

Determinación del **módulo de elasticidad** por los métodos dinámico y estático para madera termo-tratada de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*

Luis-Diego Méndez-Mejías¹

Resumen

Se estudió el efecto del tratamiento térmico sobre el módulo de elasticidad (MOE) de la madera para dos especies forestales *Gmelina arborea* (melina) y *Tectona grandis* (teca). Las muestras fueron expuestas a cuatro niveles de temperatura 160, 180, 200 y 220 °C por 2 horas, además se definió un tratamiento testigo (sin termo-tratamiento). A las muestras sometidas al tratamiento térmico se les determinó el módulo de elasticidad por ultrasonido (E_{US}) en sentido transversal y longitudinal y módulo de elasticidad en flexión estática (E_{ES}). Asimismo, se determinó la densidad y contenido de humedad (CH). Los resultados mostraron que la densidad varió entre 444,32 a 531,54 kg/m³ y de 594,11 a 697,25 kg/m³ para melina y teca respectivamente. El CH fluctuó de 3,77 a 11,47 % y de 2,90 a 8 % para melina y teca respectivamente, con una tendencia a disminuir

Abstract

Determination of dynamic and static modulus of elasticity for wood heat-treated *Gmelina arborea* and *Tectona grandis*.

The effect of thermal-treatment on the elasticity modulus (MOE) of wood was studied for two tree species *Gmelina arborea* and *Tectona grandis*. Samples were exposed to four temperature levels 160, 180, 200 and 220 °C during 2 hours, a control treatment (without thermal-treatment) was also defined. Thermal-treated samples were determined the elasticity modulus by ultrasonic (E_{US}) in transverse and longitudinal direction and the elasticity modulus in static flexion (E_{ES}). Likewise, density and moisture content (CH) were determined. Results showed that density varied from 444.32 to 531.54 kg/m³ and from 594.11 to 697.25 kg/m³ for *G. arborea* and *T. grandis* respectively. CH ranged from 3.77 to 11.47 % and from 2.90 to 8 % for *G. arborea* and

1. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Estudiante Programa de Maestría en Ciencias Forestales; Cartago, Costa Rica; ldiegomm@gmail.com

Recibido: 07/05/2015
Aceptado: 21/05/2015

conforme aumenta la temperatura de termo-tratamiento en las piezas. El E_{US} en sentido transversal varió de 1,16 a 2,35 GPa, el E_{US} en sentido longitudinal varió de 9,80 a 12,53 GPa y el E_{ES} fluctuó de 6,15 a 7,98 GPa, para melina. Para teca los resultados variaron de 1,90 a 3,07 GPa para E_{US} en sentido transversal, de 16,13 a 18,12 GPa para E_{US} en sentido longitudinal y de 9,41 a 11,47 GPa para E_{ES} . Finalmente, se obtuvo que los mejores valores de MOE para melina corresponde a los tratamientos de 160 y 180 °C de temperatura. En tanto para teca, corresponden a los tratamientos con 180 y 200 °C de temperatura.

Palabras claves: *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, termo-tratamiento, módulo de elasticidad, ultrasonido, flexión estática.

Introducción

La madera es considerada un material sostenible y amigable con el ambiente, utilizado en una amplia variedad de usos estructurales y no estructurales (Barrantes y Ugalde, 2014). Presenta buenas propiedades mecánicas que pueden ser mejoradas a través de técnicas o métodos ingenieriles como el uso de madera laminada, incorporación de pegamentos entre otros (Priadi y Hiziroglu, 2013). Su principal desventaja es la higroscopicidad, capacidad de absorber o liberar humedad en base a las condiciones ambientales en que se encuentra, lo que le genera una inestabilidad dimensional (Roldán, 2014).

Dentro de las propiedades mecánicas de la madera destaca la rigidez, determinada a través del módulo de elasticidad (Santana, 2006). La elasticidad, corresponde a la capacidad de un material de retornar a su forma original luego de ser deformado por una fuerza bajo el límite proporcional (Muñoz, 2012). Lo que permite determinar usos adecuados del material tomando en cuenta su capacidad de deformación al aplicarle una fuerza.

Por otra parte, el nuevo surgimiento de leyes ambientales sobre el uso de productos químicos utilizados en la conservación de la madera, han creado la necesidad de investigar sobre técnicas de conservación de baja toxicidad (Trevisan et al., 2014). Un tratamiento alternativo para la preservación de la madera sin utilizar productos químicos, es el tratamiento térmico, implementado en Europa a principios de 1990 y que ha venido despertando un gran interés al permitir modificar la madera con un bajo impacto ambiental y de una manera financieramente viable (Kesik et al., 2014). Investigaciones recientes de García et al. (2012) y Kwon et al. (2014) demuestran que este tratamiento mejora características de la madera porque aumenta su hidrofobicidad, estabilidad dimensional, resistencia a la pudrición y capacidad de aislamiento térmico.

T. grandis respectively, with a tendency to decrease as the temperature of the thermal-treated pieces increases. E_{US} in transverse direction ranged 1.16 to 2.35 GPa, E_{US} in longitudinal direction ranged 9.80 to 12.53 GPa and E_{ES} varied from 6.15 to 7.98 GPa for *G. arborea*. For *T. grandis* the results varied from 1.90 to 307 GPa for E_{US} in transverse direction, from 16.13 to 18.12 GPa for E_{US} in longitudinal direction and from 9.41 to 11.74 GPa for E_{ES} . Finally, it was found that best MOE values for *G. arborea* corresponds to treatments of 160 and 180 °C temperatures. Whereas for *T. grandis*, corresponds to treatments of 180 and 200 °C temperatures.

Keywords: *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, thermal-treatment, elasticity modulus, ultrasonic, static flexion.

La madera utilizada en este proceso de termo tratamiento, es sometida a temperaturas que varían generalmente entre 130 a 200 °C y de 15 min a 24 horas (Priadi y Hiziroglu, 2013). Por otra parte, Kesik et al. (2014), reporta una temperatura de exposición que va desde 160 hasta 260 °C, pero difieren según las condiciones, lo que permite ajustar los parámetros en base a las especies, tamaño de muestra, contenido de humedad y uso del material.

La evaluación de las propiedades físico-mecánicas de la madera son realizadas a través de ensayos en los que se utilizan diversos dispositivos o máquinas que en su mayoría son lentos o necesitan de una gran cantidad de materia prima para su ejecución (Baradit et al., 2013). Debido a esto, en los últimos años se han utilizado diferentes técnicas de evaluación no destructivas para la selección y clasificación de la madera y sus derivados (Nzokou et al., 2006).

Los métodos de ensayo no destructivos, son técnicas que permiten examinar la madera y sus componentes sin causar afectación en sus propiedades, integridad y su posterior uso. Estos métodos son utilizados para detectar, localizar y evaluar defectos, para determinar propiedades de los materiales (Acuña et al., 2006). La ventaja de la utilización de este tipo de métodos no destructivos es la rapidez para generar resultados con alta precisión y su adaptabilidad para emplearlo en diversas condiciones, además permiten realizar una buena repetitividad de mediciones en muestras pequeñas, necesitando una cantidad de material muy reducida (Sotomayor, 2014).

Según, Kesik et al. (2014), el aplicar altas temperaturas durante el tratamiento, disminuye las propiedades mecánicas de la madera. Bekhta y Niemz (2003), indican disminuciones en la resistencia a la flexión de madera de abeto de 50 % aproximadamente cuando la temperatura del tratamiento aumentó de 100 a 200 °C, y disminuciones en el módulo de

elasticidad (MOE) entre 4 y 9 %. Por su parte, Gunduz et al. (2009), indicó incrementos en el módulo de elasticidad de aproximadamente 5 % y disminuciones en resistencia de flexión y compresión con valores de 7,42 % y 7,55 % respectivamente para madera de peral silvestre (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.). El conocimiento de estas propiedades mecánicas es de gran importancia para tomar decisiones en cuanto al uso que va a tener este material por lo tanto, es de alto valor en la ingeniería, construcción, arquitectura entre otros campos de acción (Baradit et al., 2013).

Ante tales circunstancias, esta investigación tiene como objetivo determinar el efecto producido sobre el módulo de elasticidad (MOE) en la madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* procedentes de plantación y sometidas previamente un proceso de termo-tratamiento a cuatro diferentes niveles de temperatura.

Materiales y métodos

Procedencia y características del material utilizado

La madera utilizada se obtuvo de un segundo raleo en plantaciones de 11 años de edad, con un espaciamiento de 3 x 3 m (1100 árboles/ha). Las plantaciones se localizan en la Zona Norte de Costa Rica y son propiedad de la empresa Ethical Forestry S.A. Esta zona se ubica dentro de la zona de vida Bosque húmedo tropical basal, registra una temperatura media anual entre 27 °C y 32 °C y precipitación de 3500 mm (Holdridge, 1967). Los árboles muestreados correspondieron a árboles de raleo de los cuales fueron extraídas 7-9 trozas de 1,25 metros de largo hasta un diámetro mínimo de 13 cm.

Mediante un proceso de aserrío, se obtuvieron tablas de *Gmelina arborea* (melina) y *Tectona grandis* (teca) de aproximadamente 15,5 cm de ancho x 3 cm de espesor x 210 cm de largo. De cada tabla se obtuvo cinco probetas, cada una asignada a uno de los cinco tratamientos. En total se obtuvo 30 probetas por especie (seis probetas por cada tratamiento). Se aplicaron cinco tratamientos térmicos: Tratamiento 1 (control), tratamiento 2 (160 °C), tratamiento 3 (180 °C), tratamiento 4 (200 °C) y tratamiento 5 (220 °C) cada uno por un tiempo de dos horas.

Un total de 60 probetas (entre ambas especies) con dimensiones de 2,5 x 2,5 x 41 cm obtenidas luego del proceso de termo-tratamiento, fueron colocadas en un ambiente controlado a 22 °C y 66 % humedad relativa hasta alcanzar un 12 % de contenido de humedad. Para determinar el módulo elástico (MOE) se utilizaron dos métodos de ensayo, uno no destructivo y otro destructivo.

Determinación de densidad

Con un total de 30 probetas por especie (seis probetas por cada tratamiento), con dimensiones de 2,5 x 2,5 x 41 cm se determinó la densidad. Se midió el volumen y la masa de

cada una de las probetas con un calibrador TRUPER con precisión de 0,01 mm y una balanza OCONY con precisión de 0,01 g, respectivamente. Luego se calculó la densidad (PH) con la ecuación 1:

$$P_H (\text{kg m}^{-3}) = \text{masa (kg)} / \text{Volumen (m}^3) \quad (1)$$

Determinación del Contenido de Humedad

Con un total de 30 probetas por especie (seis probetas por cada tratamiento), con dimensiones de 2,5 x 2,5 x 41 cm se determinó porcentaje de contenido de humedad (CH%) bajo la norma ASTM D1442-92 (2003). Se obtuvo el peso inicial de las probetas y se colocaron a una temperatura de 103 °C en un horno marca BLUE M por 24 horas, luego se volvieron a pesar para obtener el peso final.

El CH (%) fue calculado con la ecuación 2:

$$\text{CH}(\%) = \left(\frac{\text{Peso inicial (kg)} - \text{Peso final (kg)}}{\text{Peso inicial (kg)}} \right) * 100 \quad (2)$$

Método de ensayo no destructivo (ultrasonido)

Con un total de 30 probetas por especie (seis probetas por cada tratamiento), con dimensiones de 2,5 x 2,5 x 41 cm se determinó el módulo elástico por ultrasonido (E_{US}). Se utilizó equipo SYLVATESTDUO con 2 transductores de 22 kHz (uno emisor y otro receptor de onda). Se registró el tiempo promedio de recorrido de la onda en sentido transversal y longitudinal de cada probeta. Previamente en la configuración de este dispositivo se estableció realizar cuatro lecturas por medición de donde se obtuvo el tiempo promedio de recorrido de la onda.

El E_{US} se calculó con la ecuación 3:

$$E_{US} = V_{US}^2 * \rho_H * 10^{-9} \quad (3)$$

Donde:

E_{US} = Módulo de elasticidad de la madera en ultrasonido (GPa)

V_{US} = Velocidad del ultrasonido (m s⁻¹)

ρ_H = Densidad de la madera al contenido de humedad del ensayo (kg/m³).

Método de ensayo destructivo (flexión estática)

Con un total de 30 probetas por especie (seis probetas por cada tratamiento), con dimensiones de 2,5 x 2,5 x 41 cm se determinó el módulo de elasticidad en flexión estática bajo la norma ASTM D143-14 (2014). Se utilizó una máquina universal de ensayos con sistema de registro de datos marca JBA, modelo 855. Se usó una luz entre apoyos de 36 cm y se aplicó una carga constante de 222N a una velocidad de 1,3 mm/min.

El E_{ES} se calculó con la ecuación 4:

$$MOE(GPa) = (Plp \times L^3) / (4 \times Dlp \times a \times h^3) * 9,80665 * 10^{-5} \quad (4)$$

Donde:

Plp = Carga en el límite proporcional, en Kg.

L = Luz del ensayo, en cm.

Dlp = Deformación en el límite proporcional, en cm.

a = Ancho de la probeta, en cm.

h = Altura de la probeta, en cm.

$9,80665 \cdot 10^{-5}$ = Coeficiente de transformación a GPa.

Análisis estadístico

El diseño experimental se realizó de la siguiente manera: se evaluaron 2 especies (*Gmelina arborea* y *Tectona grandis*), cada una de ellas fue sometida a un proceso de termo-tratamiento en base a cinco tratamientos los cuales constituyeron cuatro diferentes niveles de temperatura, además de un tratamiento control; para cada especie se ensayaron 30 probetas en total, seis probetas para cada uno de los tratamientos. Como variables de respuesta se tuvo el módulo elástico en flexión estática (E_{ES}) y módulo elástico por ultrasonido (E_{US}).

Se aplicó un análisis de varianza (ANDEVA) para comparar la variación entre las medias de los datos. La existencia de diferencia significativa entre las medias de los tratamientos fue verificada mediante una prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Resultados

La variación del E_{ES} y E_{US} (transversal y longitudinal) respecto a la densidad, se muestra en la figura 1. En ella se pudo observar que el E_{US} longitudinal es el que presentó los valores más altos respecto a la densidad para ambas especies. Así mismo se observó que independientemente del método utilizado para determinar el módulo de elasticidad se presentó una leve tendencia de crecimiento de éste de acuerdo al aumento de la densidad, siendo la teca la que presentó los valores más altos de MOE y densidad en los diferentes métodos aplicados.

Al estudiar cada uno de los métodos de ensayo, se encontró que el E_{US} transversal obtuvo los menores valores en comparación a los otros métodos de ensayo. Los valores máximos obtenidos en E_{US} transversal fueron de 3,01 y 3,99 GPa para melina y teca respectivamente (Figura 1a).

En la figura 1b, se observó que el E_{US} longitudinal presentó los valores más altos de módulo de elasticidad con resultados de 14,47 y 19,36 GPa para melina y teca respectivamente. Para ambas especies se logró observar un leve crecimiento del MOE respecto a la densidad, sin embargo en ambos casos se tiene una baja relación entre los datos (Figura 1b).

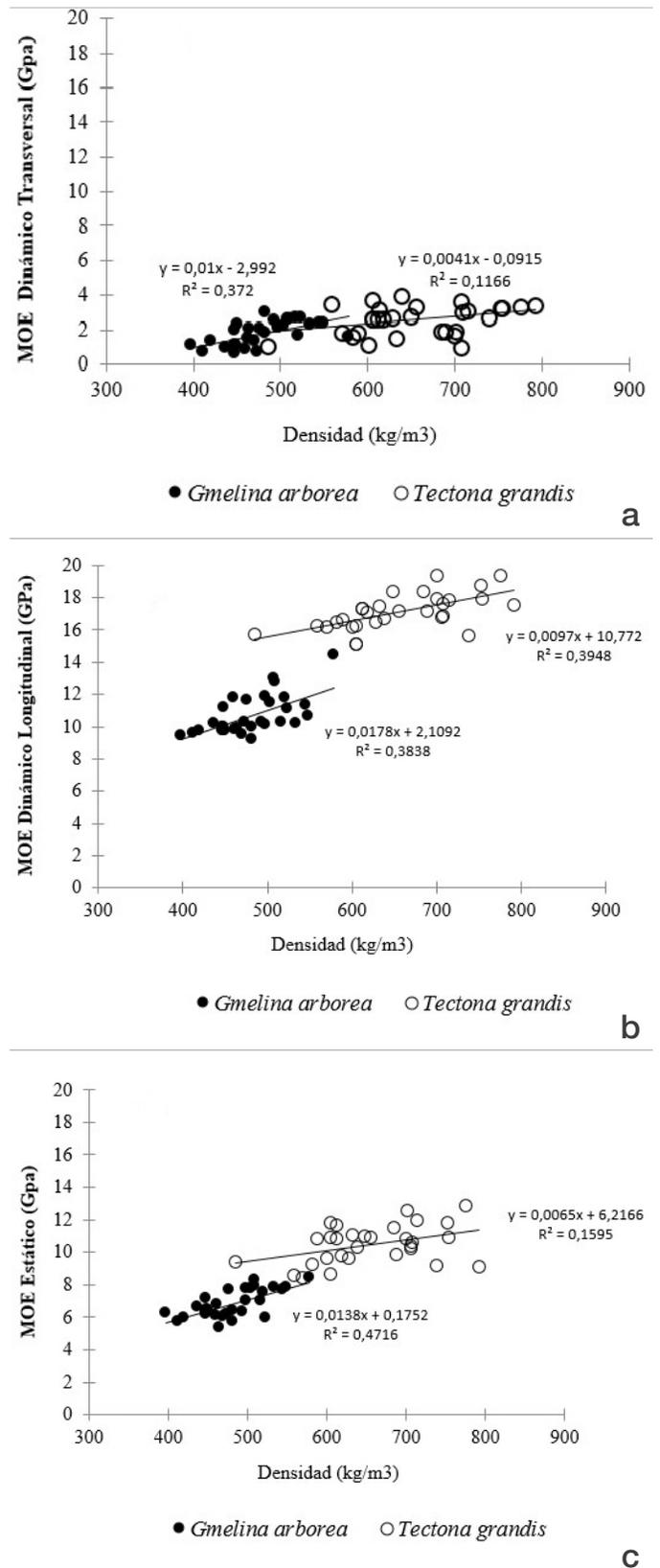


Figura 1. MOE respecto a densidad, para *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* sometidas a un proceso de termo-tratamiento a cuatro diferentes niveles de temperatura, en base a tres métodos de evaluación.

Figure 1. Modulus of elasticity in relation with density for *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* that were in thermal treatment for four different temperature levels in base of three evaluation methods.

Cuadro 1. Propiedades físico-mecánicas evaluadas, densidad (kg/m³), CH (%) y MOE (GPa), para *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* sometidas a un proceso de termo-tratamiento a cuatro niveles de temperatura, Cartago, Costa Rica.

Table 1. Evaluated physical and mechanical properties: density (kgm⁻³), CH (%) and MOE (GPa) for *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* that were in thermal-treatment process in four temperature levels, Cartago, Costa Rica.

Especie	Tratamiento	Densidad (kg/m ³)	CH (%)	E _{US} (GPa)		E _{ES} (GPa)
				Transversal	Longitudinal	
<i>Gmelina arborea</i> **	1	447,25 (6,12)*	11,47 (7,76)	1,34 (7,96) A	10,22 (49,70) A	6,15 (6,94) A
	2	512,52 (6,75)	6,78 (8,03)	2,21 (9,07) B	12,53 (17,35) B	7,98 (3,91) B
	3	531,54 (2,51)	7,39 (12,43)	2,35 (5,88) B	10,89 (16,02) A	7,29 (10,08) B
	4	474,20 (6,00)	4,35 (11,47)	2,02 (4,07) B	9,80 (33,60) A	6,25 (7,23) A
	5	444,32 (3,80)	3,77 (4,62)	1,16 (5,86) A	10,04 (42,25) A	6,44 (7,52) A
<i>Tectona grandis</i> **	1	686,41 (14,38)	8,00 (14,24)	3,07 (5,29) A	16,74 (22,46) A	9,41 (10,37) A
	2	616,03 (2,31)	5,78 (19,34)	3,07 (5,16) A	16,13 (20,70) A	10,18 (10,89) A
	3	697,25 (9,86)	3,71 (27,51)	2,57 (5,20) B	18,12 (36,47) B	11,47 (7,96) B
	4	681,94 (5,20)	2,96 (15,50)	2,28 (5,19) B	17,85 (28,51) B	11,06 (8,36) B
	5	594,11 (10,02)	2,90 (12,80)	1,90 (4,27) B	16,73 (48,56) A	10,33 (9,78) A

**Los valores entre las especies *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*, presentan diferencia estadística significativa para un 95% de confianza.

*El valor entre paréntesis indica el coeficiente de variación de 6 muestras. Los valores con letras similares indican que no hay diferencia estadística significativa entre tratamientos para un 95% de confianza.

Así mismo, para el E_{ES} se observó una tendencia similar de los datos, con valores máximos de 8,46 y 12,86 GPa para melina y teca respectivamente, mostrando un leve crecimiento conforme aumentó la densidad (Figura 1c).

En los métodos de ensayo aplicados para determinar E_{ES} y E_{US} (transversal y longitudinal) (Figura 2), se encontró un comportamiento irregular de los valores del MOE respecto a los diferentes niveles de temperatura aplicados en cada tratamiento. Los resultados de módulo de elasticidad presentaron diferencias significativas respecto a los cuatro niveles de temperatura aplicados en los tratamientos, esto para un $\alpha=0,05$.

Para la melina (Figura 2a), se encontró que el tratamiento donde se aplicó 160 °C de temperatura presentó los mayores valores de MOE para todos los métodos de ensayo, seguidos por los valores del tratamiento donde se aplicó 180 °C de temperatura. En tanto para los tratamientos donde se sometió a temperaturas de 200, 220 °C y sin tratamiento térmico presentaron valores muy similares entre sí para los métodos de ensayo de E_{US} en sentido longitudinal y E_{ES}. Para el caso de método de ensayo de E_{US} en sentido transversal presentó valores un poco más variables para estos mismos tratamientos.

Para la teca (Figura 2b), se encontró que el tratamiento donde se aplicó 180 °C de temperatura presentó los mayores valores de MOE para los métodos de ensayo de E_{US} en sentido longitudinal y E_{ES}, seguidos por los valores del tratamiento donde se aplicó 200 °C de temperatura. Por otra parte, para los tratamientos donde se sometió a temperaturas de 160, 220 °C y el tratamiento testigo presentaron valores muy similares entre sí para los métodos de ensayo ejecutados.

En los ensayos de las propiedades físico-mecánicas evaluadas (Cuadro 1), se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados para un $\alpha=0,05$. Los resultados obtenidos para el MOE, reflejaron la existencia de dos grupos diferentes estadísticamente ($\alpha=0,05$) tanto en melina como en teca, esto con un nivel de confianza del 95 %.

Se pudo observar que lo mayores valores de MOE los presentó el E_{US} en sentido longitudinal, no obstante, es donde se obtuvieron los valores más altos de coeficiente de variación (% CV), con valores que fluctuaron entre 16,02 y 49,70 %. A su vez, se notó que los valores de MOE máximos para los tres métodos de ensayo aplicados, correspondieron a las probetas con el valor de densidad más alto para ambas especies, a excepción del E_{US} en sentido transversal para teca. Para el caso de los datos E_{ES} y E_{US} en sentido transversal presentaron valores inferiores al E_{US} en sentido longitudinal y valores de CV muy similares entre sí (Cuadro 1).

Por otra parte, se pudo observar que los valores de contenido de humedad disminuyeron significativamente conforme aumentó la temperatura del termo-tratamiento.

Discusión

La comparación del E_{US} difiere en sentido longitudinal y en sentido transversal. El E_{US} en sentido longitudinal presentó los mayores valores y CV que los valores y CV obtenidos en sentido transversal, lo cual puede ser explicado por la corta distancia entre transductores para determinar la medición en sentido transversal respecto a la distancia en sentido longitudinal la cual fue mucho mayor. Por su parte, la velocidad de propagación de

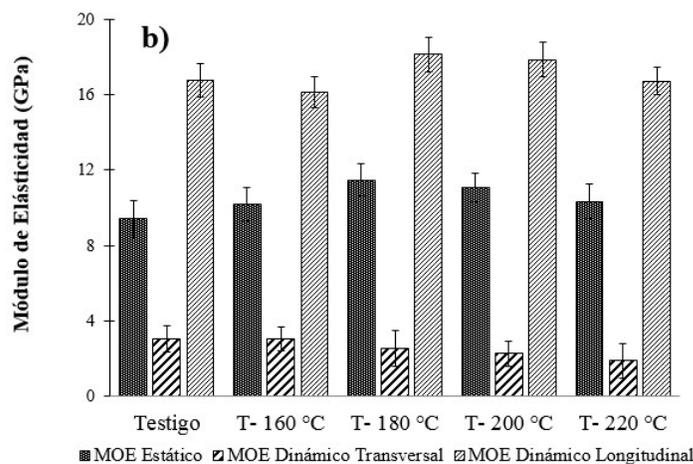
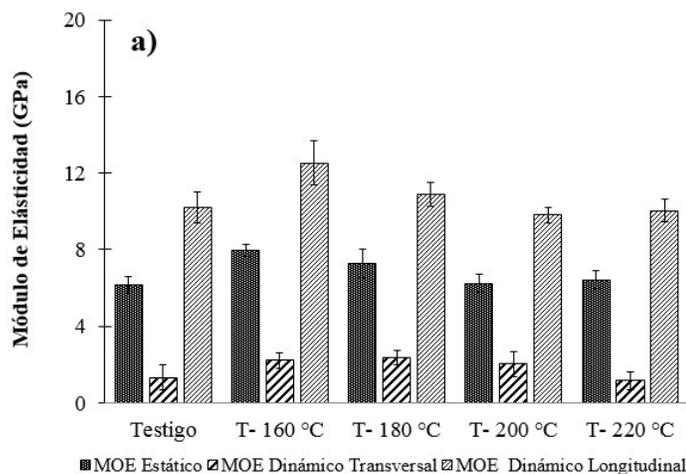


Figura 2. MOE respecto a temperaturas de termo-tratamiento, para las especies *Gmelina arborea* (a) y *Tectona grandis* (b), en base a tres métodos de evaluación.

Figure 2. Modulus of elasticity in relation with temperatures of thermal-treatment for *Gmelina arborea* (a) and *Tectona grandis* (b), in base of three evaluation methods.

la onda que ofrece el equipo, aumenta su duración conforme se aumenta la distancia de separación entre los transductores, esto puede venir explicado por la naturaleza del equipo generador-receptor de las ondas del ultrasonido (Acuña et al., 2006).

Los valores de E_{US} obtenidos en sentido transversal oscilaron entre 1,16 – 2,35 GPa y 1,90 – 3,07 GPa para melina y teca respectivamente. Los valores en sentido longitudinal de 9,80 – 12,53 GPa y 16,13 – 18,12 GPa, para melina y teca respectivamente (Cuadro 1). Esta variabilidad se puede deber a la ubicación de los elementos anatómicos de la madera (Solórzano et al., 2012), ya que la onda de ultrasonido presenta un tiempo de transmisión más rápido en sentido longitudinal que en sentido transversal; estos tiempos de transmisión tienden a ser menores cuando la onda viaja paralela al grano y mayores cuando se dan de forma perpendicular al mismo (Wang et al., 2004). Esta diferencia también puede ser explicada por la existencia de elementos en la madera que disipan la transmisión de la onda de ultrasonido, como por ejemplo presencia de nudos, la inclinación de la fibra o médula, contenido de humedad, entre otros que ocasionan un aumento en el tiempo de transmisión de la onda de un extremo al otro, lo que da como resultado menores valores de MOE (Wang et al., 2007).

En tanto para el E_{ES} se obtuvo valores que oscilan entre 6,15 – 7,98 GPa y 9,41 – 11,47 GPa para las especies melina y teca respectivamente. Por su parte, Gonzáles y Serrano (2012), reportan valores de E_{ES} de 6,81 y 8,91 GPa para melina de plantaciones jóvenes en Costa Rica y bosque natural en la India respectivamente. A su vez, Gutiérrez et al., (2008), reportó valores de E_{ES} de 9,16 y 10, 65 GPa para la madera de árboles de teca correspondiente a

dos sitios distintos en Ecuador. Por lo que se tiene que los valores obtenidos de E_{ES} en este estudio son muy similares incluso algunos superiores a los reportados por otros autores para estas mismas especies.

Así mismo, se observó que la especie de teca presenta mayores valores de densidad respecto a la melina con resultados entre 444,32 – 531,54 kg/m³ y 594,11 – 697,25 kg/m³ respectivamente. Según Shmulsky y Jones (2011), la densidad de la madera influye en propiedades como el módulo de elasticidad y la rigidez, propiedades importantes en la fabricación de productos, en general maderas con una mayor densidad van a presentar un mayor módulo de elasticidad. Esto se logra apreciar en el cuadro 1, en este se nota una relación entre densidad y MOE, donde valores altos de densidad corresponden a su vez a resultados de MOE mayores.

Del mismo modo, se logró apreciar una tendencia de disminución del contenido de humedad respecto al aumento de temperatura de los tratamientos (cuadro 1), Inagaki et al. (2014) indicó la existencia de una fuerte relación entre la densidad de la madera y su contenido de humedad, es decir, a medida que aumenta el contenido de humedad aumenta la densidad. No obstante, ese comportamiento no fue obtenido en este estudio lo que se puede deber a las pérdidas de humedad generadas en el proceso de termo-tratamiento.

Finalmente, se obtuvo que existe variabilidad en los resultados respecto a los tratamientos aplicados. Para el caso de la melina se obtuvieron incrementos en E_{US} transversal, E_{US} longitudinal y E_{ES} de 50,64; 21,79 y 22,93 % respectivamente de acuerdo a los valores más bajos registrados en cada caso. Para la teca se obtuvieron incrementos en E_{US}

transversal, E_{US} longitudinal y E_{ES} de 38,11; 10,98 y 17,96 % respectivamente de acuerdo a los valores más bajos registrados en cada caso. Por su parte, se presentaron resultados de MOE en madera termo-tratada superiores a el valor obtenido para la madera sin someter al proceso de tratamiento térmico, coincidiendo con Kocaefe et al. (2010) quien obtuvo valores de MOE mayores en madera de pino termo-tratada en comparación con los de pino sin tratar.

En este mismo sentido, Hermoso et al. (2013) indicó que al aumentar la temperatura de tratamiento los valores de MOE tienden a disminuir a valores similares a las piezas sin tratar; además reporta valores medios de MOE para *Pinus radiata* sin diferencias significativas, por lo que induce una influencia mínima del termo-tratamiento sobre el E_{ES} y la densidad. No obstante, no corresponde a lo obtenido en este estudio, ya que los valores obtenidos de MOE no presentan una tendencia clara, por el contrario presentaron un comportamiento muy irregular.

Conclusiones

La evaluación de la densidad mostró una variación entre 444,32 a 531,54 kg/m³ y de 594,11 a 697,25 kg/m³ para melina y teca respectivamente. Los valores de densidad mayores para ambas especies corresponde al tratamiento donde las piezas de madera fueron expuestas a 180 °C de temperatura.

Los resultados de contenido de humedad mostraron una variación de 3,77 a 11,47 % y de 2,90 a 8 % para melina y teca respectivamente. El CH de humedad presentó una tendencia a disminuir conforme aumenta la temperatura de termo-tratamiento en las piezas.

La evaluación del módulo elástico por ultrasonido en sentido transversal y longitudinal mostró una variación entre 1,16 a 2,35 GPa y de 9,80 a 12,53 GPa respectivamente para melina. Para teca se mostró una variación de 1,90 a 3,07 GPa en sentido transversal y de 16,13 a 18,12 GPa en sentido longitudinal. Los valores de E_{US} en sentido longitudinal son superiores a los obtenidos en sentido transversal, independientemente de la especie y el tratamiento aplicado.

El método de ensayo de E_{ES} mostró una variación de 6,15 a 7,98 GPa y de 9,41 a 11,47 GPa para melina y teca respectivamente. Para el caso de melina los valores más altos se obtuvieron en los tratamientos donde las piezas se expusieron a 160 y 180° C y para teca para los tratamientos a 180 y 200 °C.

Hubo efecto del termo-tratamiento sobre el MOE, los mejores valores de MOE para la especie de melina correspondieron a los tratamientos a 160 y 180 °C con valores muy similares entre sí para todos los métodos de determinación. En tanto para teca se obtuvo que los mejores tratamientos fueron 180 y 200 °C para los métodos de ensayo de E_{US} en sentido longitudinal y E_{ES} con valores similares entre sí.

Referencias

- Acuña, L., Díez, M. R. y Casado, M. (2006). Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural: aplicación a *Pinus pinaster* Ait. Universidad de Huelva. 1-26.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, USA). (2003). D-1442-92. Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-base materials. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, ASTM. 04(10), 1-6.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, USA). (2014). D143-14. Standard test methods for small clear specimens of timber. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, ASTM. 04(10), 1-31
- Baradit, E., Niemz, P. y Fernández, A. (2013). Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 15(2), 235-244. doi: 10.4067/S0718-221X2013005000019
- Barrantes, A. y Ugalde, S. (2014). Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2013. Oficina Nacional Forestal, San José, Costa Rica. 1-30.
- Bekhta, P. y Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforchung*, 57(5), 539-546. doi: 10.1515/HF.2003.080
- García, R. A., de Carvalho, A. M., de Figueiredo, J. V., de Matos, J. L. M., Santos, W. A. y de Medeiros, R. F. (2012). Non destructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. *Wood Science and Technology*, 46(1-3), 41-52. doi: 10.1007/s00226-010-0387-6
- González, G. y Serrano, J. R. (2012). Propiedades y utilidades de la madera de melina (*Gmelina arborea* Roxb) procedente de árboles plantados en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 1(1), 61-69.
- Gunduz, G., Aydemir, D. y Karakas, G. (2009). The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. *Materials & Design*, 30(10), 4391-4395. doi:10.1016/j.matdes.2009.04.005
- Gutiérrez, R. C., Romero, E. J., Cunuhay, P. S., Blanco, G. L. y Fonseca, C. S. (2008). Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* LF) de Quevedo y Balzar. *Revista Ciencia y Tecnología*, 1(2), 55-63.
- Hermoso, E., Mateo, R., Cabrero, J. C. y Fernández, J. I. (2013). Tratamientos térmicos versus propiedades mecánicas en madera de *Pinus radiata*. In Congreso Forestal, 1-9.
- Holdridge, L. R. (1967). Life Zone Ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica, 260 p.
- Inagaki, T., Ahmed, B., Hartley, I. D., Tsuchikawa, S. y Reid, M. (2014). Simultaneous prediction of density and moisture content of wood by terahertz time domain spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35(11), 949-961. doi: 10.1007/s10762-014-0095-7

- Kesik, H. I., Korkut, S., Hiziroglu, S. y Sevik, H. (2014). An evaluation of properties of four heat treated wood species. *Industrial Crops and Products*, 60, 60-65. doi:10.1016/j.indcrop.2014.06.001
- Kocafe, D., Poncsak, S., Tang, J. y Bouazara, M. (2010). Effect of heat treatment on the mechanical properties of North American jack pine: thermogravimetric study. *Journal of materials science*, 45(3), 681-687. doi:10.1007/s10853-009-3985-7
- Kwon, J. H., Shin, R. H., Ayrlmis, N. y Han, T. H. (2014). Properties of solid wood and laminated wood lumber manufactured by cold pressing and heat treatment. *Materials & Design*, 62, 375-381. doi:10.1016/j.matdes.2014.05.032
- Muñoz, F. (2012). Determinación del módulo elástico de Young en tableros contrachapados de madera de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(23), 29-34.
- Nzokou, P., Freed, J. y Kamdem, D. P. (2006). Relationship between non destructive and static modulus of elasticity of commercial wood plastic composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 64(2), 90-93. doi: 10.1007/s00107-005-0080-x
- Priadi, T. y Hiziroglu, S. (2013). Characterization of heat treated wood species. *Materials & Design*, 49, 575-582. doi:10.1016/j.matdes.2012.12.067
- Roldán, J. M. (2014). Influencia de la humedad y densidad en la dureza como propiedad físico-mecánica de la madera. Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Madrid, España 1-92.
- Santana, F. J. (2006). Comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio. (Tesis de ingeniería Forestal, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales). 1-34.
- Solórzano, S., Moya, R., y Murillo, O. (2012). Early prediction of basic density, shrinking, presence of growth stress, and dynamic elastic modulus based on the morphological tree parameters of *Tectona grandis*. *Journal of wood science*, 58(4), 290-299. doi:10.1007/s10086-012-1261-y
- Shmulsky, R. y Jones, P. D. (2011). *Forest products and wood science: An Introduction*. 6th edición. John Wiley & Sons. 197-227 and 289-319.
- Sotomayor, J.R. (2014). Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 1-339.
- Trevisan, H., de Figueiredo, J. V., Pacheco dos Santos, A. L., Teixeira, J. G. y de Carvalho, A. G. (2014). Analysis of rigidity loss and deterioration from exposure in a decay test field of thermorectified *Eucalyptus grandis* wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(2), 217-226. doi:10.4067/S0718-221X2014005000017
- Wang, X., Divos, F., Pilon, C., Brashaw, B. K., Ross, R. J., y Pellerin, R. F. (2004). Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools. A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-147. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 12.
- Wang, X., Carter, P., Ross, R. J., y Brashaw, B. K. (2007). Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials: a path to increased profitability. *Forest Products Journal*. 57(5), 6-14.