

Módulos de elasticidad y de ruptura de madera laminada de tres especies tropicales

Modules of elasticity and rupture of laminated wood of three tropical species

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*}, Koji Adachi², Iida Ryuichi³, Tomoyuki Hayashi²

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México. Correo electrónico: mader999@yahoo.com

²Akita Prefectural University, Institute of Wood Technology.

³Tokyo Polytechnic University.

*Autor de correspondencia

Resumen

El correcto empleo de vigas laminadas requiere que su resistencia mecánica sea caracterizada. La investigación tuvo como objetivo determinar la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura en probetas de pequeñas dimensiones de madera sólida y laminada de *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* y *Jouglas pyriformis*. Se concluye que la madera laminada, fabricada con madera de la misma especie, incrementa su densidad. Pero, para el caso de los módulos de elasticidad y de ruptura, estos aumentan o disminuyen dependiendo de la especie y/o dependiendo de si se trata de madera sólida o laminada. Los resultados de las pruebas de flexión sugieren que la magnitud del módulo de elasticidad y del módulo de ruptura son similares a los reportados en la literatura para madera sólida y laminada, fabricadas con adhesivos de poliacetato de vinil.

Palabras clave: Madera sólida; madera laminada; densidad; módulo de elasticidad; módulo de ruptura.

Abstract

The correct use of laminated beams requires that their mechanical strength be characterized. The objective of the research was to determine the density, the modulus of elasticity and the modulus of rupture in small sized specimens of solid and laminated wood of *Enterolobium cyclocarpum*, *Tabebuia rosea* and *Jouglas pyriformis*. It is concluded that laminated wood, made with wood of the same species, increases its density. But, for the case of the modulus of elasticity and rupture, they increase or decrease depending on the species and/or depending on whether the wood is solid or laminated. The results of the bending tests suggest that the magnitude of the modulus of elasticity and the modulus of rupture are similar to those reported in the literature for solid and laminated wood, manufactured with vinyl polyacetate adhesives.

Keywords: Solid wood; laminated wood; density; modulus of elasticity; modulus of rupture.

Recibido: 23 de diciembre de 2017

Aceptado: 8 de febrero de 2019

Publicado: 25 de septiembre de 2019

Como citar: Sotomayor-Castellanos, J. R., Adachi, K., Ryuichi, I., & Hayashi, T. (2019). Módulos de elasticidad y de ruptura de madera laminada de tres especies tropicales. *Acta Universitaria* 29, e2178. doi. <http://doi.org/10.15174/au.2019.2178>

Introducción

En tecnología de la madera, la tendencia contemporánea es aprovechar integralmente el recurso forestal maderable, considerado como biomasa con un carácter de sustentabilidad ecológica (Kohl, Long & Böhm, 2017). En este contexto, el fabricante de productos de madera necesita tomar en cuenta que las características físicas y mecánicas de la madera aserrada son diversas entre especies y que la madera es un material heterogéneo (Bowyer, Shmulsky & Haygreen, 2007). Además, las dimensiones de los troncos de los cuales se recortan piezas de madera son cada vez más pequeñas. Así, para un aprovechamiento óptimo del recurso se tiene que transformar la forma irregular de los fustes de un árbol, en piezas comerciales con geometría de paralelepípedo, con dimensiones precisas y con características de resistencia mecánica estandarizadas (Walker, 2006).

Para confrontar este problema, se ha desarrollado una tecnología que transforma la materia prima, madera, a partir de su estado natural, en un material con características de resistencia mecánica equivalentes, al menos, a las de la madera sólida. Uno de estos procesos es la reconstitución de la madera en piezas reconstruidas con pequeños elementos y unidas con adhesivos apropiados para cada uso en particular. Este material es referido en la bibliografía como madera laminada (Bourreau, Aimene, Beauchêne & Thibaut, 2013). Una de las formas de la madera laminada es la de vigas laminadas. Así, la sustancia madera, transformada en un material de ingeniería, está hecho de láminas de madera aserrada, dispuestas en capas horizontales, utilizando pegamento. La madera laminada se emplea como elemento resistente en estructuras de edificaciones (Hayashi & Miyatake, 2015), pero en dimensiones pequeñas se utiliza como componente de muebles (Gaff & Gáborik, 2014) y en otros productos que se incorporan en la industria de la construcción (Kohl, Link & Böhm, 2016).

El correcto empleo de vigas laminadas a nivel industrial requiere que sus propiedades estructurales sean determinadas. Esta caracterización se lleva a cabo con pruebas de laboratorio, utilizando piezas de madera laminada con dimensiones de empleo y aplicando protocolos de ensayo prescritos en normas desarrolladas y aceptadas por la industria o por instituciones de normalización, por ejemplo, la norma ASTM D 198-15 (*American Society for Testing Materials [ASTM] International, 2015*). Otro enfoque para determinar las características mecánicas de vigas de madera sólida y laminada es estudiar probetas de pequeñas dimensiones y preparadas en laboratorio y, a partir de estos resultados, predecir aplicaciones prácticas para vigas laminadas. En este caso, se emplean normas para estudiar probetas de madera de pequeñas dimensiones, por ejemplo, la norma ASTM D143-14 (ASTM International, 2014).

Con esta perspectiva, las investigaciones de Araujo, Cerón, Chan & Azueta (2005); Erdil, Kasal, Zhang, Efe & Dizei (2009); Keskin (2009); Gaff & Gáborik (2014); Nadir & Naragajan (2014); Komariah, Hadi, Massijaya & Suryana (2015); y Gáborik *et al.* (2016) reportan trabajos para determinar y comparar la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura para madera sólida y laminada. Estas investigaciones estudian diferentes especies de madera, distintos tipos de adhesivos y diversos protocolos de fabricación. Las pruebas recomendadas son las de flexión estática normalizadas, empleando probetas de pequeñas dimensiones (0.05 m x 0.05 m x 0.76 m) y adheridas con pegamentos a base de acetato de polivinilo, aplicado en proporciones de 175 g m⁻² a 280 gr m⁻². Sus resultados son particulares a cada investigación. Por una parte, reportan un aumento en la densidad de la madera laminada, con respecto a la madera sólida; sin embargo, y no obstante que los protocolos experimentales son similares, reportan diferencias respecto al aumento y/o a la disminución de los módulos de elasticidad y de ruptura entre la madera sólida y la laminada (tabla 1).

Tabla 1. Densidad, módulo de elasticidad y módulo de ruptura de madera sólida y laminada reportados en la bibliografía (2005-2016).

Referencia	Especie	ρ_{CH} (kg m^{-3})	MOE (MN m^{-2})		MOR (N m^{-2})	
			S	L	S	L
Araujo <i>et al.</i> (2005)	<i>E. cyclocarpum</i>	350	4618	-	40.30	-
Araujo <i>et al.</i> (2005)	<i>E. cyclocarpum</i>	nr	-	3657‡	-	30.99‡
Araujo <i>et al.</i> (2005)	<i>B. simaruba</i>	430	4336	-	31.18	-
Araujo <i>et al.</i> (2005)	<i>B. simaruba</i>	nr	-	4185‡	-	34.32‡
Araujo <i>et al.</i> (2005)	<i>B. buceras</i>	850	10 274	-	93.85	-
Araujo <i>et al.</i> (2005)	<i>B. buceras</i>	nr	-	10 089‡	-	101.20‡
Erdil <i>et al.</i> (2009)	<i>F. orientalis</i>	630	15 503	-	130.80	-
Erdil <i>et al.</i> (2009)	<i>F. orientalis</i>	650	-	10 647‡	-	97.59‡
Erdil <i>et al.</i> (2009)	<i>P. nigra</i>	330	6304	-	62.95	-
Erdil <i>et al.</i> (2009)	<i>P. nigra</i>	430	-	8020‡	-	72.47‡
Keskin (2009)	<i>Q. petrea</i>	639	-	-	112.08	-
Keskin (2009)	<i>Q. petrea</i>	666	-	-	-	116.30‡
Keskin (2009)	<i>F. orientalis</i>	650	-	-	123.45	-
Keskin (2009)	<i>F. orientalis</i>	673	-	-	-	126.53‡
Gaff & Gáborik (2014)	<i>F. sylvatica</i>	530	12 000	-	-	-
Gaff & Gáborik (2014)	<i>F. sylvatica</i>	nr	-	10 000‡	-	-
Nadir & Naragajan (2014)	<i>H. brasiliensis</i>	605	10 448	-	69.14	-
Nadir & Naragajan (2014)	<i>H. brasiliensis</i>	nr	-	9512‡	-	67.08‡
Komariah <i>et al.</i> (2015)	<i>A. mangium</i>	533	11 930	-	54.38	-
Komariah <i>et al.</i> (2015)	<i>A. mangium</i>	440	-	8709‡	-	48.66‡
Komariah <i>et al.</i> (2015)	<i>M. eminii</i>	392	10 166	-	48.55	-
Komariah <i>et al.</i> (2015)	<i>M. eminii</i>	483	-	9696‡	-	59.61‡
Komariah <i>et al.</i> (2015)	<i>F. moluccana</i>	271	6037	-	33.82	-
Komariah <i>et al.</i> (2015)	<i>F. moluccana</i>	290	-	6209‡	-	33.08‡
Gáborik <i>et al.</i> (2016)	<i>F. sylvatica</i>	530	11 654	-	130.20	-
Gáborik <i>et al.</i> (2016)	<i>F. sylvatica</i>	nr	-	10 102‡	-	101.70‡

ρ_{CH} = densidad; MOE = módulo de elasticidad; MOR = módulo de ruptura; S = madera sólida; L = madera laminada; † = aumento; ‡ = disminución; nr = no reportado.

Fuente: Elaboración propia.

Ante la incertidumbre en el aumento o la disminución de los módulos de elasticidad y de ruptura de la madera sólida, cuando esta se reconstruye en piezas laminadas, la presente investigación tuvo como objetivo determinar la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura en probetas de pequeñas dimensiones de madera sólida y laminada de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. y *Jouglas pyriformis* Liebm. Esta propuesta se restringe al estudio de probetas de madera de pequeñas dimensiones, solicitadas en flexión estática y adheridas con acetato de polivinilo.

E. cyclocarpum, *T. rosea* y *J. pyriformis* son especies endémicas de México y Centroamérica. Su importancia ecológica está notificada en documentos publicados por la Comisión Nacional para el

Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) y por la Comisión Nacional Forestal (Conafor). Sus características tecnológicas están reportadas por Tamarit & López (2007), Silva *et al.* (2010) y Sotomayor (2015).

Materiales y Métodos

Se adquirieron en establecimientos comerciales en el estado de Michoacán (Longitud oeste 101° 49' 59.99", Latitud Norte 19° 10' 0.01") piezas de madera aserrada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyrifomis*, a partir de las cuales se recortaron probetas con geometría de paralelepípedo y láminas para fabricar madera laminada. Todas las probetas estuvieron orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera, libres de defectos de crecimiento y maquinado. La madera y las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento durante seis meses con una temperatura de 25 °C (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 65% ($\pm 2\%$), hasta que su peso fue constante.

Para cada especie se prepararon dos grupos de probetas con dimensiones de 0.02 m \times 0.02 m de sección transversal en las direcciones radial y tangencial y de 0.4 m de largo en la dirección longitudinal. Se fabricó un primer grupo de 35 piezas de madera sólida y un segundo grupo de 35 probetas de madera reconstituida con cinco tabletas (figura 1).

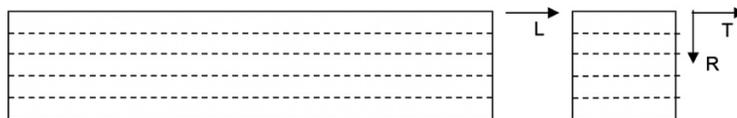


Figura 1. Estructura de las probetas de madera laminada. R = dirección radial; T = dirección tangencial; L = dirección longitudinal.
Fuente: Elaboración propia.

Para adherir las tabletas, se aplicaron 2.5 kg m⁻² de pegamento de contacto a base de resina de poliacetato de vinilo, repartidos en las cuatro caras interiores de las viguetas, correspondientes al plano longitudinal-radial. Una vez armadas las probetas, se posicionaron en un dispositivo *ad-hoc* y se prensaron en la dirección tangencial hasta que las viguetas alcanzaron un espesor uniforme. Con el objetivo de que el adhesivo solidificara, el tiempo de prensado fue de 48 h en ambiente de laboratorio (Temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65%). Finalmente, todas las probetas se almacenaron durante un mes en la cámara de acondicionamiento con las condiciones de temperatura y de humedad relativa del aire antes citadas hasta que su peso fue constante.

Las pruebas de flexión tres puntos se realizaron en una máquina universal para pruebas de resistencia de materiales marca TENSILON® (Japón) con capacidad de 25 kN. La velocidad de carga fue de 10 mm min⁻¹. La carga y la deformación en medio de la distancia entre apoyos se capturaron con una frecuencia de 1 Hz en un sistema de captura y tratamiento de datos marca TACT® (Japón).

Para determinar el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura, se midió la pendiente de la porción recta de la gráfica de carga vs. la deformación en el intervalo elástico comprendido entre 0.1 a 0.4 de la carga a la ruptura. La relación distancia entre apoyos y espesor de la probeta (L_{flex}/h) fue de 16. La figura 2 presenta la configuración de las pruebas de flexión. Una vez terminadas estas pruebas, en un extremo de cada probeta se recortó un segmento de 0.06 m de longitud para realizar los ensayos de densidad y de contenido de humedad.

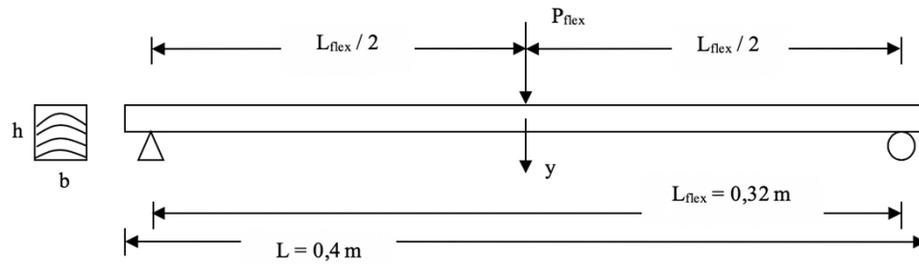


Figura 2. Configuración de las pruebas de flexión estática. P_{flex} = carga; y_{flex} = deformación; L = largo de la probeta; L_{flex} = distancia entre apoyos; h = altura de la probeta (0.02 m); b = base de la probeta (0.02 m).

Fuente: Elaboración propia.

El módulo de elasticidad se calculó con la fórmula (1):

$$MOE = \frac{P_{flex}}{y_{flex}} \frac{L_{flex}^3}{48 I} \quad (1)$$

donde:

MOE = módulo de elasticidad ($N m^{-2}$);

P_{flex} = carga (N);

L_{flex} = distancia entre apoyos (m);

y_{flex} = deformación (m); y

I = momento de inercia de la sección transversal (m^4).

El módulo de ruptura se calculó con la fórmula (2):

$$MOR = \frac{3}{2} \frac{P_{rup} L_{flex}}{b h^2} \quad (2)$$

donde:

MOR = módulo de ruptura ($N m^{-2}$);

P_{rup} = carga a la ruptura (N);

L_{flex} = distancia entre apoyos (m);

b = base de la probeta (m); y

h = altura de la probeta (m).

La densidad de la madera correspondiente a un contenido de humedad (CH) se calculó con el peso de la probeta al momento del ensayo en relación con su volumen al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization [ISO], 2014a). La densidad de la madera fue calculada con la fórmula (3):

$$\rho_{CH} = \frac{P_1}{V} \quad (3)$$

donde:

ρ_{CH} = densidad de la madera (kg m^{-3});

P_1 = peso de la probeta al momento del ensayo (kg); y

V = volumen de la probeta (m^{-3}).

El contenido de humedad de la madera se calculó con el peso de la probeta al momento del ensayo, con relación a su peso en estado anhidro, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (ISO, 2014b). El contenido de humedad se calculó con la fórmula (4):

$$CH = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \quad (4)$$

donde:

CH = contenido de humedad (%);

P_1 = peso de la probeta al momento del ensayo (kg); y

P_2 = peso de la probeta en estado anhidro (kg).

Diseño experimental

Para cada una de las dos muestras (madera sólida como grupo de control y madera laminada) de las tres especies *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyrifomis*, las variables de respuesta fueron el módulo de elasticidad (MOE, fórmula 1), el módulo de ruptura (MOR, fórmula 2) y la densidad (ρ_{CH} , fórmula 3). El contenido de humedad (CH, fórmula 4) se consideró parámetro de referencia. A partir de los resultados de 35 réplicas por cada muestra, se calcularon su media (\bar{x}), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma / \bar{x}$).

Para el estado de la madera sólida (S) vs. el estado de la madera laminada (L) se consideró el factor de variación. Así, para cada una de las variables de respuesta, correspondientes a una muestra, se realizaron pruebas de normalidad de sesgo estandarizado (SE) y de curtosis estandarizada (CE). Asimismo, para cada par de muestras correspondiente al factor de variación (S vs. L), se practicaron pruebas de igualdad de varianzas (ver-var) y de análisis de varianzas (anova), ambas pruebas para un 95% de confiabilidad.

Cuando los resultados de las pruebas de normalidad se situaron fuera del intervalo (-2, +2), se rechazó la normalidad de la distribución de la muestra y se procedió a realizar pruebas no paramétricas de

diferencia de medianas de *Kruskal-Wallis* (K-W) para un 95% de confiabilidad. El criterio de demarcación para las pruebas *ver-var*, *anova* y *K-W* fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para un valor $p > 0.05$. En ambos casos, la hipótesis nula $H_0: \bar{x}_S - \bar{x}_L = 0$ se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{x}_S - \bar{x}_L \neq 0$. En las hipótesis, la media \bar{x} se sustituyó por la mediana \bar{X} para el caso de las pruebas no paramétricas de *Kruskal-Wallis*. Los subíndices S y L representan el valor correspondiente a las variables de respuesta para la madera sólida y laminada.

A partir de los resultados mezclados de madera sólida y madera laminada, correspondientes a las muestras combinadas de las tres especies (105 resultados por variable de respuesta), se determinaron las regresiones lineales ($y = ax \pm b$) y su coeficiente de determinación (R²) para las variables dependientes MOE y MOR en función de la variable independiente densidad (ρ_{CH}). Estos resultados se contrastaron con los datos comparables y reportados en la bibliografía para el periodo 2005-2016 y presentados en la tabla 1.

Resultados

La media (\bar{x}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV) del contenido de humedad (CH), la densidad (ρ_{CH}), el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR), de madera sólida (S) y madera laminada (L) se presentan en la tabla 2. Ahí se anotan, como diferencias aritméticas entre dos muestras (madera sólida vs. madera laminada), el símbolo † para señalar un aumento y el símbolo ‡ para indicar una disminución. Ambos símbolos se refieren a las medias y/o a los coeficientes de variación. Las desviaciones estándar se presentan como referencia para el cálculo del coeficiente de variación: $CV = \sigma / \bar{x}$.

Tabla 2. Contenido de humedad, densidad, módulo de elasticidad y módulo de ruptura de madera sólida y laminada.

	\bar{x}	σ	CV
Contenido de humedad (%)			
Madera sólida <i>E. cyclocarpum</i>	10.78	0.66	6.1
Madera laminada <i>E. cyclocarpum</i>	10.49†	0.67	6.4†
Madera sólida <i>T. rosea</i>	10.74	0.49	4.6
Madera laminada <i>T. rosea</i>	9.66‡	0.64	6.6†
Madera sólida <i>J. pyriformis</i>	9.28	0.81	8.7
Madera laminada <i>J. pyriformis</i>	9.46†	0.97	10.3†
Densidad (kg m⁻³)			
Madera sólida <i>E. cyclocarpum</i>	456	47.2	10.4
Madera laminada <i>E. cyclocarpum</i>	501†	38.4	7.7‡
Madera sólida <i>T. rosea</i>	621	44.8	7.2
Madera laminada <i>T. rosea</i>	626†	29.0	4.6‡
Madera sólida <i>J. pyriformis</i>	695	57.5	8.3
Madera laminada <i>J. pyriformis</i>	740†	51.5	7.0‡
Módulo de elasticidad (MN m⁻²)			
Madera sólida <i>E. cyclocarpum</i>	5386	686.2	12.7
Madera laminada <i>E. cyclocarpum</i>	5423†	754.9	13.9†
Madera sólida <i>T. rosea</i>	10 692	940.9	8.8

Madera laminada <i>T. rosea</i>	10 821 [†]	903.6	8.4 [‡]
Madera sólida <i>J. pyriformis</i>	9814	1621.0	16.5
Madera laminada <i>J. pyriformis</i>	9133 [‡]	1456.0	15.9 [‡]
<hr/>			
Módulo de ruptura (MN m ⁻²)			
Madera sólida <i>E. cyclocarpum</i>	59.1	9.7	16.4
Madera laminada <i>E. cyclocarpum</i>	49.6 [‡]	7.2	14.5 [‡]
Madera sólida <i>T. rosea</i>	104.2	11.7	11.2
Madera laminada <i>T. rosea</i>	92.5 [‡]	11.0	11.9 [‡]
Madera sólida <i>J. pyriformis</i>	103.7	17.7	17.0
Madera laminada <i>J. pyriformis</i>	88.2 [‡]	14.1	16.0 [‡]
<hr/>			
\bar{x} = media; σ = desviación estándar; CV = coeficiente de variación en porcentaje; † = aumento (diferencia aritmética); ‡ = disminución (diferencia aritmética).			

Fuente: Elaboración propia

Discusión

Contenido de humedad

El contenido de humedad de la madera varió desde un valor mínimo de 9.28% (Madera sólida *J. pyriformis*) hasta un máximo de 10.78% (Madera sólida *E. cyclocarpum*), de tal forma que el coeficiente de variación máximo al interior de una muestra fue de 10.3% para madera laminada de *J. pyriformis*. Además, el coeficiente de variación del contenido de humedad de la madera fue, para todas las muestras, superior en la madera laminada. Sin embargo, el contenido de humedad de la madera laminada, en comparación con el de la madera sólida, disminuyó para *E. cyclocarpum* y *T. rosea*, pero fue superior para *J. pyriformis* (tabla 2). Así, se consideró a la madera en estado seco y sin una variación que pudiera modificar la magnitud de los parámetros determinados al momento de las pruebas.

Densidad

La densidad de la madera varió desde un mínimo de 456 kg m⁻³ (Madera sólida *E. cyclocarpum*) hasta un máximo de 740 kg m⁻³ (Madera laminada *J. pyriformis*). La densidad de la madera aumentó en la madera laminada en comparación con la madera sólida. Esto para cada una de las tres especies. Además, el coeficiente de variación igualmente disminuyó en la madera laminada de las tres especies, en comparación con la madera sólida (tabla 2). Estos resultados sugieren que la fabricación de madera laminada, utilizando láminas de la misma especie, incrementa su densidad y disminuye su heterogeneidad. Sin embargo, este corolario es particular para las tres especies estudiadas en esta investigación y para el procedimiento de fabricación en condiciones de laboratorio.

En efecto, la bibliografía reporta resultados que varían de acuerdo con la especie en estudio y a las especificaciones en la fabricación de la madera laminada. Por ejemplo, Keskin (2009) reporta un incremento en la densidad de la madera laminada con respecto a la madera sólida de 3.4% para *F. orientalis* y de 4.2% para *Q. pétrea*. En cambio, Komariah et al. (2015) reportan una disminución de densidad en la madera laminada de 16.8% para *A. mangium*, al mismo tiempo que determinan un aumento de 23.2% para *M. eminii* y de 7% para *F. moluccana* (tabla 1). Este resultado sugiere la observación de este fenómeno caso por caso, es decir, especie por especie en seguimiento al paradigma en investigación de las características físicas de la madera y sus productos compuestos (Sotomayor & Correa-Jurado, 2016).

Módulo de elasticidad

De acuerdo con los resultados de esta investigación (2017), el módulo de elasticidad de la madera laminada aumentó en comparación con el de la sólida para *E. cyclocarpum* (0.7%) y *T. rosea* (1.2%). En cambio, disminuyó para *J. pyriformis* (6.9%).

Este resultado combinado es comparable a los reportados en la bibliografía (tabla 1). Erdil *et al.* (2009) reportan un incremento de 27.2% para *P. nigra* y Komariah *et al.* (2015) logran un incremento de 2.8% para *F. moluccana*. Aun así, el módulo de elasticidad de la madera laminada disminuyó en los resultados reportados por Araujo *et al.* (2005) para *E. cyclocarpum* (20.8%), *B. simaruba* (3.5%) y *B. buceras* (1.8%). Igualmente, Erdil *et al.* (2009) reportan un decremento de 31.3% para *F. orientalis*, Gaff & Gáborik (2014) presentan un decremento de 16.7% para *F. sylvatica*, Nadir & Naragajan (2014) obtienen un decremento de 9% para *H. brasiliensis*, Komariah *et al.* (2015) reportan un decremento de 27% para *A. mangium* y 4.6 % para *M. eminni* y Gáborik *et al.* (2016) registran un decremento de 13.3% para *F. sylvatica*.

Módulo de ruptura

En esta investigación, el módulo de ruptura de la madera laminada en comparación con el de la madera sólida aumentó 6.3% para *T. rosea*; en cambio, disminuyó 11.6% para *E. cyclocarpum* y 5.6% para *J. pyriformis* (tabla 2).

Esta tendencia para obtener resultados particulares para cada especie es reportada en la bibliografía (tabla 1). Por una parte, el módulo de ruptura de la madera laminada aumentó 10% para *B. simaruba* y 7.8% para *B. buceras* (Araujo *et al.*, 2005), 15.1% para *P. nigra* (Erdil *et al.*, 2009), 3.8% para *Q. petrea*, 2.5% para *F. orientalis* (Keskin, 2009) y 22.8% para *M. eminii* (Komariah *et al.*, 2015). Por otra parte, el módulo de ruptura de la madera laminada disminuyó 23.1% para *E. cyclocarpum* (Araujo *et al.*, 2005), 25.4% para *F. orientalis* (Erdil *et al.*, 2009), 3% para *H. brasiliensis* (Nadir & Naragajan, 2014), 10.6% para *A. mangium*, 2.2% *F. moluccana* (Komariah *et al.*, 2015) y 21.9% para *F. sylvatica* (Gáborik *et al.*, 2016).

Respecto al módulo de elasticidad y de ruptura, la literatura reporta que la magnitud de estos dos parámetros aumenta proporcionalmente a la densidad de la madera (Niklas & Spatz, 2010; Onoda, Richards & Westoby, 2010). Sin embargo, este paradigma se refiere a resultados con madera sólida. De manera que el aumento artificial de la densidad de la madera no resulta necesariamente en un aumento de sus módulos de elasticidad y de ruptura.

Coefficientes de variación de MOE y MOR

Respecto al coeficiente de variación del módulo de elasticidad de la madera laminada, con relación al de la madera sólida, aumentó para *E. cyclocarpum* (9.5%), pero disminuyó para *T. rosea* (4.5%) y *J. pyriformis* (3.6%) (tabla 2). Ahora, bien, para el coeficiente de variación del módulo de ruptura de la madera laminada, con relación al de la madera sólida, se observó un aumento para *T. rosea* (6.3%) y, en cambio, el coeficiente de variación disminuyó para *E. cyclocarpum* (11.6%) y *J. pyriformis* (5.6%).

Esta diferencia en los resultados al interior de una especie y medida, en términos del coeficiente de variación del módulo de elasticidad y del de ruptura, ha sido reportada, entre otros autores, por Araujo *et al.* (2005): MOE de madera sólida de *E. cyclocarpum* 23.9%, *B. simaruba* 11% y *B. buceras* 16.3%; MOE de madera laminada de *E. cyclocarpum* 10.7%, *B. simaruba* 6.4% y *B. buceras* 15.8%; MOR de madera sólida de *E. cyclocarpum* 18%, *B. simaruba* 15.1% y *B. buceras* 23%; y MOR de madera laminada de *E. cyclocarpum* 20.3%, *B. simaruba* 13.1% y *B. buceras* 17.2%. En el mismo contexto, Gáborik *et al.* (2016) reporta diferentes

coeficientes de elasticidad para el MOE de madera sólida de *F. sylvatica* (7.6%) y MOE de madera laminada de *F. sylvatica* (8.5%), así como para el MOR de madera sólida de *F. sylvatica* (9.8%) y el MOR de madera laminada de *F. sylvatica* (6,4 %).

Análisis estadístico

La tabla 3 presenta los resultados del análisis estadístico propuesto por el diseño experimental. En él se presentan todos los resultados de las pruebas para las diferentes muestras observadas: de normalidad (sesgo estandarizado [SE] y curtosis estandarizada, [CE]), de igualdad de varianza (ver-var), de análisis de varianza (anova) y de las pruebas no paramétricas de diferencias de medianas (*Kruskal-Wallis*, K-W).

Tabla 3. Resultados del análisis estadístico.

	SE	CE	p ver-var	p anova	p K-W
Densidad (ρ_{CH})					
ρ_{CH} EC S	1.754	0.846	-	-	-
ρ_{CH} EC L	-2.044 [#]	2.225 [#]	-	-	-
ρ_{CH} EC S vs. ρ_{CH} EC L	-	-	0.260	-	< 0.001*
ρ_{CH} TR S	-3.254 [#]	3.570 [#]	-	-	-
ρ_{CH} TR L	1.096	-0.436	-	-	-
ρ_{CH} TR S vs. ρ_{CH} TR L	-	-	0.299	-	0.764
ρ_{CH} JP S	3.626 [#]	2.854 [#]	-	-	-
ρ_{CH} JP L	1.324	-0.356	-	-	-
ρ_{CH} JP S vs. ρ_{CH} JP L	-	-	0.767	-	0.001*
Módulo de elasticidad (MOE)					
MOE EC S	-1.276	0.296	-	-	-
MOE EC L	1.655	2.299 [#]	-	-	-
MOE EC S vs. MOE EC L	-	-	0.937	-	0.805
MOE TR S	-2.912 [#]	3.012 [#]	-	-	-
MOE TR L	-0.916	-0.085	-	-	-
MOE TR S vs. MOE TR L	-	-	0.758	-	0.759
MOE JP S	1.674	0.027	-	-	-
MOE JP L	0.244	-0.696	-	-	-
MOE JP S vs. MOE JP L	-	-	0.586	0.069	-
Módulo de ruptura (MOR)					
MOR EC S	-1.58	1.164	-	-	-
MOR EC L	-0.773	1.499	-	-	-
MOR EC S vs. MOR EC L	-	-	0.088	< 0.001*	-
MOR TR S	-2.291 [#]	1.037	-	-	-
MOR TR L	-1.774	1.143	-	-	-
MOR TR S vs. MOR TR L	-	-	0.916	-	< 0.001*
MOR JP S	-0.457	-1.017	-	-	-
MOR JP L	-0.156	-0.813	-	-	-
MOR JP S vs. MOR JP L	-	-	0.111	< 0.001*	-

Legenda: EC = *E. cyclocarpum*; TR = *T. rosea*; JP = *J. pyriformis*; S = madera sólida; L = madera laminada; SE = sesgo estandarizado; CE = curtosis estandarizada; [#] = valor fuera del intervalo [-2, +2]; ver-var = igualdad de varianza; anova = análisis de varianza; K-W = prueba de *Kruskal-Wallis*; p = valor p (95 % de confiabilidad); * Diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0,05$).

Fuente: Elaboración propia.

Pruebas de igualdad de varianza

Las pruebas de igualdad de varianza para todas las muestras confirmaron valores de $p \geq 0.05$ (tabla 3). En consecuencia, se concluyó que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre las

desviaciones estándar de las muestras. Así, se procedió al análisis de varianza y, en su caso, a las pruebas de *Kruskal-Wallis*.

Pruebas de normalidad

Con excepción del módulo de elasticidad para *J. pyriformis* y del módulo de ruptura para *E. cyclocarpum* y *J. pyriformis*, las distribuciones de las otras muestras se situaron fuera del intervalo de normalidad (-2, +2), que se definió como el criterio de demarcación para una distribución normal. Cuando fue el caso, para la comparación de las otras muestras, se procedió a un análisis de medianas (Prueba de *Kruskal-Wallis*) (tabla 3).

Pruebas de hipótesis

Las pruebas de diferencias de medianas de la densidad entre madera sólida vs. madera laminada resultaron en diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) para *E. cyclocarpum* y *J. pyriformis*, pero para *T. rosea* no se detectó una diferencia estadísticamente significativa ($p \geq 0.05$).

Para el módulo de elasticidad de *J. pyriformis* no se observó una diferencia estadísticamente significativa entre medias ($p \geq 0.05$), entre la madera sólida y laminada. Igualmente, pero en estos casos para diferencias de medianas correspondientes a *E. cyclocarpum* y *T. rosea*, tampoco se observó una diferencia estadísticamente significativa ($p \geq 0.05$).

Para el módulo de ruptura, las pruebas de diferencias de medias entre madera sólida vs. madera laminada resultaron en diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) para *E. cyclocarpum* y *J. pyriformis*. Asimismo, pero para pruebas de diferencias de medianas, se encontró una diferencia estadísticamente significativa para *T. rosea* ($p \leq 0.05$).

No se observó ninguna tendencia de las variables de respuesta (densidad, módulo de elasticidad y módulo de ruptura) en la comparación de las muestras observadas. No obstante que las condiciones experimentales fueron similares para los dos estados del material (madera sólida y madera laminada) para las tres especies en estudio (*E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriformis*), los resultados sugieren que la respuesta y/o comportamiento observado es particular a cada especie, a cada estado de la madera -sea sólida o laminada- y/o a la característica determinada experimentalmente, en este caso, a la densidad, al módulo de elasticidad y al módulo de ruptura.

En efecto, la bibliografía refiere el paradigma contemporáneo en ciencias de la madera que rige en investigación e ingeniería de la madera:

...Es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera, y con datos derivados de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. Una vez teniendo observaciones integrantes y estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico, y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar (Sotomayor & Correa-Jurado, 2016).

Correlaciones

Las figuras 3 y 4 presentan las correlaciones lineales ($y = ax \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2) para los datos combinados de las tres especies en estudio de esta investigación (2017). En los mismos

gráficos, y para contrastar resultados, se presentan las correlaciones calculadas empleando los datos de la bibliografía (2005-2016) presentadas en la tabla 1.

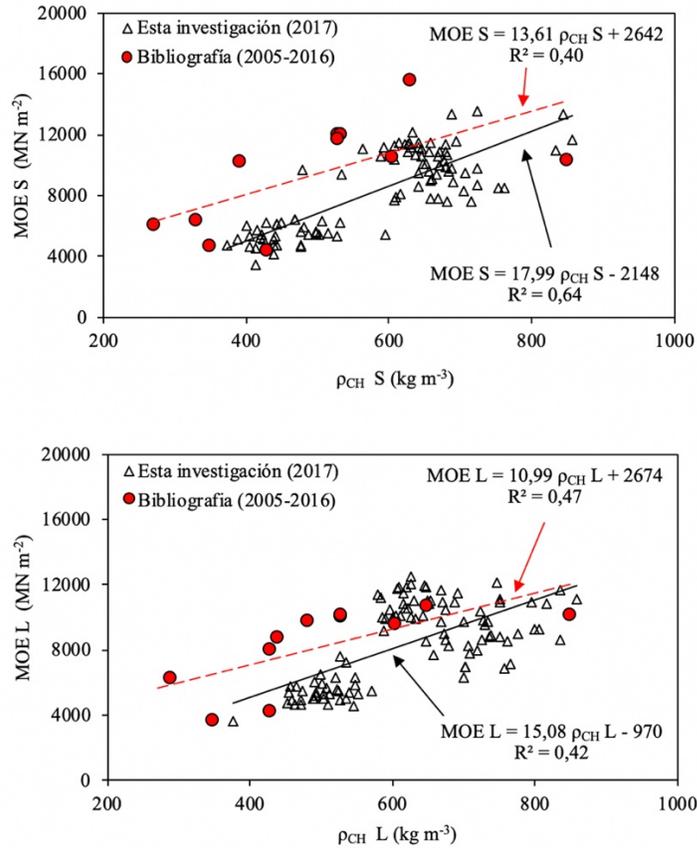


Figura 3. Dispersiones, regresiones y coeficientes de determinación (R^2) del módulo de elasticidad (MOE) en función de la densidad (ρ_{CH}), de madera sólida (S) y laminada (L).
Fuente: Elaboración propia.

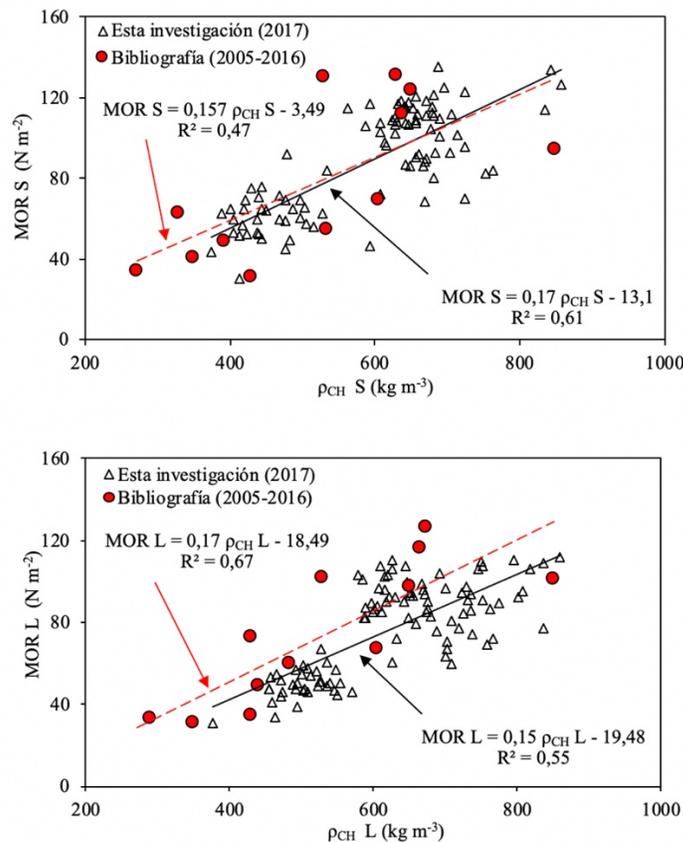


Figura 4. Dispersiones, regresiones y coeficientes de determinación (R^2) del módulo de ruptura (MOR) en función de la densidad (ρ_{CH}), de madera sólida (S) y laminada (L).
Fuente: Elaboración propia.

La correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad de la madera sólida reporta un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.64$) mayor a la correlación entre el módulo de elasticidad y la densidad correspondiente a la madera laminada ($R^2 = 0.42$). Estos resultados contrastan con los coeficientes de determinación de correlaciones correspondientes a los datos de la bibliografía (2005-20016), donde el coeficiente de determinación para la madera sólida ($R^2 = 0.40$) es menor al correspondiente a la correlación de la madera laminada ($R^2 = 0.47$). Por su parte, la correlación entre el módulo de ruptura y la densidad de la madera sólida reporta un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.61$) mayor al correspondiente a la madera laminada ($R^2 = 0.55$). Así mismo, las correlaciones para los datos de la bibliografía (2005-20016) presentan para la madera sólida un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.47$) menor que el correspondiente al de la madera laminada ($R^2 = 0.67$).

La literatura reporta valores para el coeficiente de determinación para el módulo de elasticidad de madera sólida en función de la densidad de *Pinus kesiya* de $R^2 = 0.79$ (Missanjo & Matsumura, 2016) y para el módulo de ruptura de $R^2 = 0.79$. Para el módulo de elasticidad de la madera laminada en función de su densidad, Bal & Bektaş (2012) reportan coeficientes de determinación de $R^2 = 0.26$ para *Populus x euramericana*, $R^2 = 0.39$ para *Fagus orientalis* y $R^2 = 0.68$ para *Eucalyptus grandis*. Y para el módulo de ruptura, Bal & Bektaş (2012) reportan valores del coeficiente de determinación entre la madera laminada y su densidad de $R^2 = 0.21$ para *Populus x euramericana* y *Eucalyptus grandis*, y de $R^2 = 0.72$ para *Fagus orientalis*.

Conclusiones

Se determinó la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura, en probetas de pequeñas dimensiones de madera sólida y laminada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriiformis*.

La madera laminada fabricada con madera aserrada de la misma especie incrementa su densidad. Pero, para el caso de los módulos de elasticidad y de ruptura, estos aumentan o disminuyen dependiendo de la especie en cuestión y/o si se trata de madera sólida o laminada.

Los resultados de las pruebas de flexión realizadas con madera sólida y laminada de *E. cyclocarpum*, *T. rosea* y *J. pyriiformis* sugieren que la magnitud del módulo de elasticidad y del módulo de ruptura son similares a los reportados en la literatura para probetas de pequeñas dimensiones y fabricadas con adhesivos de poliacetato de vinil. Esta conclusión se restringe al caso de estudio y de maderas estudiadas con el protocolo de esta investigación. Para una interpretación más generalizada, se sugiere realizar estudios específicos empleando probetas de dimensiones similares a las de piezas de madera en condiciones reales de utilización.

Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, y por el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad de la Prefectura de Akita, Japón.

Referencias

- American Society for Testing Materials (ASTM) International. (2014). *ASTM D143-14, Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. West Conshohocken, ASTM International. doi: <https://doi.org/10.1520/D0143-09>
- American Society of Testing Materials (ASTM) International. (2015). *ASTM D198-15, Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*. West Conshohocken, ASTM International. doi: <https://doi.org/10.1520/D0198-15>
- Araujo, M. O., Cerón, C. M., Chan, M. M., & Azueta, G. M. (2005). Resistencia a la flexión de vigas laminadas con tres especies de madera tropical mexicana. *Ingeniería*, 9(1), 5-12.
- Bal, B. C., & Bektaş, I. (2012). The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber. *Bioresources*, 7(3), 3104-3112. Recuperado el 1 de diciembre de 2017 de http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_07_3_3104_Bal_Bektas_Wood_Species_Load_Bending_Veneer_Lumber/1572
- Bourreau, D., Aimene, Y., Beauchêne, J., & Thibaut, B. (2013). Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(5), 653-662. doi: <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0721-4>
- Bowyer, J. L., Shmulsky, R., & Haygreen, J. G. (2007). *Forest Products and Wood Science. An Introduction*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Erdil, Y. Z., Kasal, A., Zhang, J. L., Efe, H., & Dizel, T. (2009). Comparison of mechanical properties of solid wood and laminated veneer lumber fabricated from Turkish beech, Scotch pine, and Lombardy poplar. *Forest Products Journal*, 59(6), 55-60.
- Gaff, M., & Gáborik, J. (2014). Effect of cyclic loading on the elasticity of beech solid and laminated wood. *Bioresources*, 9(3), 4288-4296.
- Gáborik, J., Gaff, M., Ruman, D., Zaborský, V., Kasickova, V., & Sikora, A. (2016). Adhesive as a Factor Affecting the Properties of Laminated Wood. *Bioresources*, 11(4), 10565-10574.

- Hayashi, T., & Miyatake, A. (2015). Recent research and development on sugi (Japanese cedar) structural glued laminated timber. *Journal of Wood Science*, 61(4), 337-342. doi: <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1475-x>
- International Organization for Standardization (ISO). (2014a). ISO 13061-2:2014. *Wood. Determination of density for physical and mechanical tests*. Geneva: International Organization for Standardization. Recuperado el 1 de diciembre de 2017 de http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=60064
- International Organization for Standardization (ISO). (2014b). ISO 13061-1:2014. *Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. Geneva: International Organization for Standardization. Recuperado el 1 de diciembre de 2017 de http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=60063
- Keskin, H. (2009). Impact of impregnation chemical on the bending strength of solid and laminated wood materials. *Materials and Design*, 30(3), 796-803. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.043>
- Kohl, D., Long, T. H. N., & Böhm, S. (2017). Wood-based multi-material systems for technical applications compatibility of wood from emerging and developing countries. *Procedia Manufacturing*, 8, 611-618. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.078>
- Kohl, D., Link, P., & Böhm, S. (2016). Wood as a Technical Material for Structural Vehicle Components. *Procedia CIRP*, 40, 557-561. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.133>
- Komariah, R. N., Hadi, Y. S., Massijaya, M. Y., & Suryana, J. (2015). Physical-Mechanical Properties of Glued Laminated Timber Made from Tropical Small-Diameter Logs Grown in Indonesia. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 43(2), 156-167. doi: <https://doi.org/10.5658/WOOD.2015.43.2.156>
- Missanjo, E., & Matsumura, J. (2016). Wood Density and Mechanical Properties of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Malawi. *Forest*, 7(7), 135-146. doi: <https://doi.org/10.3390/f7070135>
- Nadir, Y., & Nagarajan, P. (2014). The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber Wood. *Construction and Building Materials*, 55, 398-405. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.032>
- Niklas, K. J., & Spatz, H. C. (2010). Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*, 97(10), 1587-1594. doi: <https://doi.org/10.3732/ajb.1000150>
- Onoda, Y., Richards, A. E., & Westoby, M. (2010). The relationship between stem biomechanics and wood density is modified by rainfall in 32 Australian woody plant species. *The New Phytologist*, 185(2), 493-501. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03088.x>
- Silva, G. J. A., Fuentes, T. F. J., Rodríguez, A. R., Torres, A. P. A., Lomelí, R. M. A., Ramos, Q. J., Waitkus, C., & Richter, H. G. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. México: Comisión Nacional Forestal (Conafor).
- Sotomayor, C. J. R. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Recuperado el 1 diciembre de 2017 de https://www.researchgate.net/profile/Javier_Ramon_Sotomayor_Castellanos2/publication/276841418_Banco_FITECMA_de_caracteristicas_fisico-mecanicas_de_maderas_Mexicanas/links/555a2dc408aeaaff3bfabb2c/Banco-FITECMA-de-caracteristicas-fisico-mecanicas-de-maderas-Mexicanas.pdf
- Sotomayor, C. J. R., & Correa-Jurado, S. (2016). Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*, 24(1), 67-76. doi: <https://doi.org/10.14483/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9>
- Tamarit, U. J. C., & López, T. J. L. (2007). *Xilotecología de los principales árboles tropicales de México*. Tlahuapan: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Walker, J. C. F. (2006). *Primary Wood Processing*. Dordrecht: Springer.