83-92.
- Kutnar, A. y Šernek, M. (2007). Densification of wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 82, 53-62.
- Kutnar, A., Kamke, F.A. y Šernek, M. (2008). The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. *Holz Roh Werkst*, 66(6), 439-446.
- Kutnar, A., Kamke, F.A. y Šernek, M. (2009). Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. *Wood Science and Technology*, 43(1), 57-68.
- Liang, S. y Fu, F. (2007). Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber. *Journal of Forestry Research*, 18(4), 309-312.
- Navi, P. y Girardet, F. (2000). Effects of thermo-hygro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung*, 54(3), 287-293.

- Navi, P. y Heger, F. (2004). Combined densification and Thermo-Hydro Mechanical processing of wood. *Materials and Research Society Bulletin*, 29(5), 332-336.
- Ormondroyd, G.A., Spear, M. y Curling, S. (2015). Modified wood: review of efficacy and service life testing. *Proceedings of the ICE, Construction Materials*, 168(4), 187-203.
- ellerin, R.F. y Ross, R.J. (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Madison: Forest Products Society.
- Rivera Hernández, J.E. (2007). Notas sobre Hernandiaceae: primer registro de *Gyrocarpus americanus* Jacq. para México y de *Sparattanthelium amazonum* Mart. para Oaxaca. *Acta Botánica Mexicana*, 78, 67-76.
- Sandberg, D. y Navi, P. (2007). *Introduction to Thermo-hydro-mechanical (THM) Wood Processing*. School of Technology and Design, Växjö University. Sweden.
- Sheikh, A.A., Morén, T., Hagman, O., Cloutier, A., Fang, C. y Elustondo, D. (2013). Anatomical properties and process parameters affecting blister/blow formation in densified European aspen and downy birch sapwood boards by thermo-hydro-mechanical compression. *Journal of Materials Science*, 48(24), 8571-8579.
- Soares Del Menezzi, C.H., Rocha Silveira, R. y Rabelo de Souza, M. (2010). Predicting flexural properties of six Amazonian hardwoods using stress wave nondestructive method. *Acta Amazonica*, 40(2), 325-332.
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor Castellanos, J.R. (2014). *Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Teles, R.F., Del Menezzi, C.S., de Souza, F., y de Souza, M.R. (2011). Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: interrelationship between methods and physical-acoustical variables. *Revista Ciência da Madeira*, 2(1), 1-14.
- Yamasaki, M. y Sasaki, Y. (2010). Determining Young's modulus of timber on the basis of a strength database and stress wave propagation velocity II: effect of the reference distribution database on the determination. *Journal of Wood Science*, 56(5), 380-386.
- Xu, H. y Wang L. (2014). Analysis of cold temperature effect on stress wave velocity in green wood. *Holzforschung*, 68(6), 693-698.