

Módulo de elasticidad dinámico y factor de calidad de maderas mexicanas. Determinación por ondas de esfuerzo.

Javier Ramón Sotomayor Castellanos.*

Fecha de recepción: 7 de diciembre de 2017 – Fecha de aprobación: 16 de marzo de 2018

RESUMEN

Para valorizar maderas con baja apreciación comercial es necesario determinar experimentalmente sus propiedades mecánicas, de tal forma que el ingeniero y el diseñador con madera las aprecie como material de ingeniería confiable. El objetivo de esta investigación fue determinar el módulo de elasticidad dinámico y calcular el factor de calidad de diez maderas mexicanas. Se realizaron pruebas de ondas de esfuerzo en diez maderas diferentes. Se prepararon veinte probetas por especie y se calculó la densidad aparente, la velocidad de onda, el módulo de elasticidad dinámico y el factor de calidad. *Enterolobium cyclocarpum* presentó un valor mínimo de densidad aparente y el valor máximo correspondió a *Dalbergia granadillo*. Los valores de la velocidad de onda se situaron entre un mínimo para *Psidium sartorianum* y un máximo para *Cordia elaeagnoides*. *Enterolobium cyclocarpum* mostró el módulo de elasticidad dinámico menor y *Cordia elaeagnoides* el mayor. El factor de calidad más bajo correspondió a *Dalbergia granadillo* y el más alto a *Enterolobium cyclocarpum*. La densidad aparente de la madera resultó ser una buena herramienta para predecir el comportamiento del módulo de elasticidad dinámico y del factor de calidad.

Palabras clave: Densidad aparente de la madera, velocidad de onda, módulo de elasticidad dinámico, diseño con madera, estructuras de madera.

Dynamic modulus of elasticity and quality factor of Mexican woods. Assessment by stress waves.

ABSTRACT

To value woods with low commercial appreciation it is necessary to determine experimentally its mechanical properties, in such a way that the engineer and the designer with wood appreciate and can use them as reliable engineering material. The objective of the research was to determine the dynamic modulus of elasticity and to calculate the quality factor of ten Mexican woods. Stress waves were tested on ten different woods. Twenty specimens were prepared per species and the apparent density, wave speed, dynamic modulus of elasticity and quality factor were calculated. *Enterolobium cyclocarpum* presented a minimum value of apparent density and the maximum value corresponded to *Dalbergia granadillo*. The values of the wave velocity were between a minimum for *Psidium sartorianum* and a maximum for *Cordia elaeagnoides*. *Enterolobium cyclocarpum* showed the lowest dynamic modulus of elasticity and *Cordia elaeagnoides* the

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

*Autor de correspondencia. Correo electrónico: madera999@yahoo.com

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 22, No. 1, 2018, ISSN: 2448-8364.

largest. The lowest quality factor corresponded to *Dalbergia granadillo* and the highest to *Enterolobium cyclocarpum*. The apparent density of the wood proved to be a good tool to predict the behavior of the dynamic modulus of elasticity and the quality factor.

Keywords: Wood apparent density, wave speed, dynamic modulus of elasticity, design with wood, wooden structures.

INTRODUCCIÓN

El módulo de elasticidad dinámico de la madera es uno de los parámetros de ingeniería más importantes para el diseño y cálculo de productos y estructuras de madera. Entre otras aplicaciones se emplea para dimensionar elementos estructurales que satisfagan condiciones de calidad y de seguridad estructural, particularmente para sistemas que están sometidos a movimientos provocados por vibraciones mecánicas (Dietsch y Köhler, 2010).

Un índice material es la combinación de las propiedades físico-químicas de una sustancia, las cuales caracterizan su rendimiento para una aplicación o función específica. Por ejemplo, el factor de calidad derivado de pruebas dinámicas, definido como la razón entre la velocidad de onda y la densidad aparente, es útil en el cálculo estructural de componentes cuya función es de aislamiento acústico o disipación de energía, y en el diseño de estructuras expuestas a eventos excepcionales como son los sismos (Spycher et al., 2008).

La aplicación de métodos no destructivos en el estudio de la madera y productos derivados está documentada entre otros, por Niemz y Mannes (2012), Riggio et al. (2014) y Senalik et al. (2014). Los principales factores que influyen en la transmisión de ondas de esfuerzo en la madera son la variabilidad natural entre especies, la heterogeneidad y anisotropía propias del material y su contenido de

humedad y temperatura (Dackermann et al., 2014).

Las técnicas no destructivas de ondas de esfuerzo aprovechan la capacidad de la madera para almacenar energía, en este caso, de una onda mecánica, para medir la velocidad de propagación a la que viaja. Ponderando este parámetro con la densidad aparente de la madera, es posible determinar el módulo de elasticidad dinámico (Pellerin y Ross, 2002).

Las características físico-mecánicas de maderas mexicanas, sus propiedades anatómicas y de maquinado están reportadas por Tamarit y López (2007) y Silva et al. (2010). Particularmente, algunas de las especies en estudio son consideradas maderas con pocas perspectivas de empleo a nivel industrial (Cordero y Boshier, 2003). El Banco FITECMA de propiedades físico-mecánicas de maderas mexicanas (Sotomayor, 2015) reporta información de propiedades dinámicas de especies mexicanas. Sin embargo, durante la revisión de la bibliografía no se encontró información para las maderas en estudio sobre su módulo de elasticidad dinámico determinado por ondas de esfuerzo y el factor de calidad derivado.

Es escasa la información sobre la disponibilidad y potencial comercial, relacionada con sus propiedades tecnológicas de las especies en estudio. Sin embargo, la Comisión Nacional para el Conocimiento y

Uso de la Biodiversidad (https://www.gob.mx/conabio) y la comisión Nacional Forestal (http://www.conafor.gob.mx/portal/) de México, reportan información al respecto en sus bases de datos disponibles en la red. A manera de prospectiva para valorizar estas maderas es conveniente determinar experimentalmente sus propiedades mecánicas, de tal forma que el ingeniero y el diseñador con madera las aprecie y utilice como material de ingeniería confiable.

El objetivo de la investigación fue determinar el módulo de elasticidad dinámico y calcular el factor de calidad de diez maderas mexicanas. Para lograrlo, primero se determinó la densidad aparente de la madera, después se realizaron pruebas de ondas de esfuerzo y se calculó la velocidad de onda. Las especies estudiadas se presentan en la Tabla 1.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental consistió en madera de diez especies angiospermas recolectada en terrenos forestales de México. Las especies fueron identificadas en el Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La Tabla 1 presenta la lista de especies en estudio dispuestas en orden creciente de acuerdo a su densidad aparente. Para cada especie, se prepararon 20 probetas con dimensiones de 0,05 m x 0,05 m en su sección transversal y con longitudes de 0,5 m. Las probetas estuvieron orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. La madera se estabilizó durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C (± 1 °C) y una humedad relativa del aire de 60% ($\pm 2\%$), hasta que su peso fue constante.

El peso y el volumen de las probetas se sitúan entre los de las probetas normalizadas de pequeñas dimensiones y libres de defectos (ISO, 2012 y ASTM, 2014) y las de las piezas aserradas con dimensiones de empleo y con presencia de defectos (ASTM, 2010; ECS, 2012 y ECS, 2016). A diferencia de las probetas normalizadas de pequeñas dimensiones, algunas de las probetas estudiadas contenían pequeños nudos (máximo 0,003 m de diámetro), ligeras desviaciones de la fibra (máximo 1 en 20) y estaban un poco desalineadas respecto a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Estas características son propias de las especies en estudio. De tal forma, que se considera que las probetas fueron representativas de la madera que se emplea en la industria de la madera.

La densidad aparente de la madera, se calculó con la relación de la masa al momento del ensayo y el volumen en el momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (ISO, 2014b). El contenido de humedad de las probetas se determinó con un grupo de probetas complementarias con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,06 m y se calculó la relación de la masa al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (ISO, 2014a).

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de propagación de onda a través de la longitud de la probeta. Para las pruebas se empleó el aparato MicroSecond Timer (*Fakopp*®, 45 kHz), posicionado en un dispositivo para pruebas no destructivas (Figura 1). Con la longitud de las probetas y el tiempo de transmisión, se calculó la velocidad de onda, empleando la fórmula (1) (Del Menezzi et al., 2010):

$$v_{oe} = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Donde:

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

L = Longitud de la probeta (m)

t = tiempo de propagación (s)

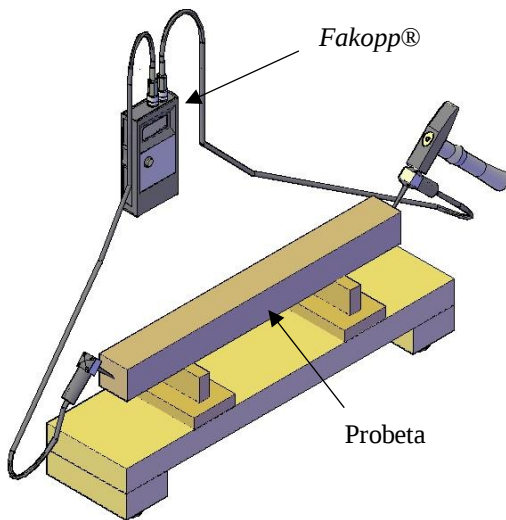


Figura 1. Aparato para las pruebas de ondas de esfuerzo.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para cada una de las diez especies se calcularon las variables de respuesta: densidad aparente de la madera y la velocidad de onda. El módulo de elasticidad dinámico y el factor de calidad se consideraron variable derivadas. Los estadísticos calculados fueron la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Para contrastar los resultados experimentales con datos de otras investigaciones, se recolectaron en la bibliografía datos comparables de las mismas variables de respuesta determinadas con ondas de esfuerzo de diez maderas extranjeras (Del Menezzi et al., 2010, Dackermann et al., 2014 y Da Silva et al., 2014). La información se presenta en la Tabla 3. De esta forma se

El módulo de elasticidad dinámico se calculó con la fórmula (2) (Dackermann et al., 2014):

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

Donde:

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

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

ρ_{CH} = Densidad aparente ($kg m^{-3}$)

El factor de calidad se calculó con la fórmula (3) (Spycher et al., 2008):

$$F_{oe} = \frac{v_{oe}}{\rho_{CH}} \quad (3)$$

Donde:

F_{oe} = Factor de calidad ($m^4 kg^{-1} s^{-1}$)

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

ρ_{CH} = Densidad aparente ($kg m^{-3}$)

prepararon dos muestras: las “maderas mexicanas” y las de las “referencias”.

Se diseñó un experimento siguiendo las recomendaciones de (Gutiérrez y De la Vara, 2012).

Se realizaron pruebas de sesgo y apuntalamiento. Una vez verificada su normalidad, se procedió a las pruebas de conformidad de varianza. Para cada una de las variables de respuesta, se realizaron análisis de varianza entre las muestras “maderas mexicanas” y “referencias”. La hipótesis nula $H_0: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$ se contrastó con la hipótesis alterna $H_A: \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0$. Los subíndices 1 y 2 representan el valor de las variables para cada

una de las muestras “maderas mexicanas” y “referencias”.

Adicionalmente se determinaron las regresiones lineales y sus coeficientes de determinación entre la velocidad de onda, el módulo de elasticidad dinámico y el factor de calidad en función de la densidad aparente.

RESULTADOS

La Tabla 1 presenta la densidad aparente, la velocidad de onda, el módulo de elasticidad dinámico y el factor de calidad de diez maderas mexicanas. Para todas las variables de estudio, las pruebas de normalidad y de conformidad de varianza (Tabla 2) verificaron la normalidad de las muestras, lo que permitió realizar los análisis de varianza. En el mismo contexto, el

valor P de todas las pruebas fue mayor que 0,05 ($\alpha = 0,05$) resultado que no permitió rechazar la hipótesis nula. De tal forma, que los valores de los parámetros determinados en las maderas mexicanas y los de las referencias son estadísticamente similares.

El contenido de humedad de la madera fue en promedio 11,5% con un coeficiente de variación de 1%. En el dominio higroscópico de la madera, esta reportada una variación de la velocidad de onda de 33 m s^{-1} por cada por ciento de variación en el contenido de humedad (Yang et al., 2015). Así, se consideró que el contenido de humedad fue uniforme en todas las muestras de madera y que no intervino de manera significativa en los resultados.

Tabla 1. Densidad aparente, velocidad de onda, modulo dinámico y factor de calidad de diez maderas mexicanas.

No.	Especie		ρ_{CH} (kg m^{-3})	V_{oe} (m s^{-1})	E_{oe} (MN m^{-2})	F_{oe} ($\text{m}^4 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)
1	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	$\bar{x}$	448	3401	5179	7,592
		σ	35	93	455	-
		CV	7,9	2,7	8,8	-
2	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	$\bar{x}$	598	3582	7681	5,990
		σ	22	134	617	-
		CV	3,6	3,7	8,0	-
3	<i>Fagus mexicana</i>	$\bar{x}$	642	3936	9974	6,131
		σ	48	134	1128	-
		CV	7,5	3,4	11,3	-
4	<i>Psidium sartorianum</i>	$\bar{x}$	789	3367	8943	4,267
		σ	28	115	614	-

		CV	3,6	3,4	6,9	-
5	<i>Caesalpinia platyloba</i>	$\bar{x}$	825	4137	14192	5,015
		σ	21	247	1984	-
		CV	2,6	6,0	14,0	-
6	<i>Albizia plurijuga</i>	$\bar{x}$	844	4005	13519	4,745
		σ	57	142	883	-
		CV	6,7	3,5	6,5	-
7	<i>Cordia elaeagnoides</i>	$\bar{x}$	992	4186	17374	4,220
		σ	81	212	1778	-
		CV	8,2	5,1	10,2	-
8	<i>Acosmium panamense</i>	$\bar{x}$	1005	4014	16223	3,994
		σ	62	199	1711	-
		CV	6,2	5,0	10,5	-
9	<i>Tabebuia chrysantha</i>	$\bar{x}$	1096	3930	16958	3,586
		σ	24	183	1675	-
		CV	2,2	4,7	9,9	-
10	<i>Dalbergia granadillo</i>	$\bar{x}$	1147	3899	17532	3,399
		σ	59	231	2562	-
		CV	5,1	5,9	14,6	-

ρ_{CH} = Densidad aparente; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo de elasticidad dinámico; F_{oe} = Factor de calidad; $\bar{x}$ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento.

DISCUSIÓN

La magnitud de los valores promedio de las densidades aparentes se sitúa en los intervalos para las especies mexicanas reportadas en la bibliografía. *E. cyclocarpum* presentó un valor mínimo de 448 kg m⁻³ y el valor máximo correspondió a *D. granadillo* con 1147 kg m⁻³. Igualmente, los coeficientes de variación están dentro del rango para especies mexicanas. (Tamarit y López, 2007, Silva et al., 2010 y

Sotomayor, 2015). Comparativamente, sus magnitudes son similares a las de las referencias presentadas en la Tabla 3 (Del Menezzi et al., 2010, Dackermann et al., 2014 y Da Silva et al., 2014).

La velocidad de onda fue medida en la dirección longitudinal de la madera y sus valores se sitúan entre un mínimo de 3367 m s⁻¹ (*Psidium sartorianum*) y un máximo de 4186

m s^{-1} (*Cordia elaeagnoides*). Este intervalo se sitúa al interior del reportado en la bibliografía para la velocidad de onda en maderas extranjeras (Del Menezzi et al., 2010, Dackermann et al. 2014 y Da Silva et al., 2014)

que va de 3319 m s^{-1} (*Nectandra cuspidata*) a 4935 m s^{-1} (*Caesalpinia brasiliensis*). La similitud en sus dispersiones, reflejadas en débiles coeficientes de determinación (R^2), se puede observar en la Figura 2.

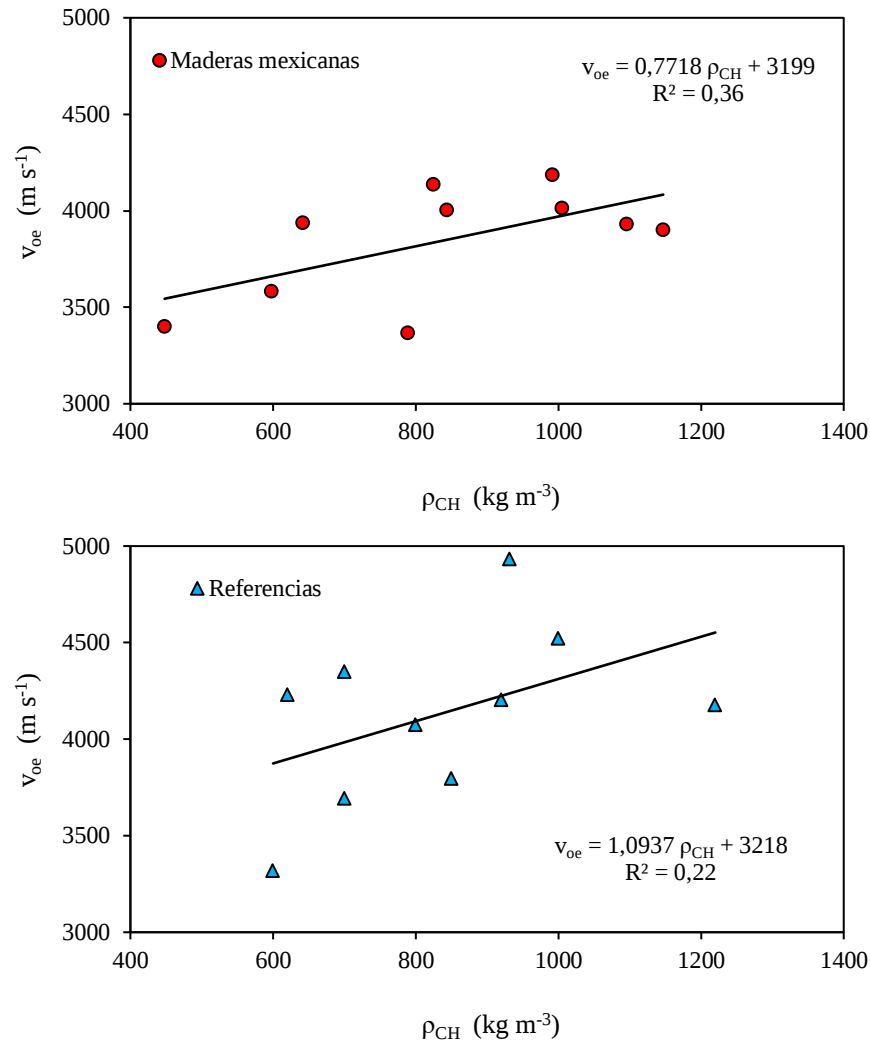


Figura 2. Velocidad de onda en función de la densidad aparente de diez maderas mexicanas y datos de Del Menezzi et al. (2010), Dackermann et al. (2014) y Da Silva et al. (2014).

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico.

	Maderas mexicanas	Referencias	Valor P ($\alpha = 0,05$)
ρ_{CH}			
Sesgo	-0,4076	0,9135	-

Apuntalamiento	-0,5316	0,1929	-
Conformidad de varianza	-	-	0,6043
Análisis de varianza	-	-	0,9632
V _{oe}			
Sesgo	-1,016	-0,1194	-
Apuntalamiento	-0,5111	0,3542	-
Conformidad de varianza	-	-	0,3721
Análisis de varianza	-	-	0,1113
E _{oe}			
Sesgo	-0,6252	0,3582	-
Apuntalamiento	-0,8461	-0,6745	-
Conformidad de varianza	-	-	0,7685
Análisis de varianza	-	-	0,4061
F _{oe}			
Sesgo	1,2503	0,1499	-
Apuntalamiento	0,2607	0,2841	-
Conformidad de varianza	-	-	0,3998
Análisis de varianza	-	-	0,6637
ρ _{CH} = Densidad aparente; v _{oe} = Velocidad de onda; E _{oe} = Módulo de elasticidad dinámico; F _{oe} = Factor de calidad.			

Tabla 3. Densidad aparente, velocidad de onda, modulo dinámico y factor de calidad reportados por 1: Del Menezzi et al. (2010), 2: Dackermann et al. (2014) and 3: Da Silva et al. (2014).

Espece	Referencia	ρ _{CH} (kg m ⁻³)	v _{oe} (m s ⁻¹)	E _{oe} (MN m ⁻²)	F _{oe} (m ⁴ kg ⁻¹ s ⁻¹)
<i>Nectandra cuspidata</i>	3	600	3319	6609	5,532
<i>Cordia goeldiana</i>	1	620	4231	11084	6,824
<i>Ocotea guianensis</i>	3	700	3693	9547	5,276
<i>Acer pseudoplatanu</i>	2	700	4350	13246	6,210
<i>Mezilaurus itauba</i>	3	800	4075	13285	5,094

<i>Balfourodendron riedelianum</i>	1	850	3797	12187	4,467
<i>Dipteryx odorata</i>	1	920	4203	15963	4,568
<i>Caesalpinia brasiliensis</i>	2	932	4935	22698	5,300
<i>Tabebuia</i> sp	1	1000	4524	20413	4,524
<i>Bowdichia virgilioides</i>	1	1220	4177	21350	3,424

ρ_{CH} = Densidad aparente; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo de elasticidad dinámico; F_{oe} = Factor de calidad.

Los coeficientes de determinación de las correlaciones entre las variables y la densidad aparente de la madera fueron elevados para el módulo de elasticidad dinámico y el factor de calidad (Tabla 4). De aquí que la densidad aparente resultó ser un buen predictor de estos parámetros. Este resultado confirma la propuesta de Bodig y Jayne (1982) y Niklas y Spatz (2010), en el sentido de que las

características mecánicas de la madera pueden ser pronosticadas, con cierta certeza, a partir de su densidad aparente. En cambio, el coeficiente de determinación para la velocidad de onda en función de la densidad aparente fue muy bajo, resultado similar a los reportados por Baar et al. (2012) ($R^2 = 0,48$), de Oliveira y Sales (2006) ($R^2 = 0,31$) y Chauhan y Walker (2006) ($R^2 = 0,14$).

Tabla 4. Regresiones lineales para maderas mexicanas y referencias.

$y = ax \pm b$	a	b	R^2	$y = ax \pm b$	a	b	R^2
Maderas mexicanas				Referencias			
$v_{oe} = f(\rho_{CH})$	0,7718	3199	0,36	$v_{oe} = f(\rho_{CH})$	1,0937	3218	0,22
$E_{oe} = f(\rho_{CH})$	18,824	-3028	0,90	$E_{oe} = f(\rho_{CH})$	24,042	-5418	0,74
$F_{oe} = f(\rho_{CH})$	-0,0056	9,558	0,92	$F_{oe} = f(\rho_{CH})$	-0,0043	8,699	0,74

ρ_{CH} = Densidad aparente; v_{oe} = Velocidad de onda; E_{oe} = Módulo de elasticidad dinámico; F_{oe} = Factor de calidad; R^2 = Coeficiente de determinación.

Las magnitudes del módulo de elasticidad dinámico se situaron en un amplio rango. *E. cyclocarpum* mostró el módulo de elasticidad dinámico menor (5179 MN m⁻²) y *C. elaeagnoides* el mayor (17374 MN m⁻²), descubriendo una extensa variabilidad entre especies. Lo que resulta en una amplia perspectiva para la selección de una especie

para un uso específico. Aunado a esto, la variabilidad al interior de cada especie representada por el coeficiente de variación, fluctuó desde 6,5% (*A. plurijuga*) hasta 14,6% (*D. granadillo*). Esta variación es similar a la reportada para el módulo de elasticidad dinámico por Baar et al. (2012) para maderas tropicales.

El módulo de elasticidad dinámico mostró un comportamiento lineal con respecto a la densidad aparente de la madera. Este resultado se muestra por la regresión lineal y el alto coeficiente de determinación entre estas variables (Tabla 4 y Figura 3). Esta regresión es similar a la calculada con los datos de las referencias y mostrada en la Tabla 4. Asimismo, elevados valores de coeficientes de determinación han sido reportados por Del Menezzi et al. (2010) ($R^2 = 0,88$).

Estos argumentos confirman el paradigma vigente en ciencias de la madera que plantea que las características de resistencia mecánica de la madera son función de su densidad aparente. Esta dependencia es implícita puesto que el módulo de elasticidad dinámico es calculado empleando la fórmula (3), a partir de la densidad aparente de la madera (fórmula 1) y la velocidad de onda (fórmula 2). No obstante, esta relación es la herramienta usada en la literatura para la previsión del módulo de elasticidad dinámico a partir de una característica física cuya determinación es relativamente fácil de realizar, como lo es la densidad aparente de la madera (Niklas y Spatz, 2010).

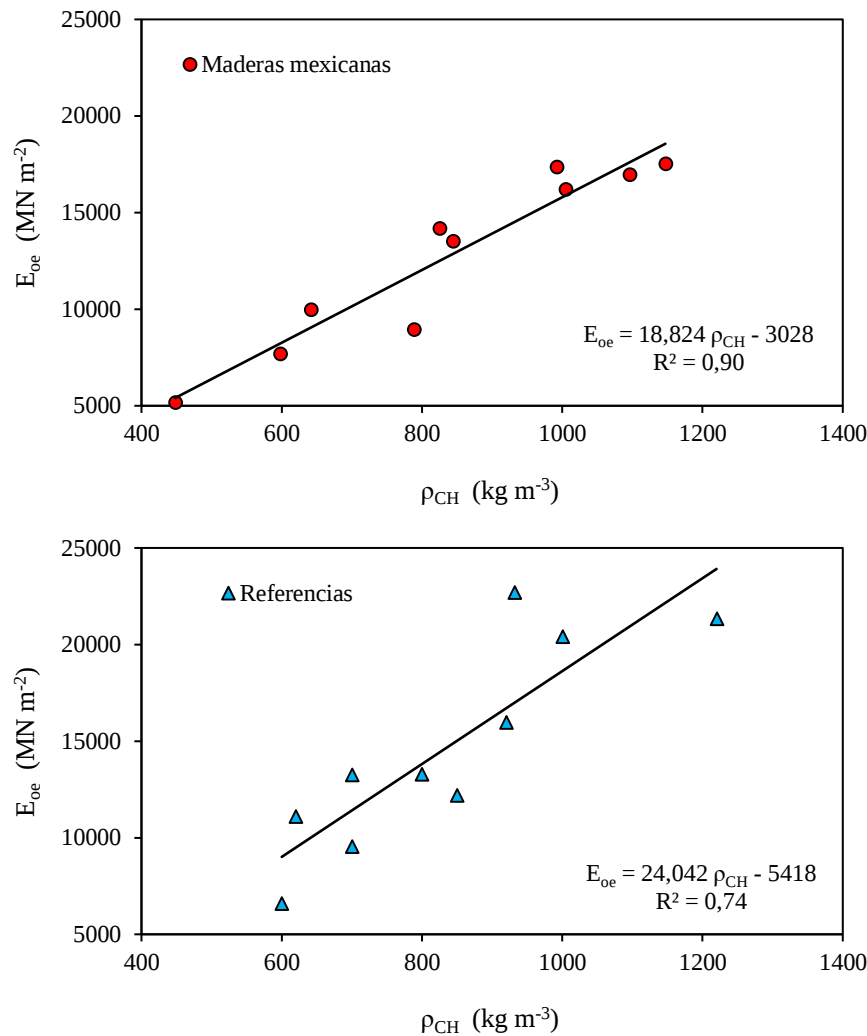


Figura 3. Módulo dinámico (E_{oe}) en función de la densidad aparente (ρ_{CH}) de diez maderas mexicanas y datos de Del Menezzi et al. (2010), Dackermann et al. (2014) y Da Silva et al. (2014).

El factor de calidad es un indicador de la capacidad de transmisión de energía en relación a la densidad aparente del material. Asimismo, es el parámetro más significativo para la determinación de la calidad de la madera para su empleo en productos o en aplicaciones donde el comportamiento acústico es relevante. Un valor alto del factor de calidad de una madera indica una buena calidad acústica comparativa (Spycher et al., 2008).

Los valores del factor de calidad de las diez maderas investigadas son conformes y pertinentes con los de las referencias presentadas en la Tabla 3, los cuales fluctúan entre $3,424 \text{ m}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, para madera de *B. virgilioides* y $6,824 \text{ m}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, para madera de *Cordia goeldiana* (Del Menezzi et al. (2010). La madera de *D. granadillo* mostró comparativamente el valor más bajo ($3,399 \text{ m}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) y la especie *E. cyclocarpum* el más alto factor de calidad ($7,592 \text{ m}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$). Estos resultados mostrados en la Tabla 1, permiten posicionar la resistencia elástica de cada especie respecto a su densidad aparente. Este indicador es importante como criterio de selección de un material en diseño y cálculo de productos de valor agregado (Ashby, 2011).

Es interesante notar que no obstante la desigualdad estructural de la madera entre las diez especies estudiadas, los indicadores de calidad corrigen estas diferencias. De aquí la utilidad de estos parámetros. Estos pueden relativizar las características propias a cada especie y servir como referencia para fines de cálculo y diseño de productos elaborados con madera.

En el mismo contexto, al comparar las tendencias mostradas en la Figura 3 y en la Figura 4, donde se muestran el módulo de elasticidad dinámico y el factor de calidad, ambos parámetros en función de la densidad aparente de la madera, la tendencia es opuesta. En efecto, mientras que el módulo de elasticidad dinámico tiende a incrementarse a medida que la densidad aparente aumenta, el factor de calidad disminuye. En la determinación de estos dos indicadores de calidad, la densidad aparente está implícita en las fórmulas (2) y (3). De aquí que la densidad aparente de la madera puede ser utilizada para predecir el comportamiento y también para ponderar la calificación de una especie tomando en cuenta solamente su resistencia elástica.

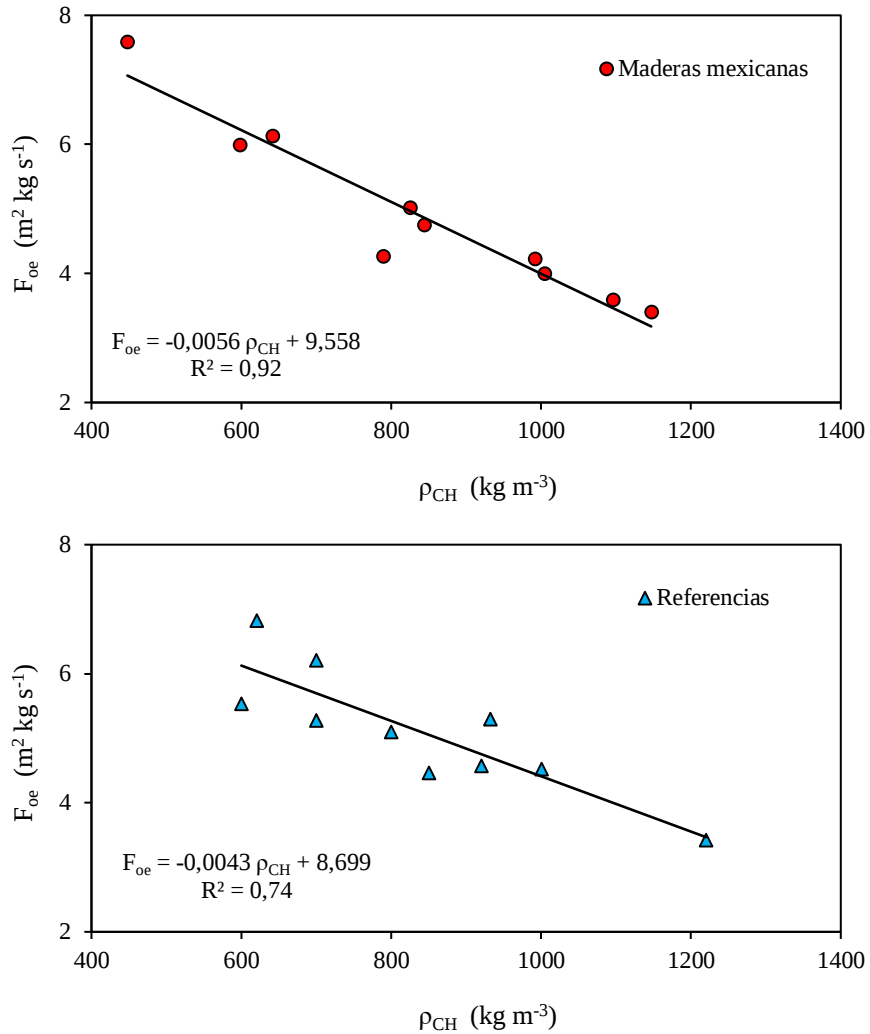


Figura 4. Factor de calidad (F_{oe}) en función de la densidad aparente (ρ_{CH}) de diez maderas mexicanas y datos de Del Menezzi et al. (2010), Dackermann et al. (2014) y Da Silva et al. (2014).

CONCLUSIONES

Los valores de la densidad aparente, la velocidad de onda, del módulo de elasticidad dinámico y del factor de calidad son de magnitud similar a los reportados en la bibliografía. Su variación al interior de cada especie es aceptable comparativamente a los resultados con otras especies de madera.

La velocidad de onda no correlaciona bien con la densidad aparente de la madera. En cambio, se confirma que la densidad aparente de la madera es un buen predictor del módulo de elasticidad dinámico y del factor de calidad.

REFERENCIAS

American Society for Testing Materials (ASTM). (2010). *ASTM D2915-10. Practice for Sampling and Data-Analysis for Structural Wood and Wood-Based Products*. West Conshohocken: American Society for Testing Materials. doi: 10.1520/D2915-10

American Society for Testing Materials (ASTM). (2014). *ASTM D143-14. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. West Conshohocken: American Society for Testing Materials. doi: 10.1520/D0143

Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design*. Burlington: Elsevier.

Baar, J., Tippner, J., & Gryc, V. (2012). The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5), 767-769. doi: 10.1007/s00107-011-0550-2

Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.

Chauhan, S. S., & 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. doi: 10.1016/j.foreco.2006.04.019

Cordero, J., & Boshier, D. H. (2003). *Árboles de Centroamérica*. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Dackermann, U., Crews, K., Kasal, B., Li, J., Riggio, M., Rinn, F., & Tannert, T. (2014). In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures*, 47(5), 787-803. doi: 10.1617/s11527-013-0095-4

Da Silva, F., Higuchi, N., Nascimento, C. C., Matos, L. M., De Paula, E., V. C. M., & Dos Santos, J. (2014). Nondestructive evaluation of hardness in tropical wood. *Journal of Tropical Forest Science*, 26(1), 69-74.

Recuperado de <https://search-proquest-com.etechnicryt.idm.oclc.org/docview/1549963480?pq-origsite=summon&https://search.proquest.com/technologycollection>

de Oliveira, F. G., & Sales, A. (2006). Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 97(18), 2443-2446. doi: 10.1016/j.biortech.2005.04.050

Del Menezzi, C. E. S., Silveira, R. R., & De Souza, M. R. (2010). Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras Amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. *Acta Amazonica*, 40(2), 325- 332. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/aa/v40n2/v40n2a11.pdf>

Dietsch, P., & Köhler, J. (2010). *Assessment of Timber Structures. Modelling of the Performance of Timber Structures*. Maastricht: Shaker Verlag.

European Committee for Standardization (ECS). (2012). *EN 408:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*. Brussels: European Committee for Standardization.

European Committee for Standardization (ECS). (2016). *EN 338:2016. Structural timber. Strength classes*. Brussels: European Committee for Standardization.

Gutiérrez P., H., & De la Vara S., R. (2011). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.

International Organization for Standardization (ISO). (2012). *ISO 3129:2012. Wood. Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens*. Geneva: International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization (ISO.) (2014a). *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: International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization (ISO). (2014b). *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: International Organization for Standardization.

Niemz, P., & Mannes, D. (2012). Non-destructive testing of wood and wood-based materials. *Journal of Cultural Heritage*, 13(3), S26-S34. doi: 10.1016/j.culher.2012.04.001

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: 10.3732/ajb.1000150

Pellerin, R. F., & Ross, R. J. (2002). *Nondestructive Evaluation of Wood*. Peachtree Corners: Forest Products Society.

Riggio, M., Anthony, R. W., Augelli, F., Kasal, B., Lechner, T., Muller, W., et al. (2014). In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. *Materials and Structures*, 47(5), 749-766. doi: 10.1617/s11527-013-0093-6

Senalik, C. A., Schueneman, G., & Ross, R. J. (2014). *Ultrasonic-based nondestructive evaluation methods for wood: a primer and historical review*. Madison: Forest Products Laboratory.

Silva G., J. A., Fuentes T., F. J., Rodríguez A., R., Torres A., P. A., Lomelí R., M. A., Ramos Q., J., et al. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. México: Comisión Nacional Forestal.

Sotomayor C., J. R. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Spycher, M., & Schwarze, F. W. M. R., & Steiger, R. (2008). Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*, 42, 325-342. doi: 10.1007/s00226-007-0170-5

Tamarit U., J.C., & López T., J. L. (2007). *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*. San Martinito: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agropecuarias y Pecuarias.

Yang, H., Yu, L., & Wang, L. (2015). Effect of moisture content on the ultrasonic acoustic properties of wood. *Journal of Forestry Research*, 26(3), 753-757. doi: 10.1007/s11676-015-0079-z