

Disminución de la densidad aparente y del módulo dinámico longitudinal de cinco maderas angiospermas después de su exposición al fuego

Javier Ramón Sotomayor Castellanos¹ 

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

¹madera999@yahoo.com

DOI: 10.33412/jpri.v13.1.3028



Resumen: Se presenta la metodología y los resultados de pruebas de reacción al fuego de madera.

El objetivo de la investigación fue verificar si existe una disminución en la densidad y en el módulo dinámico de cinco maderas angiospermas al ser expuestas al fuego.

Se efectuaron pruebas de reacción al fuego de madera proveniente de las especies *Tabebuia rosea*, *Andira inermis*, *Juglans pyriformis*, *Quercus spp.* y *Cordia elaeagnoides*. Se realizaron pruebas no destructivas de vibraciones longitudinales, antes y después de exponer al fuego probetas de pequeñas dimensiones. Se determinaron la densidad aparente y el módulo dinámico para antes y después del tratamiento.

Después de su exposición al fuego las densidades de las maderas disminuyeron en las siguientes magnitudes: *T. rosea* 5,2%, *A. inermis* 3,7%, *J. pyriformis* 3,5%, *Quercus spp.* 2,7% y *C. elaeagnoides* 2%. Igualmente, los módulos dinámicos se redujeron de la siguiente manera: *T. rosea* 18,9%, *A. inermis* 8,2%, *J. pyriformis* 9,7%, *Quercus spp.* 9,9% y *C. elaeagnoides* 3,8%.

Los modelos lineales establecidos para las variables densidad y modulo dinámico indican que es posible predecir los valores esperados para cada una después del tratamiento de fuego por medio de una regresión lineal simple con un alto coeficiente de determinación.

Palabras clave: vibraciones longitudinales, reacción al fuego, pruebas no destructivas.

Title: Decrease in apparent density and longitudinal dynamic modulus of five angiosperm woods after exposure to fire.

Abstract: The methodology and results of wood fire reaction tests are presented.

The objective of the investigation is to verify if there is a decrease in density and in the dynamic module of five angiosperm woods when exposed to fire.

Wood fire resistance tests from the species *Tabebuia rosea*, *Andira inermis*, *Juglans pyriformis*, *Quercus spp.* and *Cordia elaeagnoides*. Non-destructive tests of longitudinal vibrations were performed, before and after exposing small specimens to fire. Bulk density and dynamic modulus were determined before and after treatment.

After exposure to fire, wood densities decreased in the following quantities: *T. rosea* 5,2%, *A. inermis* 3,7%, *J. pyriformis* 3,5%, *Quercus spp.* 2,7% and *C. elaeagnoides* 2%. Similarly, the dynamic modules were reduced as follows: *T. rosea* 18,9%, *A. inermis* 8,2%, *J. pyriformis* 9,7%, *Quercus spp.* 9,9% and *C. elaeagnoides* 3,8%.

The linear models established for the density and dynamic modulus variables indicate that it is possible to predict the expected values for each one after the fire treatment by means of a simple linear regression with a high coefficient of determination.

Key words: longitudinal vibrations, reaction to fire, non-destructive tests.

Tipo de artículo: investigación.

Fecha de recepción: 19 de junio de 2021.

Fecha de aceptación: 31 de enero de 2022.

1. Introducción

La magnitud del módulo dinámico de la madera reportado en la literatura es muy diversa [1] [2]. La literatura presenta tres causas de variabilidad, entre otras más. La primera causa es la biodiversidad entre especies forestales, lo que ocasiona que el módulo dinámico esté referido siempre a una especie en particular [3].

La segunda es ocasionada por las propiedades intrínsecas de la madera, como son la heterogeneidad anatómica y química [4], la anisotropía del material [5] y la higroscopicidad del tejido leñoso [6]. Estas tres propiedades intrínsecas a todas las especies ocasionan que el módulo de elasticidad sea referido a la especie, a una densidad aparente, y además que sea determinado en una dirección de medición y a un contenido de humedad de referencia.

La tercera causa de variación del módulo dinámico se debe a las diferentes configuraciones de las pruebas con que se miden los parámetros necesarios para calcular el módulo de elasticidad [7]. De esa manera, se indica que es un módulo estático o módulo dinámico, y se especifica el tipo de sollicitación utilizada para su determinación, por ejemplo: ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones [8] [9].

La literatura indica evidencia empírica acerca de la disminución del módulo de elasticidad de la madera cuando es expuesta al fuego [10] [11]. Esta proposición deriva de la combustión del material de una pieza de madera, y se refleja en la disminución de su geometría acompañada de una pérdida de masa en la materia leñosa. Este fenómeno se estudia principalmente con dos tipos de pruebas. El primer tipo de pruebas es la exposición al fuego de piezas de madera con

dimensiones reales de empleo, como lo son vigas y columnas [12] [13]. El segundo tipo se refiere al estudio de la reacción al fuego de probetas de pequeñas dimensiones [14] [15].

Dado que las pruebas de determinación del módulo de elasticidad son de carácter destructivo, se han desarrollado métodos de medición no destructivos que pueden caracterizar a una pieza o probeta de madera sin modificar sustancialmente sus propiedades físicas. De esta manera se pueden medir, por ejemplo, la velocidad de transmisión de una onda [16] o la frecuencia natural de vibración [17]. De esta forma, se pueden evaluar dichos parámetros antes y después de que la madera sea sometida al fuego [18].

La información respecto a la disminución del módulo de elasticidad de la madera se refiere a datos derivados de pruebas en condiciones de carga estática. Posiblemente el fenómeno es similar si se llevan a cabo pruebas dinámicas, como son las realizadas por medio de vibraciones.

Esta investigación propone, a manera de hipótesis, que la exposición de la madera al fuego reduce su módulo dinámico. Dicho supuesto se limita a probetas de pequeñas dimensiones expuestas al fuego en las condiciones de laboratorio especificadas para esta investigación. La hipótesis es verificable midiendo, antes y después del tratamiento, la densidad aparente de la madera y el módulo dinámico en la dirección longitudinal de las probetas.

El objetivo de la investigación fue verificar la variación en la densidad aparente, y el módulo dinámico de cinco maderas angiospermas luego de exponerlas al fuego.

2. Materiales y métodos

La unidad experimental consistió en cinco muestras independientes de 35 probetas, provenientes cada una de madera de las especies *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC., *Andira inermis* (W. Wright) DC., *Juglans pyriformis* Liebm., *Quercus* spp. y *Cordia elaeagnoides* (Ruiz & Pav.). El tratamiento considerado fue el de la exposición al fuego. El factor de variación fue la especie, con dos niveles: antes del tratamiento (AT) y después del tratamiento (DT). Las maderas estudiadas son endémicas de México y Centroamérica [19]. La literatura con información acerca de sus propiedades tecnológicas está reportada en [2] [20] [21] [22].

2.1. Diseño experimental

Las variables de respuesta fueron: la densidad aparente (ρ_{CH}) y el módulo dinámico (E_L). El contenido de humedad en la madera se consideró parámetro de referencia invariable, y no intervino en el experimento. Para cada variable de los dos grupos de muestras se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación porcentual ($CV = \sigma/\mu$).

Para las variables de respuesta, así como para los coeficientes de variación, se tomó como parámetro derivado el cálculo de las diferencias porcentuales (Δ) entre las medias de los resultados. Dicho cálculo se realizó antes y después del tratamiento.

Se determinó la normalidad en la distribución de las muestras con el criterio de demarcación para el sesgo estandarizado (SE) y para el apuntamiento estandarizado (AE): $[-2 < SE \text{ y/o } AE < +2]$; se verificó la igualdad de varianzas con la hipótesis: $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ con un nivel de significancia de 5% ($\alpha = 0,05$).

A continuación, se practicaron análisis de varianza con la hipótesis nula: $H_0: \mu_{AT} = \mu_{DT}$ con un nivel de significancia de 5% ($\alpha = 0,05$). Los subíndices AT y DT se refieren a los dos niveles del factor de variación. El criterio de demarcación fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para valores $P < 0,05$.

Utilizando el conjunto de los 175 datos correspondientes a las cinco especies, se calcularon las regresiones lineales ($y = ax + b$) y sus coeficientes de determinación (R^2) entre los resultados para antes del tratamiento (AT) y después del tratamiento (DT) de ρ_{CH} y E_L .

2.2. Materiales

Los materiales fueron recolectados en el Estado de Michoacán, México. Piezas de madera aserrada de: *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides*. Los taxones botánicos de las especies se determinaron en el Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. El material experimental fue el mismo utilizado por [18].

Para cada especie se prepararon 35 probetas normalizadas de acuerdo con la norma ISO 3129:2012 [23] con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,40 m en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera.

Las probetas se secaron en una cámara de acondicionamiento a 20 °C ($\pm 1^\circ$ C) y una humedad relativa del aire de 65% ($\pm 2\%$), hasta que la madera alcanzó un contenido de humedad de 11,4%; este procedimiento se realizó antes y después del tratamiento. Por lo tanto, se consideró que la variación en el contenido de humedad de la madera no intervino de manera significativa en los resultados. Estos datos son similares a los reportados por [18], debido a que se trata del mismo material experimental.

2.3. Métodos

Se adecuó un ensayo de reacción al fuego [18] y se realizaron pruebas no destructivas de vibraciones longitudinales, antes y después de exponer al fuego probetas de madera de las especies *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides*.

El contenido de humedad en la madera se determinó con la ecuación (1) [24]:

$$CH = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

P_1 = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)

P_2 = Peso de la probeta en estado anhidro ($CH \approx 0\%$) (kg)

La densidad aparente de la madera para un contenido de humedad CH se determinó con la ecuación (2) [25]:

$$\rho_{CH} = \frac{P_1}{V_1} \quad (2)$$

Donde:

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

P_1 = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg)

V_1 = Volumen de la probeta al momento del ensayo (m^3)

2.4. Pruebas de reacción al fuego

Se preparó un dispositivo de ensayo que consistió en un mechero de gas y dos soportes para las probetas (Figura 1). Entre los soportes se posicionó la probeta de forma que la llama del mechero impactara en la dirección transversal de esta.

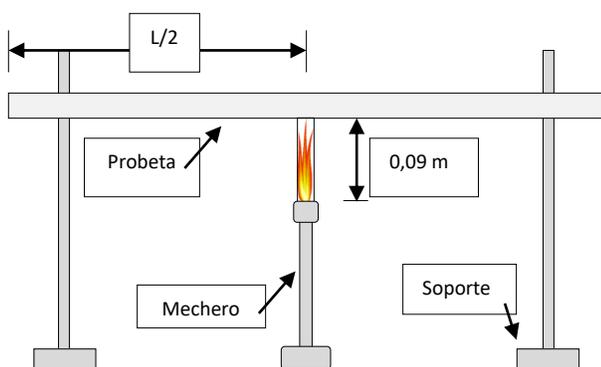


Figura 1. Pruebas de reacción al fuego. L = Dirección longitudinal y largo de la probeta.

Las pruebas de reacción al fuego siguieron el mismo procedimiento reportado por [18] y consistieron en las siguientes etapas:

1. Se midieron el peso y las dimensiones de la probeta.
2. La probeta se posicionó en el dispositivo para las pruebas de reacción al fuego, de forma que la llama del mechero impactara en la dirección transversal de esta.
3. La probeta se expuso durante dos minutos al flujo incidente de calor producido por la flama de 0.09 m de altura, obtenida por medio de un mechero de laboratorio tipo *Meker-Fisher* con regulación de aire y de gas, con quemador de 0,03 m de diámetro y temperatura máxima de 1300 °C.
4. Transcurrido el tiempo de exposición de dos minutos, la probeta se retiró de la flama y se frenó su combustión en una cama de arena.
5. La masa de madera carbonizada de la probeta se retiró y se midió el peso de la misma después de su exposición al fuego.

2.5. Pruebas de vibraciones longitudinales

Las pruebas de vibraciones longitudinales consistieron en proporcionar un impacto en un extremo de la probeta y medir su frecuencia natural de vibración con la ayuda de un micrófono posicionado cerca del extremo opuesto (Figura 2). El micrófono estaba conectado al aparato *Grindosonic*®, donde se midió la

frecuencia natural de la probeta de madera apoyada en el nodo del primer modo de vibración.

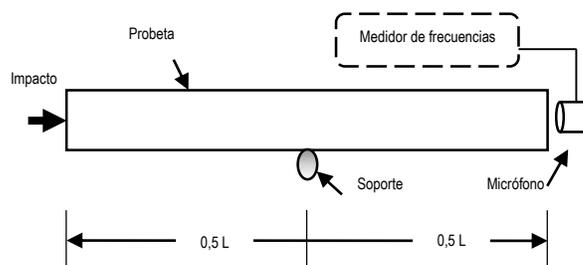


Figura 2. Pruebas de vibraciones longitudinales. L = Dirección longitudinal y largo de la probeta.

El módulo dinámico se calculó con la ecuación (3) [26]:

$$E_L = 4 L^2 \rho_{CH} f_L^2 \quad (3)$$

Donde:

E_L = Módulo dinámico en vibraciones longitudinales (N m^{-2})

L = Longitud de la probeta (m)

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

f_L = Frecuencia natural de vibración (Hz)

2.6. Cálculo de diferencias porcentuales

Las diferencias porcentuales entre los resultados, antes y después del tratamiento, se calcularon con la ecuación (4). La ecuación (4) también se utilizó para calcular las diferencias porcentuales de los coeficientes de variación:

$$\Delta = \left(\frac{\mu_{AT} - \mu_{DT}}{\mu_{AT}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Donde:

Δ = Diferencia porcentual (%)

μ_{AT} = Media antes del tratamiento de exposición al fuego

μ_{DT} = Media después del tratamiento de exposición al fuego

3. Resultados

La Tabla 1 muestra la densidad aparente y el módulo dinámico para antes y después del tratamiento de las especies *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides*; así como las diferencias porcentuales. La Tabla 2 relaciona los resultados del análisis estadístico. En función de los datos para antes del tratamiento, la Tabla 3 exhibe las correlaciones lineales y sus coeficientes de determinación entre resultados para después del tratamiento.

Las pruebas de Anova y de *Kruskal-Wallis* indican que respecto a las variables ρ_{CH} y E_L existen diferencias estadísticamente significativas, para antes y después de la exposición al fuego en algunas especies. Sin embargo, los resultados de ρ_{CH} para *J. pyriformis*, así como ρ_{CH} y E_L para *C.*

elaeagnoides, indican que no existen diferencias estadísticamente significativas

Tabla 1. Densidad aparente y módulo dinámico para antes y después del tratamiento

	Antes del tratamiento		Después del tratamiento		Diferencias	
	ρ_{CH}	E_L	ρ_{CH}	E_L	$\Delta\rho_{CH}$	ΔE_L
	(kg m ⁻³)	(MN m ⁻²)	(kg m ⁻³)	(MN m ⁻²)	(%)	(%)
<i>1. Tabebuia rosea</i>						
μ	613	12873	581	10445	-5,2*	-18,9*
σ	59	1424	59	1151	-	-
CV	9,6	11,1	10,2	11,0	+6,3	-0,9
<i>2. Andira inermis</i>						
μ	737	11083	710	10177	-3,7*	-8,2*
σ	37	1875	42	1342	-	-
CV	5,0	16,9	6,0	13,2	+20,0	-21,9
<i>3. Juglans pyriformis</i>						
μ	773	13867	746	12525	-3,5	-9,7*
σ	60	2472	61	2342	-	-
CV	7,7	17,8	8,1	18,7	+5,2	+5,1
<i>4. Quercus spp.</i>						
μ	866	21551	843	19421	-2,7*	-9,9*
σ	54	2998	55	3166	-	-
CV	6,3	13,9	6,5	16,3	+3,2	+17,3
<i>5. Cordia elaeagnoides</i>						
μ	996	19032	976	18304	-2,0	-3,8
σ	97	2730	97	2865	-	-
CV	9,7	14,3	10,0	15,7	+3,1	+9,8
ρ_{CH} = Densidad aparente; E_L = Módulo dinámico; Δ = Diferencia porcentual; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación porcentual; *Existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza de 95%.						

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico

	Pruebas de normalidad				Pruebas de hipótesis		
	AT		DT		Ver-Var	Anova	K-W
	SE	AS	SE	AS	P _(α=0,05)	P _(α=0,05)	P _(α=0,05)
<i>Tabebuia rosea</i>							
ρ _{CH}	-0,6286	-0,2682	-0,7101	-0,4667	0,9725 ^{ns}	0,0269*	-
E _L	0,1764	3,1873	0,1751	2,2841	0,3857 ^{ns}	-	< 0,001*
<i>Andira inermis</i>							
ρ _{CH}	-0,0998	-1,0218	-0,0439	-0,0598	0,5475 ^{ns}	0,0061*	-
E _L	-1,6706	0,1770	-0,2667	-0,0058	0,0641 ^{ns}	0,0231*	-
<i>Juglans pyriformis</i>							
ρ _{CH}	-0,6014	-0,4579	-0,6630	-0,5102	0,9558 ^{ns}	0,0686 ^{ns}	-
E _L	0,4273	-0,8142	-0,0528	-1,2243	0,8375 ^{ns}	0,0226*	-
<i>Quercus spp.</i>							
ρ _{CH}	-4,5993	6,2573	-4,7295	6,4449	0,9978 ^{ns}	-	0,0188*
E _L	-1,2079	-0,1832	-1,5427	0,8450	0,8972 ^{ns}	-	0,0052*
<i>Cordia elaeagnoides</i>							
ρ _{CH}	-1,3709	-0,9560	-1,4006	-0,9343	0,9917 ^{ns}	-	0,4092 ^{ns}
E _L	0,0329	-1,5909	0,0313	-1,4646	0,6350 ^{ns}	0,2800 ^{ns}	-

ρ_{CH} = Densidad aparente; E_L = Módulo dinámico; AT = Antes del tratamiento; DT = Después del tratamiento; SE = Sesgo estandarizado; AE = apuntamiento estandarizado; [-2 < SE y/o AE < +2]: Distribución normal; Ver-Var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; K-W = Prueba de Kruskal-Wallis; *P_(α=0,05) < 0,05; Si existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza de 95%; ns : No existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza de 95%.

Tabla 3. Correlaciones lineales y coeficientes de determinación

	y = a x + b	R ²
<i>Tabebuia rosea</i>		
ρ _{CH} DT = f(ρ _{CH} AT)	ρ _{CH} DT = 1,002 ρ _{CH} AT - 33	0,99
E _L DT = f(E _L AT)	E _L DT = 0,745 E _L AT + 853	0,85
<i>Andira inermis</i>		
ρ _{CH} DT = f(ρ _{CH} AT)	ρ _{CH} DT = 1,104 ρ _{CH} AT - 104	0,90
E _L DT = f(E _L AT)	E _L DT = 0,209 E _L AT + 7857	0,09
<i>Juglans pyriformis</i>		
ρ _{CH} DT = f(ρ _{CH} AT)	ρ _{CH} DT = 1,012 ρ _{CH} AT - 36	0,99
E _L DT = f(E _L AT)	E _L DT = 0,913 E _L AT - 137	0,93
<i>Quercus spp.</i>		
ρ _{CH} DT = f(ρ _{CH} AT)	ρ _{CH} DT = 1,006 ρ _{CH} AT - 28	0,99
E _L DT = f(E _L AT)	E _L DT = 0,608 E _L AT - 6320	0,33
<i>Cordia elaeagnoides</i>		
ρ _{CH} DT = f(ρ _{CH} AT)	ρ _{CH} DT = 1,003 ρ _{CH} AT - 22	0,99
E _L DT = f(E _L AT)	E _L DT = 0,977 E _L AT - 446	0,96

ρ_{CH} = Densidad aparente; E_L = Módulo dinámico; AT = Antes del tratamiento; DT = Después del tratamiento; R² = Coeficiente de determinación.

4. Discusión

Para las cinco especies de maderas, la densidad aparente después del tratamiento se correlaciona bien con la densidad aparente antes del tratamiento. Existen fuertes coeficientes de determinación que van de R² = 0,90 para *A. inermis*, hasta R² = 0,99 para *T. rosea*, *J. pyriformis*, *Quercus spp.* y *C. elaeagnoides*. Respecto a los resultados del módulo dinámico, los coeficientes de determinación para *A. inermis* y *Quercus spp.* son también débiles; mientras que para *T. rosea*, *J. pyriformis* y *C. elaeagnoides* las correlaciones son fuertes.

4.1. Densidad aparente

Después de su exposición al fuego, la densidad aparente disminuye significativamente para las especies *T. rosea*, *A. inermis* y *Quercus spp.* La menor diferencia aritmética la presenta *C. elaeagnoides*, y la mayor *T. rosea*. Particularmente, la especie *A. inermis* muestra una diferencia aritmética excepcional, en comparación con las demás maderas. Existe dos excepciones para las especies *J. pyriformis* y *C. elaeagnoides*, donde no se reportan diferencias estadísticamente significativas para esta variable, aunque la tendencia es de descenso de sus valores.

La disminución en la densidad aparente es resultado de la pérdida de masa en la región central donde las probetas estuvieron en contacto con la flama (Figura 3). Inmediatamente después de la exposición al fuego, el contenido de humedad en la madera disminuye, pero se recupera una vez reacondicionada la madera. En ese sentido, la variación en la densidad aparente representa la pérdida de la masa carbonizada.

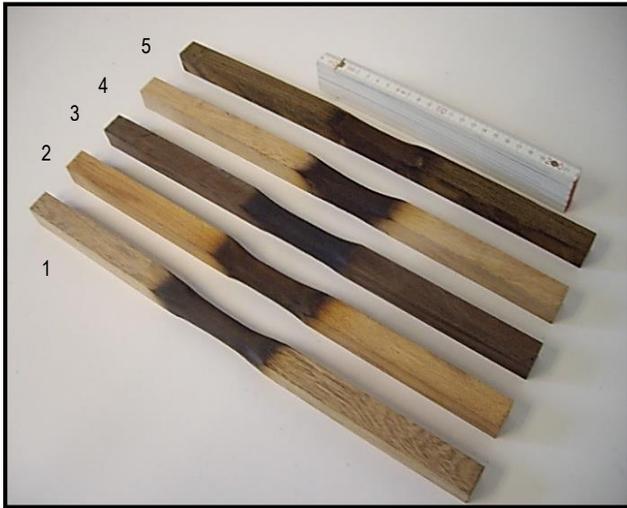


Figura 3. Probetas después de la exposición al fuego.

La numeración de las probetas corresponde a la de las especies de la tabla 1.

La magnitud en la disminución de la densidad aparente de la madera se reduce a medida que la densidad de cada especie aumenta. De tal forma que *T. rosea*, cuya densidad ($\rho_{CH} = 613 \text{ kg m}^{-3}$) es la menor de las cinco especies observadas, resulta con la mayor diferencia aritmética (-5,2%) y *C. elaeagnoides* ($\rho_{CH} = 996 \text{ kg m}^{-3}$) con la menor (-2,0%).

Este resultado ha sido observado para probetas de pequeñas dimensiones por [15] [28] [29]; así como entre otros investigadores. La magnitud de la pérdida de masa reportada es particular a cada especie estudiada, y varía de acuerdo con las dimensiones de las probetas y las configuraciones de las pruebas. La pérdida de masa indica el nivel de pirólisis, de volatilización y de combustión de la madera. Este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con la tasa de liberación de calor, el área de extinción específica y el rendimiento de óxido de carbono. Además, una menor pérdida de masa en una madera indica una menor propensión a la propagación de la llama [15].

4.2. Módulo dinámico

Cuando las probetas son expuestas al fuego el módulo dinámico disminuye significativamente para cuatro especies. Así mismo, se observa una disminución aritmética del coeficiente de variación para *T. rosea* y *A. inermis*; pero aumenta para *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides*.

Un fenómeno análogo al de esta investigación ha sido observado por [30], quienes reportan una reducción de 13,8% en

el módulo de elasticidad determinado en flexión estática de madera aserrada de la especie *Pseudotsuga menziesii* ($\rho_{CH} = 510 \text{ kg m}^{-3}$); esto después de cinco minutos de exposición al fuego en un experimento similar al del presente estudio.

La magnitud del módulo dinámico deriva del cálculo realizado con la Ecuación (3), donde se encuentran implícitas la densidad aparente y la frecuencia natural en vibraciones longitudinales. De esa forma, la combinación y la variación de los dos parámetros también ocasionan la disminución aparente en el módulo dinámico de una pieza de madera con las dimensiones específicas de la probeta.

La Figura 4 presenta la correlación lineal entre las densidades aparentes y la Figura 5 la correlación entre los módulos dinámicos, así como sus coeficientes de determinación R^2 . Debido a la escala utilizada en estas figuras, no se visualizan todos los puntos experimentales correspondientes a 175 probetas de las cinco especies. Las mediciones de las variables fueron consistentes y sus correlaciones, para antes y después del tratamiento, resultaron con fuertes coeficientes de determinación entre ellas. Por su parte, la ecuación (3), utilizada como modelo analítico para determinar el módulo dinámico de la madera en vibraciones longitudinales, es verificada de manera experimental con los modelos de predicción detallados en la Tabla 3.

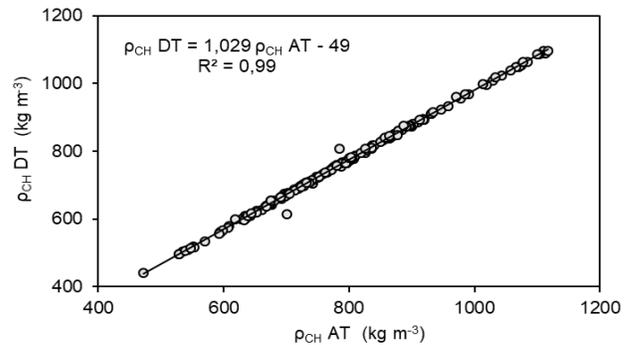


Figura 4. Correlación lineal entre los resultados para 175 probetas de las cinco especies, de la densidad aparente (ρ_{CH}), después del tratamiento (DT), en función de la densidad aparente antes del tratamiento (AT).

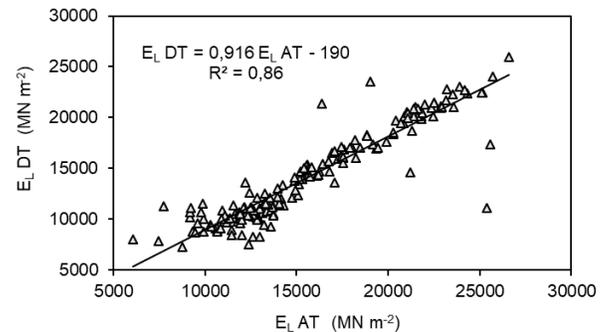


Figura 5. Correlación lineal entre los resultados para 175 probetas de las cinco especies, el módulo dinámico (E_L) después del tratamiento (DT), en función del módulo dinámico antes del tratamiento (AT).

5. Conclusiones

Tras su exposición al fuego, existe una tendencia a la reducción en la densidad aparente, y el módulo dinámico de la madera de *T. rosea*, *A. inermis*, *J. pyriformis*, *Quercus* spp. y *C. elaeagnoides*; características determinadas por medio de vibraciones longitudinales en probetas de pequeñas dimensiones.

La disminución es general para las cinco maderas, pero las diferencias fueron significativas en tres especies para la densidad y en cuatro para el módulo dinámico. La magnitud en la disminución de la densidad aparente y el módulo dinámico se reduce a medida que la densidad de cada especie aumenta.

Los modelos lineales establecidos para las variables densidad y modulo dinámico indican que es posible predecir los valores esperados para cada una después del tratamiento de fuego por medio de una regresión lineal simple con un alto coeficiente de determinación.

Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se agradece al Doctor Juan Zárate Medina por facilitar el equipo para realizar las pruebas dinámicas, y a los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera por su participación en los trabajos de laboratorio.

Referencias

- [1] Forest Products Laboratory, *Wood handbook. Wood as an engineering material*, Madison: Forest Products Laboratory, 2010.
- [2] J. R. Sotomayor, *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*, Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2015.
- [3] I. Brémaud, Y. El Kaïm, D. Guibal, K. Minato, B. Thibaut and J. Gril, "Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types", *Annals of Forest Science*, vol. 69, no. 3, pp. 373-386, 2012.
- [4] S. Schubert, D. Gsell, J. Dual, M. Motavalli and P. Niemz, "Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity", *Holzforschung*, vol. 63, no. 1, pp. 107-112, 2009.
- [5] I. Brémaud, J. Gril and B. Thibaut, "Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data", *Wood Science and Technology*, vol. 45, no. 4, pp. 735-754, 2011.
- [6] R. R. N. Mvondo, P. Meukam, J. Jeong, D. D. Meneses and E. G Nkeng, "Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species", *Results in Physics*, vol. 7, pp. 2096-2103, 2017.
- [7] E. V. Bachtir, S. J. Sanabria, J. P. Mittig and P. Niemz, "Moisture-dependent elastic characteristics of walnut and cherry wood by means of mechanical and ultrasonic test incorporating three different ultrasound data evaluation techniques", *Wood Science and Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 47-67, 2017.
- [8] R. J. Ross, *Nondestructive evaluation of wood: General Technical Report FPL-GTR-238*, Madison: Forest Products Laboratory, 2015.
- [9] J. Tippner, J. Hrivnák and M. Kloiber, "Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods", *BioResources*, vol. 11, no. 1, pp. 503-518, 2016.
- [10] A. Sinha, R. Gupta, and J. A. Nairn, "Thermal degradation of bending properties of structural wood and wood-based composites", *Holzforschung*, vol. 65, no. 2, pp. 221-229, 2011.
- [11] M. Y. Wen, C. W. Kang and H. J. Park, "Impregnation and mechanical properties of three softwoods treated with a new fire retardant chemical", *Journal of Wood Science*, vol. 60, no. 5, pp. 367-375, 2014.
- [12] B. Östman, D. Brandon and H. Frantzich, "Fire safety engineering in timber buildings", *Fire Safety Journal*, vol. 91, no. pp. 11-20, 2017.
- [13] J. Schmid, M. Klippel, A. Just and A. Frangi, "Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method", *Fire Safety Journal*, vol. 68, no. pp. 81-99, 2014.
- [14] M. J. DiDomizio, P. Mulherin and E. J. Weckman, "Ignition of wood under time-varying radiant exposures", *Fire Safety Journal*, vol. 82, pp. 131-144, 2016.
- [15] Q. Xu, L. Chen, K. A. Harries, F. Zhang, Q. Liu and J. Feng, "Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests", *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp. 416-427, 2015.
- [16] R. Gonçalves, A. J. Trinca and B. P. Pellis, "Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens", *Wood Science and Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 269-287, 2014.
- [17] R. Longo, D. Laux, S. Pagano, T. Delaunay, E. Le Clézio and O. Arnould, "Elastic characterization of wood by Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS): a comprehensive study", *Wood Science and Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 383-402, 2018.
- [18] J. R. Sotomayor, "Módulo dinámico de la madera de cinco especies mexicanas expuestas al fuego", *Ingenierías*, vol. 21, no. 78, pp. 20-35, 2018.
- [19] J. Cordero and D. H. Boshier, *Árboles de Centroamérica*, San José: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 2003.
- [20] J. A. Silva, et al., *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*, México: Comisión Nacional Forestal, 2010.
- [21] J. R. Sotomayor and M. I. Carrillo, "Comportamiento al fuego de cinco especies mexicanas. Estudio comparativo", *Investigación e Ingeniería de la Madera*, vol. 13, no. 1, pp. 4-38, 2017.
- [22] J. C. Tamarit y J. L. López, *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2007.
- [23] International Organization for Standardization, *ISO 3129:2012. Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests*, Geneva: International Organization for Standardization, 2012.
- [24] International Organization for Standardization, *ISO 13061-1:2014. Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests*, Geneva: International Organization for Standardization, 2014.

- [25] International Organization for Standardization, *ISO 13061-2:2014. Wood. Determination of density for physical and mechanical tests*, Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
- [26] P. G. D. Segundinho, L. C. Cossolino, A. H. A. Pereira and C. Calil, "Analysis of the natural vibration frequency test method to obtain the modulus of elasticity of wood structural components", *Revista Arvore*, vol. 36, no. 6, pp. 1155-1161, 2012.
- [27] M. Yuksel, E. Baysal and H. Toker, "Combustion characteristics of oriental beech wood impregnated with commonly used borates", *Wood Research*, vol. 59, no. 1, pp. 39-50, 2014.
- [28] G. Almeida, D. V. B. Santos and P. Perré, "Mild pyrolysis of fast-growing wood specie (Caribbean pine and Rose gum): Dimensional changes predicted by the global mass loss", *Biomass and Bioenergy*, vol. 70, pp. 407-415, 2014.
- [29] R. Emberley, T. Do, J. Yim and J. L. Torero, "Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber", *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 252-258, 2017.
- [30] B. Kukay, P. J. Barr, L. Friel, D. C. Coster and M. W. Halling, "Post-fire assessment, methodology, and equations for directly determining wood's residual flexural properties", *Forest Products Journal*, vol. 58, no. 1, pp. 40-46, 2008.