

Características higroscópicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum*, *Cupressus lindleyi* y *Cedrela odorata*

*Javier Ramón Sotomayor Castellanos, Luis Miguel Tinoco Campos
y David Raya González*

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad básica, el contenido de humedad, el coeficiente de higocontracción volumétrica, el punto de saturación de la fibra, el máximo contenido de humedad, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos de la madera de *Enterolobium cyclocarpum*, *Cupressus lindleyi* y *Cedrela odorata*. Para cada especie, se realizaron pruebas de higroscopia. Se prepararon 32 probetas de pequeñas dimensiones para medir sus pesos y dimensiones, antes y después de los tratamientos de hidratado y de secado. El diseño experimental propuso pruebas de normalidad en la distribución de muestras independientes, pruebas de verificación y análisis de varianza y de *Kruskal-Wallis*. Se concluye que las magnitudes de la densidad básica y las características de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata* son similares. Aunque los

valores son diferentes para cada especie, siguen las tendencias estadísticas reportadas en la bibliografía.

Palabras clave: densidad básica, contenido de humedad, punto de saturación de la fibra, coeficiente de higrócontracción.

Abstract

The objective of the investigation was to determine the basic density, the moisture content, the volumetric hygrocontraction coefficient, the saturation point of the fiber, the maximum moisture content, the percentage of cell wall and the percentage of empty spaces of the wood of *Enterolobium cyclocarpum*, *Cupressus lindleyi* and *cereals odorata*. For each species, hygroscopy tests were performed. 32 small-sized specimens were prepared to measure their weights and dimensions, before and after the hydration and drying treatments. The experimental design proposed normality tests in the distribution of independent samples, verification tests and analysis of variance and *Kruskal-Wallis*. It is concluded that the magnitudes of the basic density and the characteristics of *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* and *C. odorata* are similar. Although the values are different for each species, they follow the statistical trends reported in the literature.

Keywords: basic density, moisture content, fiber saturation point, hygrocontraction coefficient.

Introducción

La higroscopicidad de la madera se define como su capacidad para absorber la humedad atmosférica circundante y mantenerla en forma de agua líquida o vapor. Para cada especie existe una humedad de equilibrio, es decir, un contenido de humedad en el que la madera ni capta ni libera humedad al ambiente (Engelud *et al.*, 2013).

La humedad penetra en la madera por la atracción de las moléculas de agua hacia los hidroxilos de sus componentes químicos, principalmente, la celulosa. Como resultado, estos hidroxilos forman una capa monomolecular de agua con fuertes enlaces de hidrógeno. La formación de esta capa hace que se separen las cadenas de moléculas de celulosa en las regiones amorfas y entre los cristalitos de las microfibrillas, de modo que la madera comienza a expandirse. Bajo el efecto de las fuerzas de atracción secundarias, más moléculas de agua entran en la madera y

forman una capa polimolecular. Adicionalmente, otras moléculas pueden entrar por condensación de capilaridad en los huecos de la pared celular. Después de la saturación de las paredes, el agua líquida también entra en las cavidades celulares. Por lo tanto, existen dos niveles de masa de agua en la madera: el agua contenida en las paredes celulares y el agua libre que ocupa las cavidades intercelulares. La condición en la cual las paredes están saturadas pero las cavidades están vacías se llama punto de saturación de la fibra (Berry y Roderick, 2005).

La reciente demanda de materiales sostenibles y procesos responsables con el ambiente en la industria de la construcción ha generado un renovado interés en la investigación de las propiedades esenciales de la madera y sus aplicaciones derivadas, específicamente, para el desarrollo de sistemas de adaptación arquitectónicos de baja tecnología. La capacidad de diseñar compuestos de madera cuyo estado de tensión permanezca limitado bajo los cambios de la humedad ambiental es beneficiosa para cualquier aplicación de ingeniería sometida a una variación repetida de la carga, como son sistemas adaptativos (Abdelmohsen *et al.*, 2019).

La investigación de la densidad y las características higroscópicas de la madera encuentra aplicaciones prácticas, entre otros aspectos, en el diseño de productos de madera y para la concepción de piezas de madera de ingeniería. Otra utilización de las características higroscópicas de una madera es determinar su calidad, mediante la comparación de sus magnitudes con otras especies. Este último argumento se refiere a que una madera es de mejor calidad si se encoje o expande en menor proporción y sobre todo si su relación de anisotropía es mínima (Romagnoli *et al.*, 2014; Hassankhani *et al.*, 2015; Ištók *et al.*, 2016; Machuca *et al.*, 2017; Huda *et al.*, 2018; Abdelmohsen *et al.*, 2019).

Otra aplicación de las características higroscópicas a nivel industrial es el comportamiento y control de procesos industriales. Por ejemplo, el punto de saturación de la fibra, el porcentaje de espacios vacíos, el porcentaje de pared celular y el máximo contenido de humedad de una especie son parámetros necesarios para optimizar sus procesos de secado y/o de impregnado (Tamarit y Fuentes, 2003).

El fenómeno de la higroscopía en la madera sólida se estudia desde dos escalas de observación: a nivel microanatómico y a nivel macroanatómico. A nivel microscópico, se estudia la proporción de los componentes químicos fundamentales de la madera que determinan sus propiedades higroscópicas (Berry *et al.*, 2005). A nivel macro, se analiza el acomodo relativo de los tejidos celulares que forman

capas de crecimiento, lo que resulta en las propiedades de anisotropía de la madera (De Almeida *et al.*, 2017). De tal forma, las características higroscópicas como la higocontracción son referidas a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso.

Enterolobium cyclocarpum (Jacq.) Griseb., *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. y *Cedrela odorata* L. son maderas endémicas de México y Centroamérica (Cordero y Boshier, 2003; Tamarit y López, 2007; Silva *et al.*, 2010). La determinación experimental de la densidad de la madera y de algunas de sus características higroscópicas, está reglamentada por procedimientos normalizados como, por ejemplo, las normas de la Organización Internacional de Normalización y las de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales Internacional. Para otras características menos comunes, pero igualmente importantes, la determinación está documentada por investigaciones particulares. Por ejemplo, sus características físicas y mecánicas están reportadas en Sotomayor (2015). Específicamente, las características higroscópicas de las especies *E. cyclocarpum* y *C. odorata* están reportadas en Sotomayor y Ramírez (2013) y Sotomayor y Ramírez (2014). No se encontró información sobre la madera de *C. lindleyi*.

La literatura sobre las características higroscópicas de la madera indica una importante variabilidad en las magnitudes de los parámetros, las cuales son particulares a cada estudio. Así, la pregunta de esta investigación es qué tanto varían las características higroscópicas de las maderas de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata*. Como hipótesis de trabajo la investigación plantea que las magnitudes de las características higroscópicas son del mismo orden que las reportadas en la bibliografía.

Para verificar esta conjetura, el objetivo de la investigación fue determinar experimentalmente las propiedades higroscópicas de la madera de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata* y comparar los resultados con los datos de la bibliografía.

Materiales y métodos

El material para experimentación consistió en madera de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata*. Para cada especie se prepararon 32 probetas con dimensiones de 0,02 m x 0,02 m x 0,06 m y se almacenaron durante seis meses en una cámara acondicionadora con temperatura de 20 °C ($\pm 1^\circ\text{C}$) y humedad relativa de 65% ($\pm 2\%$) hasta que alcanzaron el contenido de humedad en equilibrio. Las probetas

estuvieron orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera y libres de defectos de crecimiento.

Las pruebas de higroscopía consistieron en las siguientes etapas (Sotomayor y Ramírez, 2014):

1. Medición del peso y las dimensiones de las probetas.
2. Hidratación de las probetas en un baño de agua con temperatura de 20° C durante 72 horas.
3. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado saturado después del tratamiento de hidratado.
4. Secado de las probetas en un horno con temperatura de 103 °C durante 48 horas.
5. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado anhidro después del tratamiento de secado.

Los parámetros, referencias, fórmulas, mediciones y símbolos se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1

Parámetros, referencias, fórmulas y mediciones.

No.	Parámetros Referencias	Fórmulas	Mediciones
(1)	Densidad básica (kg m ⁻³) Hassankhani <i>et al.</i> (2015)	$\rho_0 = \frac{P_a}{V_s}$	P _s = Peso de la probeta en estado saturado (kg) P _a = Peso de la probeta en estado anhidro (kg)
(2)	Contenido de humedad (%) Sotomayor y Ramírez (2013)	$CH = \left(\frac{P_s - P_a}{P_a} \right) \times 100$	P _s = Peso de la probeta en estado saturado (kg) P _a = Peso de la probeta en estado anhidro (kg)
(3)	Máximo contenido de humedad (%)	$MCH = \left(\frac{1,53 - \rho_0}{1,53 \times \rho_0} \right) \times 100$	ρ_0 = Densidad básica (kg m ⁻³)

Características higroscópicas de la madera de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata*

Tamarit y Fuentes (2003)			
(4)	Porcentaje de pared celular (%)	$PC = \left(\frac{\rho_0}{1,53} \right) 100$	$\rho_0 =$ Densidad básica (kg m^{-3})
Tamarit y Fuentes (2003)			
(5)	Porcentaje de espacios vacíos (%)	$EV = \left(1 - \frac{\rho_0}{1,53} \right) \times 100$	$\rho_0 =$ Densidad básica (kg m^{-3})
Tamarit y Fuentes (2003)			
(6)	Higrocontracción (%) según la dirección i	$\beta_i = \frac{\Delta L_i}{L_i}$	$\Delta L_i =$ Variación de la dimensión en la dirección i (m) $L_i =$ Dimensión inicial de la probeta en la dirección i (m) i : direcciones radial (R), tangencial (T), longitudinal (L)
Sotomayor <i>et al.</i> (2010)			
(7)	Higrocontracción volumétrica (%)	$\beta_V = \frac{\Delta V}{V_i}$	$\Delta V =$ Variación del volumen de la probeta (m) $V_i =$ Volumen inicial de la probeta (m) i : direcciones radial (R), tangencial (T), longitudinal (L)
Hassankhani <i>et al.</i> (2015)			
(8)	Punto de saturación de la fibra (%)	$PSF = \frac{\beta_V}{0,9 \times \rho_0}$	$\beta_V =$ Higrocontracción volumétrica (%) $\rho_0 =$ Densidad básica (kg m^{-3})
Fuentes (2000)			
(9)	Coefficiente de higrocontracción direccional (%/%)	$\lambda_i = \frac{\beta_i}{PSF}$	$\beta_i =$ Higrocontracción volumétrica (%) PSF = Punto de saturación de la fibra (%)
Sotomayor <i>et al.</i> (2010)			

Características higroscópicas de la madera de E. cyclocarpum, C. lindleyi y C. odorata

(10)	Coefficiente de higocontracción volumétrica (%/%)	$\lambda_v = \frac{\beta_v}{PSF}$	β_v = Higocontracción volumétrica (%) PSF = Punto de saturación de la fibra (%)
	Sotomayor <i>et al.</i> (2010)		

Diseño experimental

Las variables de respuesta fueron la densidad básica, el contenido de humedad y el coeficiente de higocontracción volumétrica. Las variables derivadas fueron el punto de saturación de la fibra, el máximo contenido de humedad, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos. Los resultados se agruparon en tres muestras independientes, cada una correspondiente a una especie. La especie se consideró el factor de variación. Para cada variable se calcularon la media (\bar{x}), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación ($CV = \sigma/\bar{x}$).

Para cada muestra se realizaron pruebas de normalidad en la distribución. Se calcularon el sesgo estandarizado (SE) y el apuntamiento estandarizado (AE). El criterio de demarcación para aceptar una distribución normal fue que los valores de SE y AE se situaran al interior del intervalo [-2, +2]. Se verificaron las varianzas (σ) y, cuando procedió, se realizaron análisis de varianza. El criterio de demarcación, para aceptar una diferencia estadísticamente significativa con un nivel del 95% de confianza fue el valor de $P < 0,05$. Se contrastaron la hipótesis nula $H_N: \bar{x}_1 = \bar{x}_2 = \bar{x}_3$ versus la hipótesis alternativa $H_A: \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2 \neq \bar{x}_3$ donde los subíndices significan la especie.

Cuando no se satisfizo alguno de los criterios de demarcación, se realizaron pruebas de *Kruskal-Wallis* de diferencias de medianas (X) y se contrastó la hipótesis nula $H_N: X_1 = X_2 = X_3$ versus la hipótesis alternativa $H_A: X_1 \neq X_2 \neq X_3$ donde los subíndices significan la especie.

Los resultados de esta investigación (2018) se graficaron en relación con la densidad básica y se contrastaron con los datos de la bibliografía (Sotomayor y Ramírez, 2014). Para estos últimos se calcularon sus correlaciones lineales y sus coeficientes de determinación (R^2). Los criterios de clasificación de los coeficientes de determinación fueron los propuestos por Tippner *et al.* (2016): correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$.

Resultados y análisis

La Tabla 2 presenta las características higroscópicas de las maderas de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata*. Además se presentan las clasificaciones de acuerdo con Sotomayor y Ramírez (2013). Los criterios para esta clasificación están detallados en la Tabla 3. Para contrastar los resultados de esta investigación con los datos de la bibliografía, la Tabla 4 presenta las características higroscópicas de 12 maderas reportadas por Sotomayor y Ramírez (2013). Particularmente, las densidades básicas se presentan como referencia y se detallan en los ejes de las abscisas de las Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8. Para simplificar la redacción, en lo subsecuente, la densidad básica se escribirá únicamente como “densidad”. La bibliografía revisada no presenta coeficientes de contracción longitudinal. Por este motivo, los resultados de este parámetro en esta investigación no se comparan con los de la bibliografía.

TABLA 2

Características higroscópicas y su clasificación.

Especie		ρ_0 (kg m ⁻³)	PSF (%)	MCH (%)	PC (%)	EV (%)
<i>E. cyclocarpum</i>	\bar{x}	407	23,2	182,7	26,6	73,4
	Clasificación*	MB	ME	MA	MB	MA
	σ	45	3,3	24,8	2,9	2,9
	CV	11,0	14,3	13,6	11,0	4,0
<i>C. lindleyi</i>	\bar{x}	438	21,0	169,2	28,6	71,4
	Clasificación*	BA	BA	A	B	A
	σ	72	3,8	40,0	4,7	4,7
	CV	16,4	18,3	23,6	16,4	6,6
<i>C. odorata</i>	\bar{x}	441	24,4	166,8	28,8	71,2
	Clasificación*	BA	M	A	B	A

Características higroscópicas de la madera de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata*

	σ	69	5,7	36,8	4,5	4,5
	CV	15,6	23,3	22,0	15,6	6,3
		CH	λ_R	λ_T	λ_L	λ_V
		(%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)
<i>E. cyclocarpum</i>	\bar{x}	11,4	0,19	0,18	0,01	0,37
Clasificación*		-	M	MB	-	B
	σ	0,7	0,05	0,05	0,01	0,04
	CV	6,0	27,8	25,8	190,7	11,0
<i>C. lindleyi</i>	\bar{x}	10,2	0,19	0,20	0,01	0,39
Clasificación*		-	M	MB	-	B
	σ	1,0	0,05	0,06	0,02	0,06
	CV	9,8	27,1	28,8	384,4	16,4
<i>C. odorata</i>	\bar{x}	11,8	0,19	0,20	0,01	0,40
Clasificación*		-	M	MB	-	B
	σ	0,8	0,05	0,06	0,01	0,06
	CV	6,6	24,5	31,5	100,6	15,6

ρ_0 = Densidad básica; PSF = Punto de saturación de la fibra; MCH = Máximo contenido de humedad; PC = Porcentaje de pared celular; EV = Porcentaje de espacios vacíos; CH = Contenido de humedad; λ_R = Coeficiente de contracción radial; λ_T = Coeficiente de contracción tangencial; λ_L = Coeficiente de contracción longitudinal; λ_V = Coeficiente de contracción volumétrica; \bar{x} = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porcentaje; * = Clasificación de acuerdo con Sotomayor y Ramírez (2013).

TABLA 3

Valores de los intervalos de los criterios de clasificación (Sotomayor y Ramírez, 2013).

Intervalo	Símbolo	ρ_0	PSF	MCH	PC	EV	λ_R	λ_T	λ_V
Muy bajo	MB	428	20,15	59,36	27,94	49,02	0,13	0,22	0,33
Bajo	B	428	20,15	59,36	27,94	49,02	0,13	0,22	0,33
		516	22,79	87,40	33,70	54,78	0,17	0,27	0,41
Medio	M	516	22,79	87,40	33,70	54,78	0,17	0,27	0,41
		692	28,06	143,48	45,22	66,30	0,25	0,37	0,55
Alto	A	692	28,06	143,48	45,22	66,30	0,25	0,37	0,55
		780	30,70	171,52	50,98	72,06	0,29	0,43	0,62
Muy alto	MA	780	30,70	171,52	50,98	72,06	0,29	0,43	0,62

ρ_0 : Densidad básica; PSF: Punto de saturación de la fibra; MCH: Máximo contenido de humedad; PC:

Porcentaje de pared celular; EV: Porcentaje de espacios vacíos; λ_R : Coeficiente de higrocontracción

radial; λ_T : Coeficiente de higrocontracción tangencial; λ_V : Coeficiente de higrocontracción volumétrica.

TABLA 4

Datos de Sotomayor y Ramírez (2014).

Especie	ρ_0	PSF	λ_T	λ_R
	(kg m ⁻³)	(%)	(%/%)	(%/%)
<i>Gyrocarpus americanus</i>	350	27,6	0,25	0,14
<i>Swietenia macrophylla</i>	422	24,9	0,30	0,17
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	469	16,4	0,50	0,27
<i>Cedrela odorata</i>	472	23,0	0,35	0,19
<i>Juglans pyriformis</i>	546	19,9	0,48	0,26
<i>Lysiloma</i> spp.	568	23,3	0,38	0,21
<i>Swietenia humillis</i>	639	11,9	0,77	0,42

Características higroscópicas de la madera de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata*

<i>Caesalpinia platyloba</i>	683	20,6	0,45	0,24
<i>Celeanodendron mexicanum</i>	692	17,8	0,58	0,32
<i>Quercus</i> spp.	702	23,7	0,40	0,22
<i>Albizia plurijuga</i>	773	13,9	0,72	0,39
<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	808	10,8	0,97	0,53
<i>Especie</i>	λ_V	MCH	PC	EV
	(%/%)	(%)	(%)	(%)
<i>Gyrocarpus americanus</i>	0,31	221	22,9	77,1
<i>Swietenia macrophylla</i>	0,38	172	27,6	72,4
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	0,42	148	30,7	69,3
<i>Cedrela odorata</i>	0,42	148	30,8	69,2
<i>Juglans pyriformis</i>	0,49	118	35,7	64,3
<i>Lysiloma</i> spp.	0,51	119	37,1	62,9
<i>Swietenia humillis</i>	0,58	91	41,8	58,2
<i>Caesalpinia platyloba</i>	0,61	80	44,7	55,3
<i>Celeanodendron mexicanum</i>	0,62	80	45,2	54,8
<i>Quercus</i> spp.	0,63	78	45,8	54,2
<i>Albizia plurijuga</i>	0,70	64	50,5	49,5
<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	0,73	59	52,8	47,2

ρ_0 = Densidad básica; PSF = Punto de saturación de la fibra; λ_T = Coeficiente de contracción

tangencial; λ_R = Coeficiente de higocontracción radial; λ_V = Coeficiente de contracción volumétrica;

MCH = Máximo contenido de humedad; PC = Porcentaje de pared celular; EV = Porcentaje de espacios vacíos.

Para el análisis, las correlaciones se calcularon sólo con datos de la bibliografía. Los resultados de esta investigación se posicionan en las figuras únicamente para fines de comparación. La intensidad de las correlaciones se clasifica de acuerdo a los criterios establecidos en el diseño experimental (Tippner *et al.*, 2016).

El contenido de humedad varió del estado inicial para el tiempo de tratamiento $t = 0$ horas y tabulado en la Tabla 2, hasta el contenido de humedad alcanzado por la madera después del hidratado durante un tiempo de tratamiento de 72 horas. Así, este parámetro aumentó hasta los valores máximos promedio para *E. cyclocarpum* = 82,9 %, para *C. lindleyi* = 61,5 % y para *C. odorata* = 43,1 %. Finalmente, y después del deshidratado en un tiempo de tratamiento de 120 horas, el contenido de humedad para las tres especies fue de cero por ciento (Figura 1). Para las tres especies el tratamiento de hidratado originó que el contenido de humedad de la madera máximo fuera superior al punto de saturación de la fibra (Figura 1). Este resultado sugiere que se pueden hidratar probetas con secciones de 0,02 m x 0,02 m en un tiempo de 72 horas y a temperatura ambiente de laboratorio de 20 °C (± 1 °C). Después de terminar las pruebas de higroscopía, no se observó deterioro alguno en la madera.

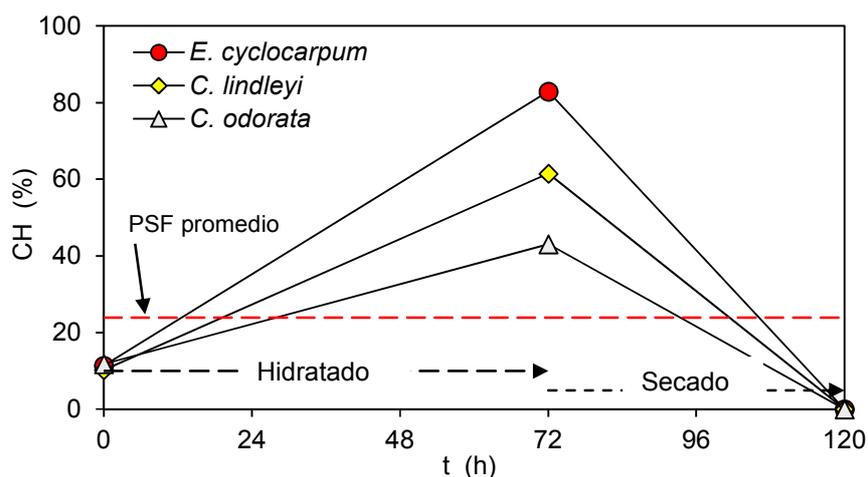


Figura 1. Variación del contenido de humedad (CH) en función del tiempo del tratamiento (t). PSF = Punto de saturación de la fibra.

La densidad de *E. cyclocarpum* clasifica como muy baja, mientras que la de *C. lindleyi* y *C. odorata* clasifica como baja. Sus valores medios y sus coeficientes de variación son similares a los reportados en la bibliografía. Las densidades de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata* se agrupan al interior de la nube de los datos de la bibliografía y cerca de la correlación del punto de saturación de la fibra en función de la densidad básica (Figura 2).

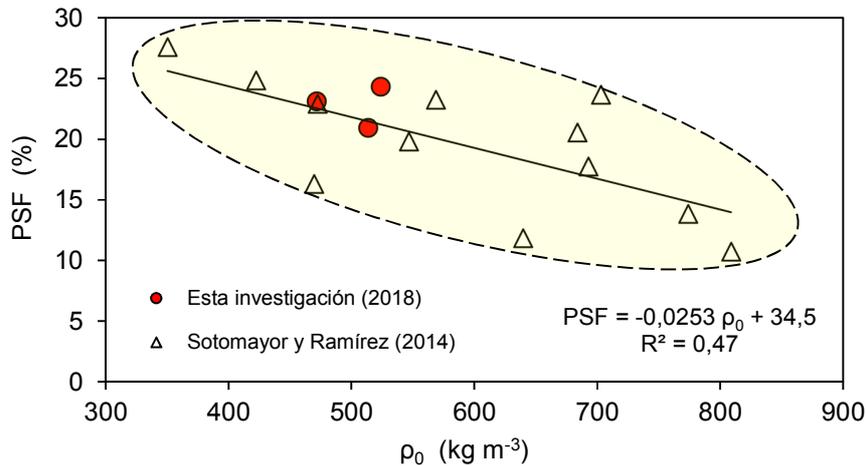


Figura 2. Dispersión del punto de saturación de la fibra (PSF); y correlación y coeficiente de determinación (R^2) de la bibliografía, en función de la densidad básica (ρ_0).

Los valores de los puntos de saturación de la fibra se agrupan alrededor de la correlación $PSF = f(\rho_0)$ que califica como media (Figura 2). Sus valores medios son similares a los de maderas de referencia con densidades parecidas. Sus coeficientes de variación son comparables con los reportados por Sotomayor y Ramírez (2014) para maderas mexicanas. La tendencia es, a mayor densidad, el punto de saturación de la fibra disminuye.

El máximo contenido de humedad sigue la tendencia del punto de saturación de la fibra con una correlación muy alta. A medida que la densidad aumenta, la madera admite menos humedad (Figura 3). Esto es congruente con el hecho de que cuando aumenta la densidad, aumenta la masa por unidad de volumen. Es decir, se incrementa el porcentaje de la pared celular. Así, este parámetro aumenta proporcionalmente a la densidad con una correlación alta (Figura 4). En el mismo contexto, el porcentaje de espacios disminuye proporcionalmente con una correlación muy alta (Figura 5).

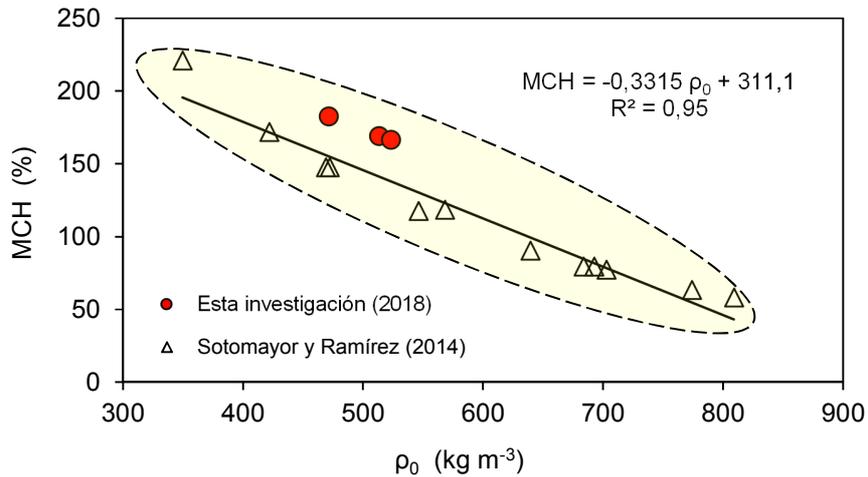


Figura 3. Dispersión del máximo contenido de humedad (MCH); y correlación y coeficiente de determinación (R^2) de la bibliografía, en función de la densidad básica (ρ_0).

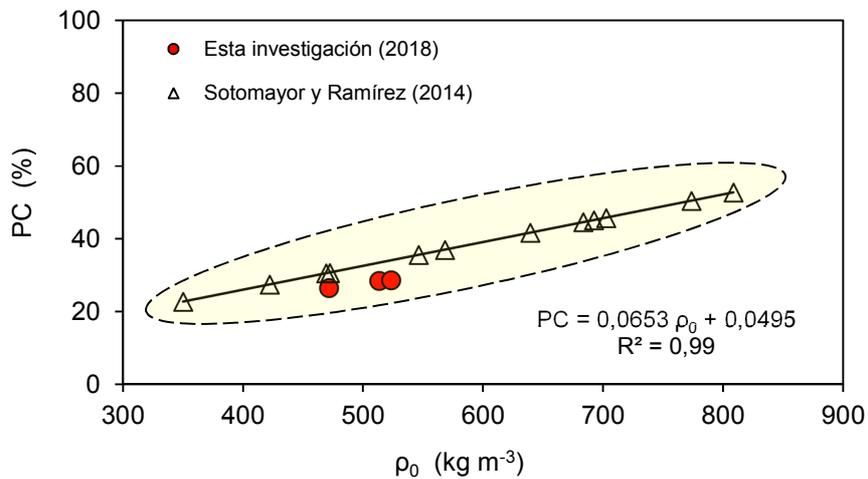


Figura 4. Dispersión del porcentaje de pared celular (PC); y correlación y coeficiente de determinación (R^2) de la bibliografía, en función de la densidad básica (ρ_0).

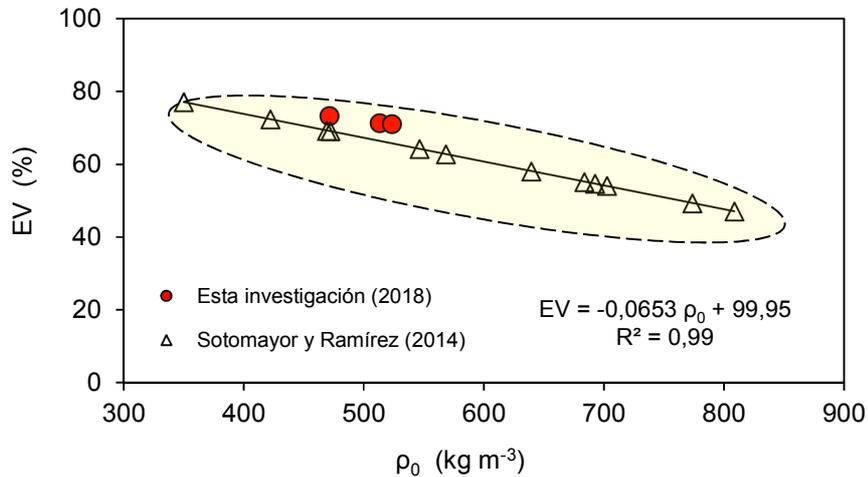


Figura 5. Dispersión del porcentaje de espacios vacíos (EV); y correlación y coeficiente de determinación (R²) de la bibliografía, en función de la densidad básica (ρ_0).

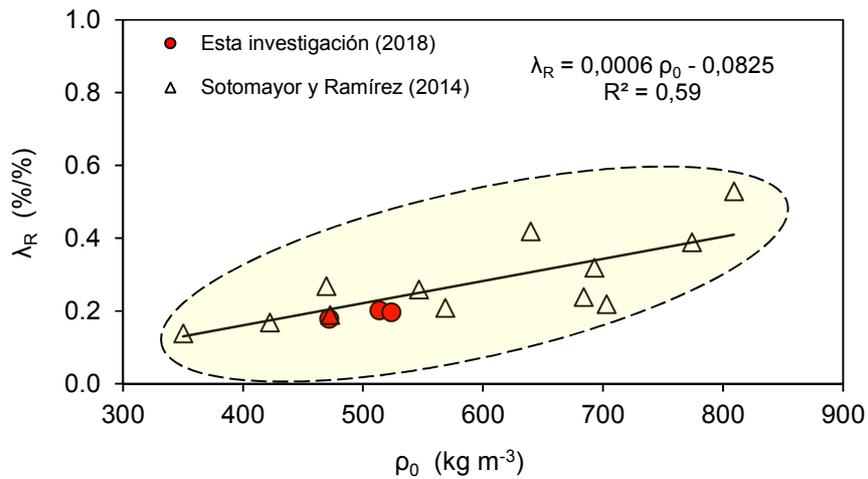


Figura 6. Dispersión a) del coeficiente de higocontracción radial (λ_R); y correlación y coeficiente de determinación (R²) de la bibliografía, en función de la densidad básica (ρ_0).

Estos tres parámetros están relacionados teóricamente con la densidad básica, presente implícitamente en las fórmulas 3, 4, 5 y 8 (Tabla 1). De tal forma, sus coeficientes de variación son también congruentes con los resultados de la bibliografía.

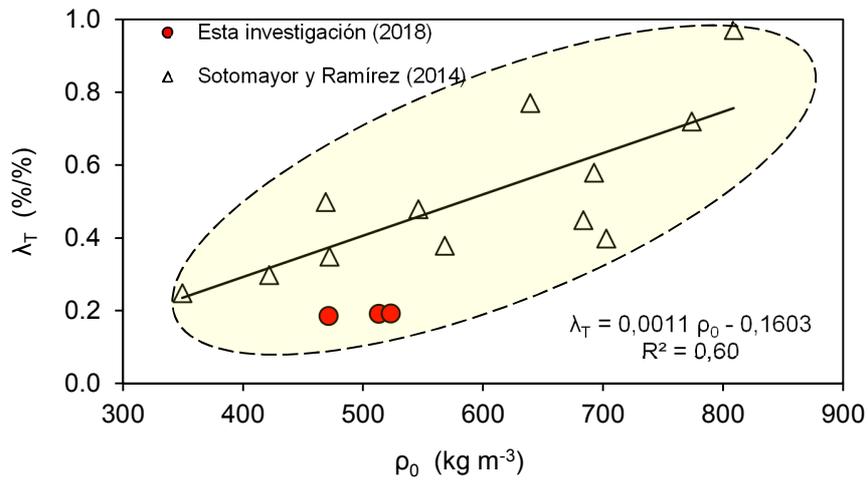


Figura 7. Dispersión del coeficiente de higrocontracción tangencial (λ_T); y correlación y coeficiente de determinación (R^2) de la bibliografía, en función de la densidad básica (ρ_0).

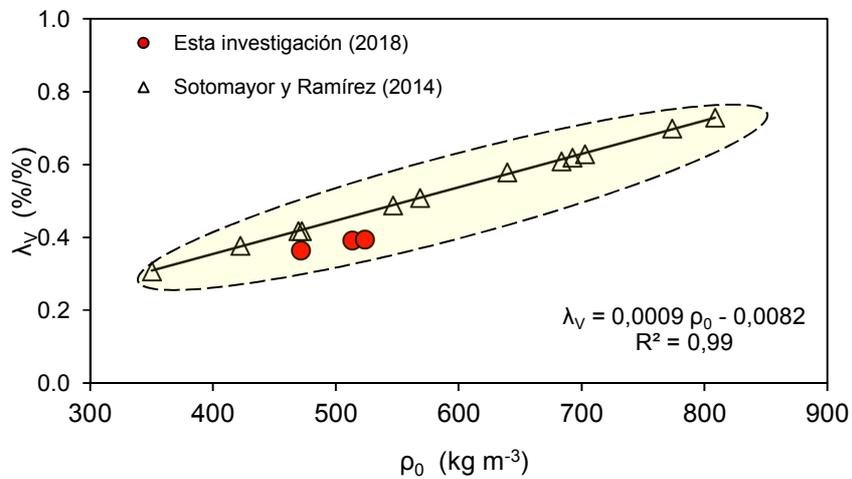


Figura 8. Dispersión del coeficiente de higrocontracción volumétrico (λ_V); y correlación y coeficiente de determinación (R^2) de la bibliografía, en función de la densidad básica (ρ_0).

En cambio, los coeficientes de higrócontracción radial y tangencial, que se calculan a partir de mediciones directas, presentan correlaciones medias (Figuras 6 y 7). Por su parte el coeficiente de higrócontracción volumétrico resulta con una correlación muy alta (Figura 8). Estos resultados son similares a las tendencias de los datos de la bibliografía. Los tres parámetros aumentan proporcionalmente a medida que la densidad se incrementa y sus coeficientes de variación son similares a los reportados en la bibliografía.

Conclusiones

Se determinaron la densidad básica, el contenido de humedad, el coeficiente de higrócontracción volumétrica, el punto de saturación de la fibra, el máximo contenido de humedad, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos de la madera de *E. cyclocarpum*, *C. lindleyi* y *C. odorata*.

Se concluye que sus magnitudes son del mismo orden que las reportadas en la bibliografía. No obstante, los valores son diferentes para cada especie, pero se posicionan cerca de las tendencias estadísticas de los datos de la bibliografía.

Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Referencias

- Abdelmohsen, S., Adriaenssens, S., El-Dabaa, R., Gabriele, S., Olivieri, L. y Teresi, L. 2019. A multi-physics approach for modeling hygroscopic behavior in wood low-tech architectural adaptive systems. *Computer-Aided Design*, 106: 43–53. doi: 10.1016/j.cad.2018.07.005
- Berry, S. L. y Roderick, M. L. 2005. Plant-water relations and the fibre saturation point. *New Phytologist*, 168: 25-37. doi: 10.1111/j.1469-8137.2005.01528.x
- Cordero, J. y Boshier, D. H. 2003. Árboles de Centroamérica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba. 1079 pp.
- De Almeida, T. H., de Almeida, Di. H. , De Araujo, V. A., da Silva, S. A. M., Christoforo, A. L. y Lahr, F. A. R. 2017. Density as Estimator of Dimensional Stability Quantities of Brazilian Tropical Woods. *BioResources*, 12(3): 6579-6590. doi: 10.15376/biores.12.3.6579-6590

- Engelund, E. T., Thygesen, L. G., Svensson, S. y Hill, C. A. S. 2013. A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Science and Technology*, 47(1): 141-161. doi: 10.1007/s00226-012-0514-7
- Fuentes Salinas, M. 2000. Estimación del Punto de Saturación de la Fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1): 79-81. <https://chapingo.mx/revistas/revistas/articulos/doc/rchscfaVI325.pdf>
- Hassankhani, M., Kord, B. y Pourpasha, M. M. 2015. Empirical statistical model for predicting wood properties of *Paulownia fortunei*. Part 1: physical and biometrical properties. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(4): 919-930. doi:10.4067/S0718-221X2015005000080
- Huda, A.S.M., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R., Périnet, P. y Fortin, Y. 2018. Phenotypic and Genotypic Correlations for Wood Properties of Hybrid Poplar Clones of Southern Quebec. *Forests*, 9(3): 140-156. doi: 10.3390/f9030140
- Ištok, I., Sedlar, T., Šefc, B., Sinković, T. y Perković, T. 2016. Physical Properties of Wood in Poplar Clones 'I-214' and 'S1-8'. *Drvna industrija*, 67(2): 163-170. doi: 10.5552/drind.2016.1604
- Machuca Velasco, R., Borja de la Rosa, A., Corona Ambriz, A., Zaragoza Hernández, I., Arreola Avila, J. G. y Jiménez Machorro, J. 2017. Xilotecnia of the wood of *Acacia schaffneri* from the State of Hidalgo, Mexico. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(3): 293-308. doi: 10.4067/S0718-221X2017005000025
- Romagnoli, M., Cavalli, D. y Spina, S. 2014. Wood Quality of Chestnut: Relationship between Ring Width, Specific Gravity, and Physical and Mechanical Properties. *BioResources*, 9(1): 1132-1147. doi: 10.15376/biores.9.1.1132-1147
- Silva Guzmán, J. A., Fuentes Talavera, F. J., Rodríguez Anda R., Torres Andrade, P. A., Lomelí Ramírez, M. A., Ramos Quirarte, J., Waitkus, C. y Richter, H. G. 2010. Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. Comisión Nacional Forestal. México. 207 pp.
- Sotomayor Castellanos, J. R. 2015. *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 69 pp.
- Sotomayor Castellanos, J. R. y Ramírez Pérez, M. 2013. Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 9(3): 3-29. <https://www.researchgate.net/>

- Sotomayor Castellanos, J. R. y Ramírez Pérez, M. 2014. Características físicas de 12 maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 10(1): 4-35. <https://www.researchgate.net/>
- Sotomayor Castellanos, J. R., García Mariscal, J. L., Moya Lara, C. E. y Olgún Cerón, J. B. 2010. Higroscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. Higocontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(3): 3-32. <https://www.researchgate.net/>
- Tamarit Urias, J. C. y Fuentes Salinas, M. 2003. Parámetros de humedad de 63 maderas latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 9(2): 155-164.
- Tamarit Urias, J. C. & López Torres, J. L. 2007. *Xilotecología de los principales árboles tropicales de México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. San Martinito. 264 pp.
- Tippner, J., Hrivnák, J. y Kloiber, M. 2016. Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood using Acoustic Methods. *BioResources*, 11(1): 503-518. doi: 10.15376/biores.11.1.503-518