

Aumento del módulo dinámico en madera densificada. Evaluación con ondas de esfuerzo en ocho especies

Increase in the Dynamic Module in Densified Wood. Evaluation with Stress Waves in Eight Species

Javier Ramón Sotomayor Castellanos,^{1*} Koji Adachi,² Ryuichi Iida³ y Tomoyuki Hayashi²

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

²Universidad Prefectoral de Akita, Noshiro, Japón.

³Universidad Politécnica en Tokio, Tokio, Japón.

*Correo de correspondencia: madera999@yahoo.com

Resumen

El objetivo de la investigación fue densificar madera de *Cupressus lindleyi*, *Cidreira odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Albergue paloescrito* y *Guazuma ulmifolia*. El densificado de la madera aumenta su densidad aparente, su velocidad de onda y su módulo dinámico; para comprobarlo, antes y después del procedimiento se tomaron medidas de estos valores. El incremento artificial de la densidad aparente y el consecuente incremento en su módulo dinámico pueden significar una ganancia tecnológica en la transformación y modificación de las propiedades intrínsecas de este material. Las ocho maderas investigadas son potencialmente candidatas al tratamiento de densificado.

Palabras clave

Densidad, velocidad de onda, ganancia tecnológica.

Abstract

The objective of the research was to densify wood of *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia paloescrito* and *Guazuma ulmifolia*. The densification of the wood increases its apparent density, its wave speed and its dynamic modulus; to verify this, before and after the procedure, measurements of these values were taken. This artificial increase in the apparent density of the wood and the consequent increase in its dynamic modulus can mean a technological gain in the transformation and modification of the intrinsic properties of this material. The eight woods investigated are potentially candidates for densified treatment.

Keywords

Density, wave speed, technological gain.

Introducción

La densidad de la madera es el parámetro de referencia en su clasificación como material de ingeniería (Forest Products Laboratory, 2010) y la característica física para predecir el módulo de elasticidad (Niklas y Spatz, 2010). La densificación de la madera es un procedimiento de modificación en el que su estructura celular se comprime en una prensa caliente para obtener un material de mayor densidad (Sandberg *et al.*, 2017). Sus propiedades elásticas, así como la densidad y especie, juegan un papel importante en el proceso de densificado. La aplicación de esta tecnología está documentada, entre otros autores, por Darwis *et al.* (2017), Pelit *et al.* (2018) y Pertuzzatti *et al.* (2018). Los autores citados siguieron protocolos de investigación originales, motivo por el cual es complicado comparar sus resultados. Para el caso particular de *Pinus radiata*, Cruz *et al.* (2018) reportaron que esta técnica produce una reducción en el volumen vacío de la madera, lo que aumenta su densidad 118% y mejora su módulo de elasticidad 57%. Por su parte, Bao *et al.* (2017) densificaron madera de *Populus tomentosa* y concluyeron que el proceso modifica su estructura microanatómica y aumenta su densidad 8%; en consecuencia, su módulo de elasticidad, determinado en flexión estática se incrementó 130%.

El módulo de elasticidad es un criterio de selección para el cálculo de productos y elementos estructurales de madera (Dinwoodie, 2002). Esta técnica es utilizada para determinar la velocidad de onda y el módulo dinámico de la madera (Yamasaki *et al.*, 2017; Vössing y Niederleithinger, 2018; Nasir *et al.*, 2019); la determinación de este último, con el empleo de ondas de esfuerzo, genera ondas de baja frecuencia que están en el rango audible. La ventaja es que pueden viajar distancias más largas y, por tanto, proporcionen un promedio de las propiedades del material en toda su sección y longitud de la pieza en estudio (Dackermann *et al.*, 2014). En este contexto, la densidad aparente y el módulo de elasticidad de una pieza de madera densificada son resultado, por una parte, de los parámetros que interactúan en el proceso, entre los principales: la temperatura de suavizado, el tiempo de compresión y el nivel de deformación aplicados (Kutnar y Šernek, 2007; Li *et al.*, 2013; Rautkari *et al.*, 2013).

Las características físicas y mecánicas de las maderas de *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King., *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Ligelsch, *Fagus mexicana* Martínez, *Dalbergia paloescrito* Rzed. & Guridi-Gómez y *Guazuma ulmifolia* Lam., están reportadas por Cordero y Boshier (2003), Tamarit y López (2007), Silva *et al.* (2010) y Sotomayor (2015). Sin embargo, su empleo como productos de utilización en ingeniería requiere de conocimientos adicionales para mejorar sus propiedades tecnológicas. La hipótesis de trabajo de esta investigación propone que el densificado de la madera aumenta su densidad aparente y su módulo dinámico. Para verificar la hipótesis, el objetivo de la investigación fue densificar madera de las ocho especies mencionadas; antes y después del densificado, valorando sus densidades aparentes, sus velocidades de onda y sus módulos dinámicos, determinados con ondas de esfuerzo.

Materiales y métodos

Las maderas en piezas aserradas fueron adquiridas en establecimientos comerciales en el estado de Michoacán, México. Para cada una de las especies se recortaron veinte probetas con dimensiones de 0.02 m × 0.02 m × 0.4 m en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20° C y humedad relativa de 65% hasta que alcanzaron el contenido de humedad en equilibrio de 9.9%.

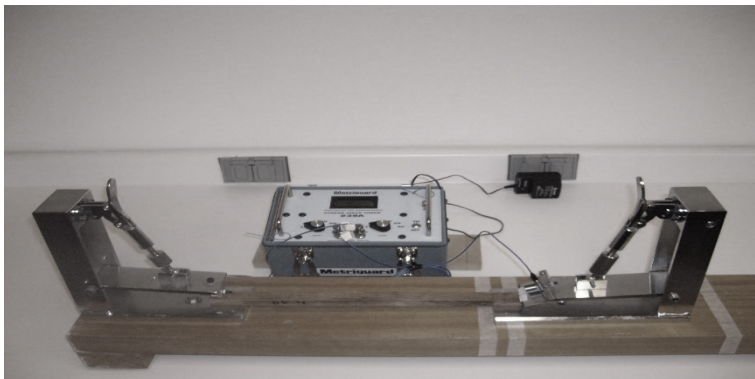
El contenido de humedad se calculó, después de las pruebas, con un grupo adicional de 20 muestras recortadas de un extremo de las probetas con dimensiones de 0.02 m × 0.02 m × 0.06 m. El contenido de humedad se determinó por el método de diferencia de pesos, de acuerdo a la norma ISO 13061-1:2014a, al igual que la densidad aparente de la madera (International Organization for Standardization, 2014b). Para aligerar el texto, el término *densidad* sustituye al concepto *densidad aparente*. En el mismo orden de ideas, las siglas AD y DD se usan como indicadores de mediciones *antes del densificado* y *después del densificado* y el subíndice *oe* se refiere a mediciones o cálculos derivados de pruebas de ondas de esfuerzo.

El proceso de densificado se realizó en el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón, y consistió en cuatro etapas: primeramente, las probetas se colocan entre dos placas térmicas de una prensa *Shon ai-Tekkko*, Modelo TS-100, con capacidad de 100 toneladas y con dimensiones de las placas térmicas de 1 m x 1 m. La operación de prensado puede idealizarse como un sistema abierto y libre de restricción geométrica en la dirección transversal a la dirección de la carga. Posteriormente, las probetas de espesor inicial de 0.02 m se comprimen en la dirección radial con una velocidad de prensado de 0.001 m min⁻¹ hasta alcanzar un espesor objetivo de 0.014 m, equivalente a 70% de su dimensión original, que representa un coeficiente de densificado de 30% (Blomberg *et al.*, 2005). La presión aplicada varía de 30 a 50 MN m⁻², dependiendo de la densidad de la madera. Luego, las probetas en la prensa son calentadas a 120° C durante seis horas. Por último, las probetas son retiradas de la prensa y enfriadas a temperatura de laboratorio (20° C) durante 12 horas.

Las pruebas de ondas de esfuerzo se realizaron en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México. Los ensayos consistieron en suministrar un impacto en la dirección longitudinal en un extremo de la probeta para provocar ondas de esfuerzo a través de la madera. Con un acelerómetro emisor, posicionado en el aparato *Metriguard*® (Yu *et al.*, 2017), se registró el tiempo inicial (figura 1). En el otro extremo de la probeta, en un segundo acelerador receptor, se registró el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo. Se realizaron tres mediciones y para el promedio se consideró el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo, el cual, ponderado por la distancia entre los acelerómetros, se definió como la velocidad de onda en la dirección longitudinal.

Figura 1

Pruebas de ondas de esfuerzo



Los módulos dinámicos se calcularon con la ecuación (1) (Nasir *et al.*, 2019):

$$E_{oe} = \rho_{CH} v_{oe}^2 \quad (1)$$

Donde:

E_{oe} = Módulo dinámico ($N\ m^{-2}$)

ρ_{CH} = Densidad de la madera ($kg\ m^{-3}$)

v_{oe} = Velocidad de onda ($m\ s^{-1}$)

Diseño experimental

Las 20 probetas de cada especie, antes y después del densificado, se consideran una muestra independiente. El tratamiento de densificado se considera el factor de variación. Las variables de respuesta son la densidad, la velocidad de onda y el módulo dinámico. Se efectuaron pruebas con 20 réplicas (probetas por especie), por lo que en total se realizaron 160 observaciones para cada una de las variables de respuesta. El contenido de humedad es un parámetro de referencia.

Se realizaron pruebas de normalidad de la distribución de las muestras y se calculó el sesgo estandarizado, el apuntamiento estandarizado, la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación; también se realizaron pruebas de verificación y análisis de varianza de diferencias mínimas significativas para un nivel de confianza de 95%. Asimismo, se evaluaron correlaciones lineales entre las variables, antes y después del densificado. Para el análisis estadístico se utilizó el programa Statgraphics Centurion XVI® (2010).

Resultados

El cuadro 1 señala los valores medios y los coeficientes de variación de las densidades, velocidades de onda y módulos dinámicos, determinados antes y después del densificado de las ocho maderas en estudio.

Cuadro 1

Densidades, velocidades de onda y módulos dinámicos

Especies		ρ_{CH}	v_{oe}	E_{oe}	ρ_{CH}	v_{oe}	E_{oe}
		($kg\ m^{-3}$)	($m\ s^{-1}$)	($MN\ m^{-2}$)	($kg\ m^{-3}$)	($m\ s^{-1}$)	($MN\ m^{-2}$)
		Antes del densificado			Después del densificado		
<i>Cupressus lindleyi</i>	\bar{x}	461	4,109	7,826	607	4,649	13,228
	CV	12.1	9.3	20.6	11.4	9.3	22.5
<i>Cedrela odorata</i>	\bar{x}	473	3,767	6,649	645	4,343	12,258
	CV	19.5	6.7	18.0	17.2	6.0	22.7
<i>Swietenia macrophylla</i>	\bar{x}	540	3,680	7,335	743	4,259	13,518
	CV	6.7	8.7	15.8	6.2	7.2	13.7
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	\bar{x}	602	3,442	7,153	783	3,975	12,401
	CV	7.1	3.7	11.2	5.4	4.0	9.9
<i>Fraxinus uhdei</i>	\bar{x}	611	3,702	8,406	823	4,256	14,939
	CV	4.8	3.8	11.1	3.8	3.6	9.5
<i>Fagus mexicana</i>	\bar{x}	621	3,649	8,311	853	4,212	15,185
	CV	5.2	4.6	13.3	5.4	3.7	11.1
<i>Dalbergia paloescrito</i>	\bar{x}	662	3,913	10,285	878	4,399	17,202
	CV	10.2	10.5	25.3	8.7	9.8	23.7
<i>Guazuma ulmifolia</i>	\bar{x}	675	3,253	7,160	920	3,839	13,594
	CV	6.0	4.2	10.5	5.7	4.1	11.3

ρ_{CH} = Densidad aparente; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; \bar{x} = Media; CV = Coeficiente de variación en por ciento ($CV = \sigma / \bar{x}$); Códigos para las figuras 2, 4 y 6.

Las pruebas de normalidad para las muestras antes y después del densificado indican que los resultados se distribuyeron uniformemente (cuadro 2). Por su parte, los resultados de las pruebas de verificación de varianza validaron los análisis de varianza cuyos resultados mostraron diferencias significativas entre las mediciones antes y después del densificado (cuadro 2). Estos resultados sugieren que el tratamiento de densificado modifica las densidades, las velocidades de onda y los módulos dinámicos de las ocho maderas.

Cuadro 2

Resultados del análisis estadístico

Variables	Pruebas de normalidad				Pruebas de hipótesis	
	AD	DD	AD	DD	Ver-var	Anova
	SE	SE	AE	AE	$P_{(\alpha=0.05)}$	$P_{(\alpha=0.05)}$
<i>Cupressus lindleyi</i>						
ρ_{CH}	1.274	1.648	-0.321	0.6634	0.503	<0.000
v_{oe}	0.037	0.345	-1.175	-0.979	0.861	<0.000
E_{oe}	1.445	1.831	0.883	1.208	0.127	<0.000
<i>Cedrela odorata</i>						
ρ_{CH}	-0.533	-0.130	-1.181	-1.051	0.443	<0.000
v_{oe}	-1.711	-1.1441	0.079	-0.103	0.996	<0.000
E_{oe}	0.197	0.358	-1.095	-0.342	0.116	<0.000
<i>Swietenia macrophylla</i>						
ρ_{CH}	0.316	-0.277	0.714	1.247	0.569	<0.000
v_{oe}	0.316	-0.277	0.714	1.247	0.569	<0.000
E_{oe}	-2.211	-1.822	0.892	0.677	0.831	<0.000
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>						
ρ_{CH}	0.584	0.702	-0.895	-0.372	0.566	<0.000
v_{oe}	-1.180	-0.907	0.067	-0.558	0.306	<0.000
E_{oe}	-0.779	-0.1964	-0.411	-0.491	0.089	<0.000
<i>Fraxinus uhdei</i>						
ρ_{CH}	-0.841	-0.274	-0.814	-0.234	0.896	<0.000
v_{oe}	-0.828	-1.397	0.821	0.742	0.754	<0.000
E_{oe}	-0.231	-1.616	0.177	0.161	0.196	<0.000
<i>Fagus mexicana</i>						
ρ_{CH}	-0.259	0.542	-0.935	-0.839	0.120	<0.000
v_{oe}	-0.577	-1.326	-0.804	1.226	0.527	<0.000
E_{oe}	0.068	-1.322	-0.825	-0.101	0.159	<0.000
<i>Dalbergia paloescrito</i>						
ρ_{CH}	0.674	0.127	-0.103	0.352	0.776	<0.000
v_{oe}	0.249	1.249	-0.548	-0.109	0.938	<0.000
E_{oe}	0.512	1.413	-1.188	-0.090	0.174	<0.000

Continúa en página siguiente

Viene de página anterior

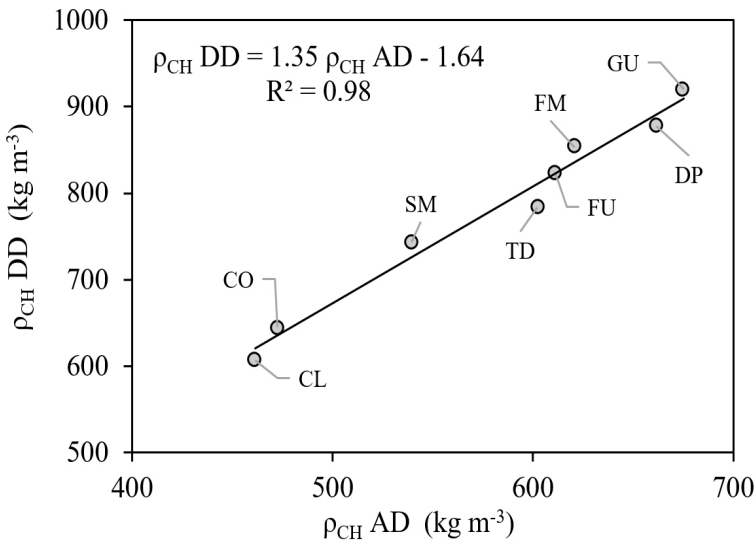
Variables	Pruebas de normalidad				Pruebas de hipótesis	
	AD	DD	AD	DD	Ver-var	Anova
	SE	SE	AE	AE	$P_{(\alpha=0.05)}$	$P_{(\alpha=0.05)}$
<i>Guazuma ulmifolia</i>						
ρ_{CH}	0.874	0.748	-1.003	-0.621	0.404	<0.000
v_{oe}	-0.414	0.085	-1.106	-0.067	0.731	<0.000
E_{oe}	0.583	1.472	-0.641	0.414	0.235	<0.000

ρ_{CH} = Densidad aparente; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo dinámico; AD = Antes del densificado; DD = Después del densificado; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; $P_{(\alpha=0.05)} < 0$: Existe una diferencia significativa.

Las densidades después del tratamiento tienen una fuerte correlación con las obtenidas antes del tratamiento con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.98$ (figura 2). En la madera densificada no se observaron fisuras o zonas con madera comprimida en exceso, lo que permite deducir que el tratamiento de densificado fue uniforme.

Figura 2

Correlación entre las densidades (ρ_{CH}) después del densificado (DD) y antes del densificado (AD)



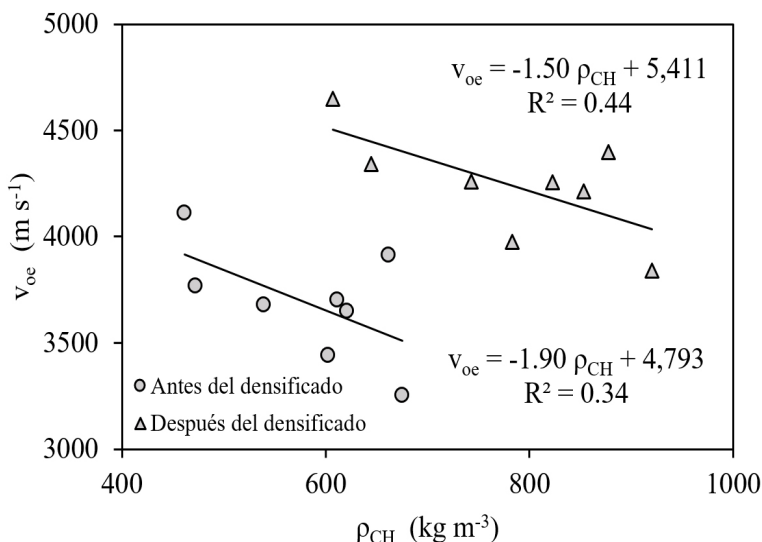
CL: *Cupressus lindleyi*; CO: *Cedrela odorata*; SM: *Swietenia macrophylla*; TD: *Tabebuia donnell-smithii*; FU: *Fraxinus uhdei*; FM: *Fagus mexicana*; DP: *Dalbergia paloescrito*; GU: *Guazuma ulmifolia*.

Los valores de las velocidades de onda de la madera, antes del densificado de las ocho especies (cuadro 1), fluctuaron entre 3,253 m s⁻¹ correspondiente a *G. ulmifolia*, madera con la densidad más alta, y 4,109 m s⁻¹ para *C. lindleyi*, madera con la densidad más baja.

Las correlaciones entre las velocidades de onda y las densidades (figura 3) indican tendencias de la velocidad de onda a disminuir, a medida que la densidad de la madera aumenta. Efectivamente, las correlaciones $v_{oe} = f(\rho_{CH})$ son más fuertes para las maderas después del densificado.

Figura 3

Correlaciones entre las velocidades de onda (v_{oe}) y las densidades (ρ_{CH})



Las velocidades de onda de madera densificada de las ocho especies aumentan comparativamente con las de la madera sin densificar (cuadro 3), y si se considera el conjunto de todas las especies estas diferencias son en promedio de 15.2%. Los resultados se ilustran con las fuertes correlaciones entre las velocidades de onda medidas antes y después del densificado (figura 4).

Cuadro 3

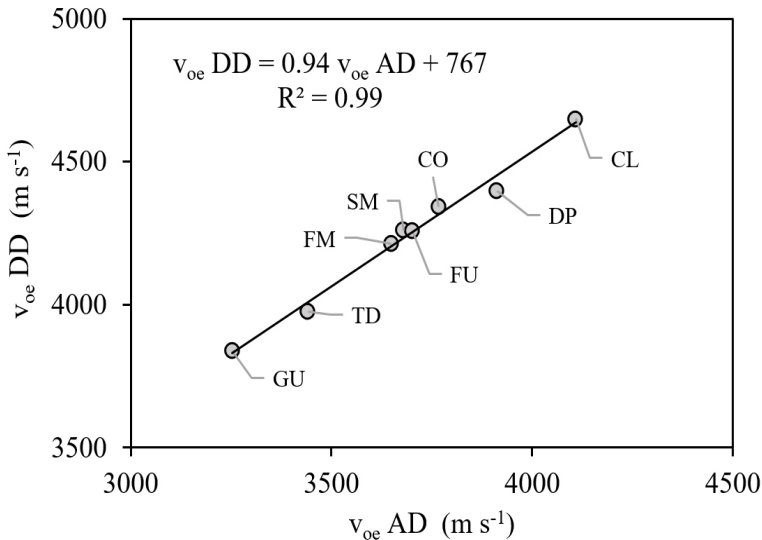
Incrementos en densidades, velocidades de onda y módulos dinámicos

Especies	$\Delta\rho_{CH}$ (%)	Δv_{oe} (%)	ΔE_{oe} (%)
<i>Cupressus lindleyi</i>	31.8	13.2	68.9
<i>Cedrela odorata</i>	38.0	15.7	85.3
<i>Swietenia macrophylla</i>	37.8	16.0	85.9
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	30.3	15.5	73.9
<i>Fraxinus uhdei</i>	34.7	15.0	78.3
<i>Fagus mexicana</i>	37.4	15.5	83.5
<i>Dalbergia paloescrito</i>	33.0	12.6	68.7
<i>Guazuma ulmifolia</i>	36.3	18.0	89.9
<i>Promedio general</i>	34.9	15.2	79.3

$\Delta\rho_{CH}$ = Variación en la densidad aparente; Δv_{oe} = Variación en la velocidad de onda;
 ΔE_{oe} = Variación en el módulo dinámico

Figura 4

Correlación entre las velocidades de onda (v_{oe}) después del densificado (DD) y antes del densificado (AD)

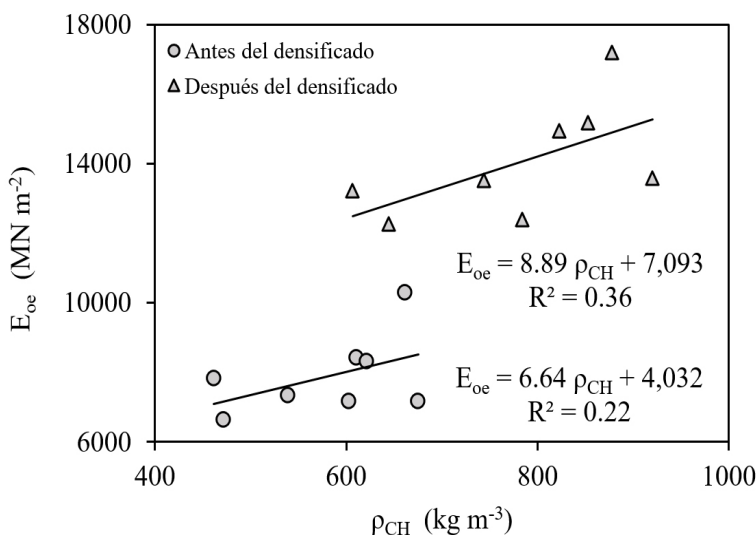


CL: *Cupressus lindleyi*; CO: *Cedrela odorata*; SM: *Swietenia macrophylla*; TD: *Tabebuia donnell-smithii*;
 FU: *Fraxinus uhdei*; FM: *Fagus mexicana*; DP: *Dalbergia paloescrito*; GU: *Guazuma ulmifolia*.

Para cada una de las ocho maderas estudiadas, sus módulos dinámicos después del densificado aumentan comparativamente con los de la madera no densificada (cuadro 3). Este aumento en el módulo dinámico de una pieza de madera, por el efecto del tratamiento, representa una ganancia tecnológica en sus propiedades naturales. El promedio de este beneficio para las ocho especies es de 79.3%. Si se observa especie por especie (figura 5), los módulos dinámicos presentan correlaciones débiles con las densidades aparentes. No obstante, el coeficiente de determinación para los resultados de las maderas densificadas ($R^2 = 0.36$) aumenta 63.6% con respecto al coeficiente de las maderas sin densificar ($R^2 = 0.22$).

Figura 5

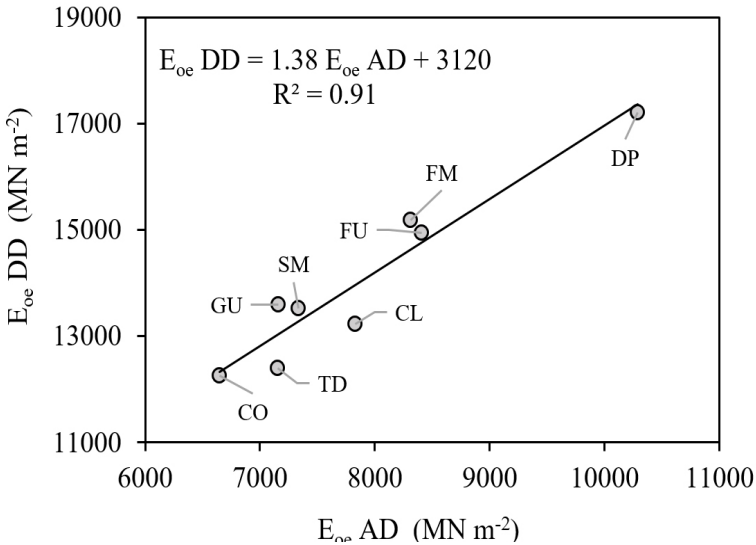
Correlaciones entre los módulos dinámicos (E_{oe}) y las densidades (ρ_{CH})



En cambio, si se analiza el aumento en los módulos dinámicos de cada una de las maderas ocasionado por el densificado, la correlación entre valores es fuerte (figura 6). Este resultado deriva de contrastar los valores promedio antes y después del densificado de cada una de las especies; es decir, se correlacionan ocho pares de valores. Sin embargo, si se correlaciona el conjunto de 160 pares, correspondientes a las observaciones de todas las pruebas de ondas de esfuerzo, la correlación entre los módulos dinámico después del densificado en función de los módulos dinámico antes del densificado, se modifica a $E_{oe} DD = 1.45 E_{oe} AD + 2,591$ y su coeficiente de determinación disminuye a $R^2 = 0.80$. Es decir, se reduce 12% menos respecto al coeficiente de determinación de la figura 6 ($R^2 = 0.91$).

Figura 6

Correlación entre los módulos dinámicos (E_{oe}) después del densificado (DD) y antes del densificado (AD)



CL: *Cupressus lindleyi*; CO: *Cedrela odorata*; SM: *Swietenia macrophylla*; TD: *Tabebuia donnell-smithii*; FU: *Fraxinus uhdei*; FM: *Fagus mexicana*; DP: *Dalbergia paloescrito*; GU: *Guazuma ulmifolia*.

Discusión

Los valores medios y los coeficientes de variación de las densidades de la madera, de las velocidades de onda y de los módulos dinámicos, determinados previamente al proceso de densificado (cuadro 1), son similares a los sugeridas por Tamarit y López (2007), Silva *et al.* (2010) y Sotomayor (2015). Al analizar las mediciones hechas antes y después del densificado, se encontró que los resultados de las pruebas de sesgo y apuntalamiento indicaron distribuciones normales para las tres variables de respuesta especificadas en el diseño experimental. Igualmente, las pruebas de verificación de varianza resultaron sin diferencias significativas.

Densidades

La madera de *C. lindleyi* mostró la densidad más baja (ρ_{CH} AD = 461 kg m⁻³) y *G. ulmifolia* la más alta (ρ_{CH} AD = 675 kg m⁻³). En el mismo orden de ideas, los coeficientes de variación de la densidad disminuyeron en promedio 10.7% (cuadro 1), de manera que el densificado disminuye la variabilidad natural de la densidad al interior de una especie. Igualmente, las magnitudes de las densidades de la madera tratada se incrementaron en promedio 34.9%, en comparación con la madera sin densificar (cuadro 3).

Este aumento artificial de la densidad aparente de la madera y el consecuente incremento en su módulo dinámico puede significar una ganancia tecnológica en la transformación y modificación de las propiedades intrínsecas de este material.

El paradigma que postula que el módulo de elasticidad de la madera es proporcional a su densidad (Niklas y Spatz, 2010), sugiere que el aumento artificial de la densidad de la madera resultará en ganancia en la magnitud del módulo dinámico. Este beneficio tecnológico probablemente ayude en la valorización de las especies de baja densidad y en la aceptación de madera proveniente de plantaciones comerciales de rápido crecimiento. De esta forma, el densificado de las maderas en estudio puede contribuir a diversificar su empleo como material de ingeniería en la industria de la madera.

Velocidades de onda

Los valores de las velocidades de onda de la madera antes del densificado son congruentes con los mencionados en la bibliografía. Otros investigadores, como Ilic (2003), Del Menzetti *et al.* (2010) y Da Silva *et al.* (2014), informan que las velocidades de transmisión de las ondas de esfuerzo en la dirección longitudinal de la madera se sitúan en el rango que va de 3,810 m s⁻¹ a 6,240 m s⁻¹. El módulo dinámico por ondas de esfuerzo, igualmente en la dirección longitudinal, se sitúa en un intervalo de 6,400 MN m⁻² a 23,800 MN m⁻². Ambos intervalos de velocidades y módulos dinámicos son para maderas con densidades que varían de 303 kg m⁻³ a 1,005 kg m⁻³.

Por una parte, se reporta que la velocidad de onda se incrementa en función de la densidad (Chauhan y Walker, 2006; De Oliveira y Sales, 2006) y, por otra, que la velocidad de onda no necesariamente aumenta cuando la densidad de la madera aumenta (Lin y Wu, 2013; Tippner *et al.*, 2016). Con relación a la variabilidad en los resultados, los coeficientes de variación de las velocidades de onda disminuyen en promedio 6.1%, excepción hecha para *T. donnell-smithii*, cuya variación aumenta en 10.3%. Esta reducción puede ser atribuida al efecto del tratamiento.

No obstante, las velocidades de onda de madera densificada de las ocho especies aumentan comparativamente con las de la madera sin densificar (cuadro 3), y si se considera el conjunto de todas las especies, estas diferencias son en promedio de 15.2%. Los resultados se ilustran con las fuertes correlaciones entre las velocidades de onda medidas antes y después del densificado (figura 4). De los argumentos anteriores se deriva que los resultados de la presente investigación son particulares a las maderas estudiadas y hacen referencia únicamente al protocolo experimental aplicado.

Módulos dinámicos

Los módulos dinámicos de la madera antes del densificado varían entre el mínimo de 12,258 MN m⁻² para *C. odorata* y el máximo de 17,202 MN m⁻² para *D. paloescrito* (cuadro 1). Con excepción de *C. lindleyi*, *C. odorata* y *G. ulmifolia*, los coeficientes de variación disminuyeron como consecuencia del densificado (cuadro 1). Esta reducción en la diversidad de valores que varía desde -6.3% para *D. paloescrito* hasta -16.9% en *F. mexicana* sugiere que la tecnología del densificado puede disminuir la variabilidad en

los parámetros de ingeniería, esta reducción es requisito en el diseño y cálculo estructural al utilizar madera.

Conclusiones

El densificado de la madera aumenta su densidad aparente, su velocidad de onda y su módulo dinámico. La velocidad de onda correlaciona de manera débil con la densidad aparente de la madera. En cambio, el módulo dinámico correlaciona fuertemente con la densidad.

En prospectiva, las ocho maderas investigadas son potencialmente candidatas al tratamiento de densificado, para mejorar la densidad aparente de la madera y el módulo dinámico; sin embargo, los resultados son válidos y útiles principalmente para las maderas examinadas y considerando la estrategia experimental de la investigación.

Literatura citada

- Bao, M.; Huang, X.; Jiang, M.; Yu, W. y Yu, Y. (2017). Effect of Thermo-Hydro-Mechanical Densification on Microstructure and Properties of Poplar Wood (*Populus tomentosa*). *Journal of Wood Science*, 63(6): 591-605.
- 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.
- Chauhan, S.S. y Walker, J.C.F. (2006). Variations in Acoustic Velocity and Density with Age, and their Interrelationships in Radiata Pine. *Forest Ecology and Management*, 229(1): 388-394.
- Cordero, J. y Boshier, D.H. (2003). *Árboles de Centroamérica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba. 1091 p.
- Cruz, N.; Bustos, C.; Aguayo, M.G.; Cloutier, A. y Castillo, R. (2018). Impact of the Chemical Composition of *Pinus radiata* Wood on its Physical and Mechanical Properties Following Thermo-Hygro-mechanical Densification. *BioResources*, 13(2): 2268-2282.
- 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.
- Dackermann, U.; Crews, K.; Kasal, B.; Li, J.; Riggio, M.; Rinn, F. y Tannert, T. (2014). *In Situ* Assessment of Structural Timber Using Stress-Wave Measurements. *Materials and Structures*, 47(5): 787-803.
- Darwis, A.; Wahyudi, I.; Dwianto, W. y Cahyono, T.D. (2017). Densified Wood Anatomical Structure and the Effect of Heat Treatment on the Recovery of Set. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 14(1): 24-31.
- De Oliveira, F.G.R. y Sales, A. (2006). Relationship between Density and Ultrasonic Velocity in Brazilian Tropical Woods. *Bioresource Technology*, 97(18): 2443-2446.
- Del Menezzi, C.H.; Rocha, S.R. y de Souza, M. (2010). Predicting Flexural Properties of Six Amazonian Hardwoods Using Stress Wave Nondestructive Method. *Acta Amazonica*, 40(2): 325-332.
- Dinwoodie, M. (2002). *Timber: Its Nature and Behavior*. CRC Press, New York. 272 p.
- Forest Products Laboratory. (2010). *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory, Madison, U.S.A. 508 p.
- Ilic, J. (2003). Dynamic MOE of 55 Species Using Small Wood Beams. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(3): 167-172.
- International Organization for Standardization. ISO. (2014a). *ISO 13061-1:2014*. Physical and Mechanical Properties of Wood — Test Methods for Small Clear Wood Specimens — Part 1: Determination of Moisture Content for Physical and Mechanical Tests. Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization. ISO. (2014b). *ISO 13061-2:2014*. Physical and Mechanical Properties of Wood — Test Methods for Small Clear Wood Specimens — Part 2: Determination of Density for Physical and Mechanical Tests. Geneva, Switzerland.

- Kutnar, A. y Šernek, M. (2007). Densification of Wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 82: 53-62.
- Li, L.; Gong, M.; Yuan, N. y Li, D. (2013). An Optimal Thermo- Hydro-Mechanical Densification (THM) Process for Densifying Balsam Fir Wood. *BioResources*, 8(3): 3967-3981.
- Lin, W. y Wu, J. (2013). Nondestructive Testing of Wood Defects Based on Stress Wave Technology. *Telkomnika*, 11(11): 6802-6807.
- Nasir, V.; Nourian, S.; Avramidis, S. y Cool, J. (2019). Stress Wave Evaluation by Accelerometer and Acoustic Emission Sensor for Thermally Modified Wood Classification Using three Types of Neural Networks. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(1): 45-55.
- Niklas, K.J. y Spatz, H.C. (2010). Worldwide Correlations of Mechanical Properties and Green Wood Density. *American Journal of Botany*, 97(10): 1587-1594.
- Pelit, H.; Budakç, M. y Sönmez, A. (2018). Density and Some Mechanical Properties of Densified and Heat Post-Treated Uludağ fir, Linden and Black Poplar Woods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76: 79-87.
- Pertuzzati, A.; Missio, A.L.; de Cademartori, P.H.G.; Santini, E.J.; Haselin, C.R.; Berger, C.; Gatto, D.A. y Tondi, G. (2018). Effect of Process Parameters in the Thermomechanical Densification of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* Fast-Growing Wood. *Bioresources*, 13(1): 1576-1590.
- Rautkari, L.; Laine, K.; Kutnar, A.; Medved, S. y Hughes, M. (2013). Hardness and Density Profile of Surface Densified and Thermally Modified Scots Pine in Relation to Degree of Densification. *Journal of Materials Science*, 48(6): 2370-2375.
- Sandberg, D.; Kutnar, A. y Mantanis, G. (2017). Wood Modification Technologies. A Review. *iForest*, 10: 895-908.
- Silva, J.A.; Fuentes, F.J.; Rodríguez, R.; Torres, P. A.; Lomeli, M. G.; Ramos, J.; Waitkus, C. y Richter, H.G. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. Comisión Nacional Forestal, México. 207 p.
- Sotomayor, J.R. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. 69 p.
- Statgraphics Centurion XVI®. (2010). StatPoint Technologies, Inc. U.S.A.
- Tamarit, J.C. y López, L.J. (2007). *Xilotecología de los principales árboles tropicales de México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México. 264 p.
- Tippner, J.; Hrivnák, J. y Kloiber, M. (2016). Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood Using Acoustic Methods. *Bioresources*, 11(1): 503-518.
- Vössing, K.J. y Niederleithinger, E. (2018). Nondestructive Assessment and Imaging Methods for Internal Inspection of Timber. A Review. *Holzforschung*, 72(6): 467-476
- Yamasaki, M.; Tsuzuki, C.; Sasaki, Y. y Onishi, Y. (2017). Influence of Moisture Content on Estimating Young's Modulus of Full-Scale Timber Using Stress Wave Velocity. *Journal of Wood Science*, 63(3): 225-235.
- Yu, Y.; Liu, Y.; Gong, M.; Xu, Z. y Fang, Y. (2017). R&R Study of Using a Stress Wave Timer to Measure the Elastic Modulus of Structural Dimension Lumber. *Measurement*, 95: 293-296.

Recepción: 08 de agosto 2019
Arbitraje: 12 de septiembre de 2019
Dictamen: 03 de enero de 2020
Aceptado: 12 de febrero de 2020