

Características higroscópicas de ocho maderas mexicanas

Javier Ramón Sotomayor-Castellanos, Israel Macedo-Alquicira,
Ernesto Mendoza-González

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
madera999@yahoo.com

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad básica, el contenido de humedad inicial, el máximo contenido de humedad, el punto de saturación de la fibra, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos de ocho maderas mexicanas: Cupressus lindleyi, Cedrela odorata, Swietenia macrophylla, Tabebuia donnell-smithii, Fraxinus uhdei, Fagus mexicana, Dalbergia palo-escrito y Guazuma ulmifolia. La variabilidad de las características higroscópicas de las maderas estudiadas puede explicarse por las diferencias en las particularidades anatómicas propias de cada especie. Sin embargo, sus correlaciones estadísticas, así como sus magnitudes se sitúan en los rangos reportados en la bibliografía.

PALABRAS CLAVE

Variabilidad, hidratado de la madera, secado de la madera, correlaciones estadísticas.

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the basic density, the initial moisture content, the maximum moisture content, the fiber saturation point, the cell wall percentage and the void space percentage of eight Mexican woods: Cupressus lindleyi, Cedrela odorata, Swietenia macrophylla, Tabebuia donnell-smithii, Fraxinus uhdei, Fagus mexicana, Dalbergia palo-escrito and Guazuma ulmifolia. The variability of the hygroscopic characteristics of the woods studied can be explained by the differences in the anatomical characteristics of each species. However, their magnitudes are within the ranges reported in the bibliography.

KEYWORDS

Variability, wood hydration, wood drying, statistical correlations.

INTRODUCCIÓN

La 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 los sistemas adaptativos. ¹

La investigación de la densidad y las características higroscópicas de la madera encuentran aplicación práctica en el diseño de productos y en la concepción de piezas de ingeniería de este material. Otra aplicación 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 los procesos de secado y/o de impregnado de madera.²

El fenómeno de la higroscopía en la madera sólida se observa desde dos escalas: a nivel micro, se estudia la proporción de los componentes químicos fundamentales de la madera que determinan sus propiedades higroscópicas.³ 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.⁴

Las investigaciones sobre el fenómeno de higroscopía están orientadas preferentemente a: 1. Caracterizar la expansión y/o la contracción dimensional de la madera ocasionadas por tratamientos de humidificación y/o de secado;^{5,6} 2. Determinar los parámetros relacionados con la higroscopicidad de la pared celular de la madera, como son el punto de saturación de la fibra, el máximo contenido de humedad que puede contener la madera, las proporciones de la pared celular y de los espacios vacíos del tejido celular;^{2,7,8} 3. Mejorar la estabilización dimensional de la madera por tratamientos químicos,⁹⁻¹¹ térmicos^{12,13} y mecánicos;^{1,14-16} 4. Identificar caracteres intrínsecos de la madera como factor de variación dimensional;^{3,17,18} y 5. Estudiar su estructura anatómica^{19,20} y su composición química^{21,22} como agentes que afectan el fenómeno de higroscopía.

La información sobre las características higroscópicas de maderas endémicas de México está recopilada por Tamarit y Fuentes,² Tamarit y López,²³ Silva²⁴ y Bárcenas.²⁵ Debido a la biodiversidad en las características anatómicas entre especies y a las particularidades en los procedimientos experimentales utilizados, la bibliografía reporta una amplia variedad en las magnitudes de los parámetros calculados. Con excepción de Torelli y Gorišek^{26,27} quienes retoman los datos del Estudio promocional de 43 especies de la Selva Lacandona, realizado en 1980 [Anexo] y publicado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1982),²⁸ no hay un estudio intensivo de las características higroscópicas medibles durante procesos controlados de humidificación y secado. Así, parece razonable la caracterización de su comportamiento higroscópico desde un enfoque de análisis especie por especie y la síntesis integral de resultados obtenidos en condiciones experimentales similares.

El objetivo de la investigación fue determinar las características higroscópicas de ocho maderas mexicanas: *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King, *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh, *Fagus mexicana* Martínez, *Dalbergia palo-escrito* Rzed. & Guridi-Gómez y *Guazuma ulmifolia* Lam. Algunas de estas características de las especies en estudio están reportadas en investigaciones anteriores. Con todo, los resultados de la presente investigación son originales e inéditos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental proviene del banco de maderas que forma parte del programa de caracterización física y mecánica de especies mexicanas, del Laboratorio de Mecánica de la Madera, en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento (temperatura de 20 °C ± 1 °C; humedad relativa del aire de 65 % ± 5%) hasta que su peso fue constante. Para cada una de las especies, se recortaron 18 probetas con dimensiones de 0.02 m × 0.02 m × 0.06 m alineados en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) respectivamente.

Las pruebas de higroscopía consistieron en las siguientes etapas: 1. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado de humedad inicial de la madera; 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. La figura 1 ilustra el contenido de humedad en los diferentes estados de la madera en función del tiempo de hidratado y de secado. La tabla I presenta las ecuaciones utilizadas y los símbolos utilizados para calcular los parámetros estudiados.

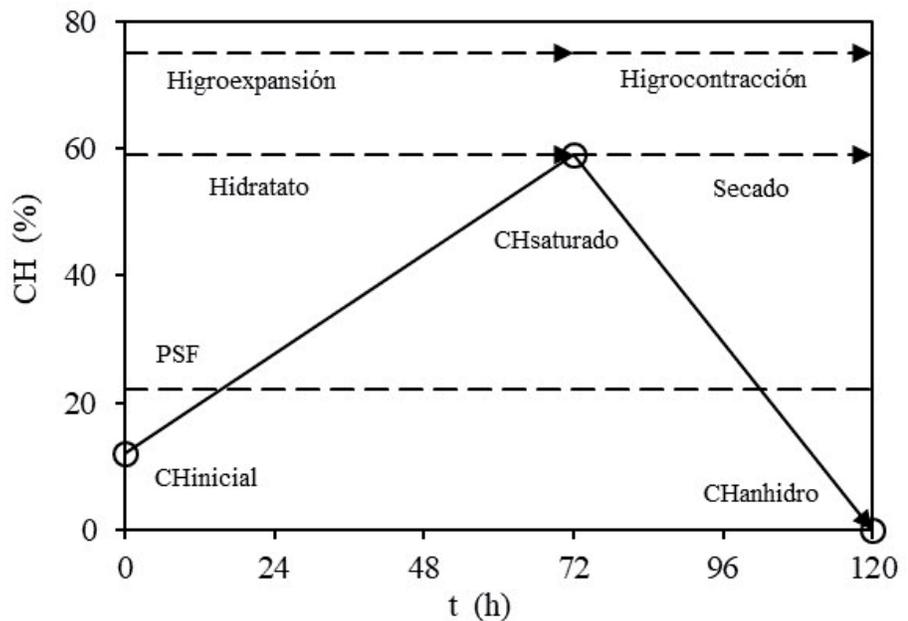


Fig 1. Contenido de humedad (CH) en función del tiempo en las pruebas de higroscopía.

Tabla I. Parámetros, ecuaciones y símbolos utilizados.

Ecuaciones	No.	Referencias
$CH_{ini} = ((P_{ini} - P_{anhidro})/P_{anhidro}) \times 100$	(1)	29
$\rho_0 = P_{anhidro}/V_{sat}$	(2)	30
$MCH = ((1530 - \rho_0)/(1530 \times \rho_0)) \times 100$	(3)	2
$PC = (\rho_0/1530) \times 100$	(4)	2
$EV = (1 - \rho_0/1530) \times 100$	(5)	2
$PSF = ((V_{sat} - V_{anhidro})/V_{sat}) \times (100/0.9 \times \rho_0)$	(6)	7
Símbolos	Subíndices	
CH = Contenido de humedad (%)	ini = Estado de humedad inicial	
ρ_0 = Densidad básica ($kg\ m^{-3}$)	anhidro = Estado de humedad anhidro	
P = Peso (kg)	sat = Estado de humedad saturado	
V = Volumen (m^3)	Nota: el valor constante de 1530 ($kg\ m^{-3}$) en las ecuaciones (4) y (5) es el de la gravedad específica de la sustancia madera. ²	
MCH = Máximo contenido de humedad (%)		
PC = Porcentaje de pared celular (%)		
EV = Porcentaje de espacios vacíos (%)		
PSF = Punto de saturación de la fibra (%)		

DISEÑO EXPERIMENTAL

La unidad experimental consistió en madera de ocho especies: *C. lindleyi*, *C. odorata*, *S. macrophylla*, *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. mexicana*, *D. paloescrito* y *G. ulmifolia*. La estrategia experimental se orientó hacia la comparación de resultados especie por especie, la cual se consideró el factor de variación clasificado en ocho niveles. Se evaluaron 18 réplicas (probetas) de cada una de ellas. Así, se estudiaron 144 probetas agrupadas en ocho muestras independientes. Las variables de respuesta fueron: contenido de humedad inicial (ecuación 1), densidad básica (ecuación 2), máximo contenido de humedad (ecuación 3), punto de saturación de la fibra (ecuación 4), porcentaje de pared celular (ecuación 5) y porcentaje de espacios vacíos (ecuación 6). Para cada muestra se determinaron su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma / \mu$).

Para verificar la homogeneidad en las variables densidad básica y contenido de humedad correspondiente al estado inicial de la madera, se realizaron pruebas de normalidad en las distribuciones de sus datos. El criterio de demarcación para aceptar normalidad fueron valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo [-2, +2]. Asimismo, se realizaron pruebas de verificación (Ver-var) y análisis de varianza (Anova). Se verificó la hipótesis nula $H_0: \mu_1 + \mu_2 = 0$, donde μ_1 y μ_2 representan las medias de las muestras y se contrastó con la hipótesis alterna $H_1: \mu_1 + \mu_2 \neq 0$. Se realizaron pruebas de rangos múltiples con el criterio de no aceptar diferencias estadísticamente significativas entre niveles (especies) que compartan una misma columna de X.

Todas las pruebas estadísticas se efectuaron para un nivel de confianza de 95 %. Así, el criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente

significativa fue un valor de $P(\alpha = 0.05) < 0.05$. Se evaluaron correlaciones lineales ($y = ax \pm b$) y potencia ($y = ax^b$) y se determinaron los coeficientes de determinación (R^2) de las variables de respuesta en función de la densidad básica. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación propuestos por Tippner *et al.*³¹ 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: $R^2 < 0.2$. Por último, los resultados de esta investigación se compararon con datos de la bibliografía adaptados de Torelli y Gorišek.^{26, 27}

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de humedad

Para las ocho maderas, los valores promedio del contenido de humedad inicial fluctuaron entre un mínimo de 8.1 % (*D. palo-escrito*) y un máximo de 9.7 % (*F. mexicana*) y su variación entre especies refleja un coeficiente de variación del 6 % (tabla II). Al interior de cada especie, el contenido de humedad varió desde 6 % (*F. mexicana*) hasta 17 % (*T. donnell-smithii*) (tabla III). Por su parte, los valores del sesgo y apuntamiento estandarizados, obtenidos de las pruebas de normalidad en las muestras homogéneas de 18 probetas cada una, se ubican al interior del intervalo que satisface el criterio de demarcación [-2 - +2], lo que permite considerar que estos resultados corresponden a distribuciones normales. Asimismo, las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para todas las especies. Estos resultados sugieren que el contenido de humedad inicial fue homogéneo en las probetas y no interviene de manera significativa en el análisis subsiguiente. El contenido de humedad inicial es calculado con la ecuación (1) a partir de mediciones directas del peso inicial y el peso en estado anhidro (figura 1).

Tabla II. Densidad básica y características higroscópicas.

Especies	ρ_0 (kg m ⁻³)	CH _{ini} (%)	PSF (%)	MCH (%)	PC (%)	EV (%)
<i>Cupressus lindleyi</i>	388	8.7	20	194	25	75
<i>Cedrela odorata</i>	439	8.9	25	171	29	71
<i>Swietenia macrophylla</i>	460	8.7	20	153	30	70
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	522	8.4	21	127	34	66
<i>Fraxinus uhdei</i>	528	9.5	20	125	35	65
<i>Fagus mexicana</i>	515	9.7	27	129	34	66
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	537	8.1	16	124	35	65
<i>Guazuma ulmifolia</i>	573	9.0	27	110	37	63
μ	495	9.0	22	142	32	68
CV	(12)	(6)	(18)	(20)	(12)	(6)

ρ_0 = Densidad básica; CH_{ini} = Contenido de humedad inicial; CHmax = Contenido de humedad máximo experimental; MCH = Máximo contenido de humedad; PSF = Punto de saturación de la fibra; PC = Porcentaje de pared celular; EV = Porcentaje de espacios vacíos; μ = Media; CV = Coeficiente de variación en porcentaje y entre paréntesis.

El contenido de humedad de la madera en su estado saturado medido experimentalmente después de 72 horas de hidratado (fig. 1) indica un valor promedio de 59 % con un coeficiente de variación de 20 % y con un mínimo de 42 % para *S. macrophylla* y un máximo de 81 % para *C. lindleyi* (tabla II). Estos resultados son semejantes a los reportados por Shukla y Kandem ³² para nueve maderas hidratadas durante 48 horas. Sus datos indican un contenido de humedad promedio de 50 % con un coeficiente de variación de 30 % para especies con densidades básicas que van desde 448 kg m⁻³ hasta 950 kg m⁻³. Estos resultados sugieren que el tiempo de hidratado de 72 horas de esta investigación fue suficiente para alcanzar contenidos de humedad en estado saturado superiores a los puntos de saturación de la fibra y suficientes para alcanzar la máxima expansión.

Tabla III. Coeficiente de variación (entre paréntesis) para el contenido de humedad y la densidad básica, sesgo estandarizado, apuntamiento estandarizado y grupos homogéneos de las muestras observadas.

	CV	SE*	AE*	Grupos Homogéneos#			
Especies	(%)	[-2 - +2]	[-2 - +2]				
Contenido de humedad (CH)							
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	(10)	-1.631	0.836	X			
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	(17)	-1.747	1.951	X	X		
<i>Cupressus lindleyi</i>	(7)	1.675	0.644	X	X		
<i>Swietenia macrophylla</i>	(8)	0.193	-0.656	X	X		
<i>Cedrela odorata</i>	(9)	1.995	1.459		X		
<i>Guazuma ulmifolia</i>	(11)	1.110	1.275		X	X	
<i>Fraxinus uhdei</i>	(14)	-1.513	-0.035			X	X
<i>Fagus mexicana</i>	(6)	1.885	0.436				X
Densidad básica (ρ_0)							
<i>Cupressus lindleyi</i>	(7)	-0.449	-0.914	X			
<i>Cedrela odorata</i>	(19)	-0.663	-0.697		X		
<i>Swietenia macrophylla</i>	(7)	-0.156	-1.177		X		
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	(5)	-0.576	-0.063			X	
<i>Fraxinus uhdei</i>	(6)	-0.007	-1.401			X	
<i>Fagus mexicana</i>	(4)	1.467	-0.683			X	
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	(13)	0.384	0.084			X	
<i>Guazuma ulmifolia</i>	(7)	-0.038	-0.728				X

* Se acepta normalidad en la distribución de las muestras para valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo [-2, +2]; # No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellas especies que comparten una misma columna de X.

Densidad básica

Las magnitudes promedio de la densidad básica de la madera para cada una de las especies variaron en el intervalo que va desde 388 kg m⁻³ (*C. lindleyi*) hasta 573 kg m⁻³ (*G. ulmifolia*) (tabla II) y muestran un coeficiente de variación entre especies de 12 %. En comparación con los datos reportados por Torelli y Gorišek^{26, 27} con un rango que va desde un mínimo de 317 kg m⁻³ (*S. parahibum*) hasta un máximo de 1060 kg m⁻³ (*Q. skinneri*) (Anexo), la amplitud del intervalo de valores de la densidad básica de la presente investigación es menor. Sin embargo, el coeficiente de variación de 22 % es solamente 4 % menor al calculado para los datos bibliográficos mencionados, el cual es de 26 %.

Los coeficientes de variación, que representan la variabilidad al interior de cada especie, van desde un mínimo de 4 % (*F. mexicana*) hasta un máximo de 19 % (*C. odorata*). Asimismo, las pruebas de normalidad en las muestras homogéneas de 18 probetas cada una indican distribuciones normales (tabla III). Las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para *C. odorata* y *S. macrophylla* y para *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. mexicana* y *D. palo-escrito*. En este mismo sentido, Sotomayor y Ramírez³³, a partir del análisis de una base de datos de las características higroscópicas de 134 especies mexicanas, así como De Almeida *et al.*³⁴ en su estudio de 15 maderas brasileñas, perciben incompleto el enfoque tradicional de calificar la calidad de una especie o las características de una madera, únicamente en relación con su densidad básica.

Punto de saturación de la fibra

El valor promedio del punto de saturación de la fibra (ecuación 6) de las ocho especies investigadas en esta investigación (tabla II) es 4 % menor que el publicado por Torelli y Gorišek^{26, 27}, el cual es de 26 %. Además, su coeficiente de variación es 8 % menor respecto al calculado para las 43 especies de referencia que es de 26 %. Asimismo, en la presente investigación, la correlación del punto de saturación de la fibra, en función de la densidad básica, indica un coeficiente de determinación bajo, calculado con un estrecho intervalo de densidades básicas para ocho especies. En cambio, el coeficiente de determinación de las maderas referidas de la bibliografía califica como medio para un amplio espectro de densidades básicas de 43 especies (figura 2). Por razones de escala en esta figura y en las siguientes no se visualizan todos los puntos analizados.

Estos resultados coinciden con los de De Almeida *et al.*³⁵ quienes reportan un coeficiente de determinación nulo de 0.09 entre el punto de saturación de la fibra y la densidad básica para 15 maderas brasileñas. No obstante, los resultados de la presente investigación van en sentido diferente a los de Hernández⁸ quien reporta un coeficiente de determinación alto de 0.82, derivado de una regresión lineal con tendencia negativa entre el punto de saturación de la fibra y la densidad básica para nueve especies de Perú.

En relación con estudios de grupos de maderas mexicanas, Bárcenas³⁶ reporta para especies de la Selva Lacandona valores del punto de saturación de la fibra que van desde un mínimo de 20 % (*Astronium graveolens*) hasta un máximo de 33 % (*Schizolobium parahibum*), todo esto para maderas con densidades básicas desde 300 kg m⁻³ (*Schizolobium parahibum*) hasta 860 kg m⁻³ (*Manilkara zapota*). Sus datos correlacionan linealmente con una tendencia negativa $PSF = -0.0163 \rho_0 + 34.8$

y un bajo coeficiente de 0.33. En el mismo contexto, Fuentes ⁷ utiliza datos de diez especies publicados por Bárcenas ³⁶ y ajusta los valores del punto de saturación de la fibra para calcular una correlación lineal con tendencia negativa $PSF = -0.0265 \rho_0 + 42.4$ con un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0.47$. Por su parte, Tamarit y Fuentes ² analizan datos publicados para especies mexicanas por Bárcenas ³⁷ y Fuentes. ⁷ La correlación lineal calculada con sus datos indica una tendencia negativa $PSF = -0.025 \rho_0 + 39.9$ con un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0.47$. Sotomayor y Ramírez ³³ publicaron una base de datos de características higroscópicas de la madera que contiene datos del punto de saturación de la fibra de 134 especies. En el mismo contexto, el análisis de correlación lineal de los datos de Sotomayor y Ramírez ³⁸ indican una tendencia negativa $PSF = -0.0253 \rho_0 + 34.5$ con un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0.47$ para 12 maderas mexicanas.

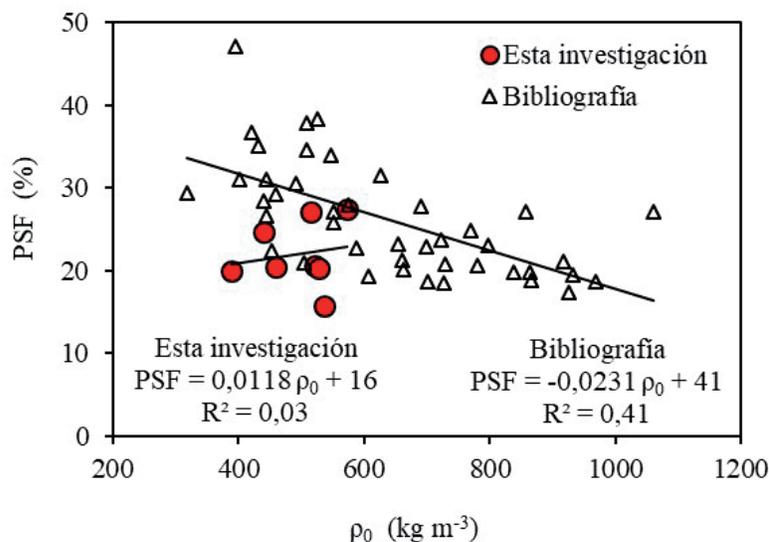


Fig. 2. Correlaciones entre del punto de saturación de la fibra y la densidad básica.

En estudios puntuales de especies mexicanas, Sotomayor y Ramírez ³⁹ publican valores del punto de saturación de la fibra para *Lysiloma spp.* ($\rho_0 = 593 \text{ kg m}^{-3}$) de 25%; por su parte, Sotomayor ⁴⁰ reporta para *Gyrocarpus americanus* ($\rho_0 = 334 \text{ kg m}^{-3}$) un punto de saturación de la fibra de 31 %; y más recientemente, Sotomayor *et al.* ⁴¹ informan del punto de saturación de la fibra para *Enterolobium cyclocarpum* ($\rho_0 = 407 \text{ kg m}^{-3}$) de 23 %, para *C. lindleyi* ($\rho_0 = 438 \text{ kg m}^{-3}$) de 21 % y para *C. odorata* ($\rho_0 = 441 \text{ kg m}^{-3}$) de 24 %, valores para estas dos últimas especies similares a los de esta investigación.

La discrepancia en las magnitudes y tendencias estadísticas de los datos publicados es frecuente en investigación en ciencias de la madera. Resultado que muestra la variabilidad natural de las propiedades higroscópicas entre y al interior de una misma especie, originada por la variedad en su estructura anatómica. ⁴² Sin embargo, las correlaciones indican un decremento del punto de saturación de la fibra a medida que la densidad básica de la madera aumenta, con coeficientes de determinación calificados como medios.

Máximo contenido de humedad

El máximo contenido de humedad varía desde un mínimo de 110 % (*G. ulmifolia*) hasta un máximo de 194 % (*C. lindleyi*) (tabla II). El coeficiente de variación entre especies es similar al del punto de saturación de la fibra de las ocho especies estudiadas. A medida que la densidad básica de la madera aumenta, disminuye su capacidad para contener humedad. Este parámetro está calculado con la ecuación (3) que depende de las mediciones de la relación peso anhidro/volumen saturado y está fundamentado en la propuesta de Tamarit y Fuentes² acerca de las relaciones teóricas entre la cantidad de materia presente en un volumen de material poroso como lo es la madera. De tal suerte, a medida que aumenta la densidad básica, disminuye la porosidad y el contenido de humedad máximo disminuye. Este argumento se cuantifica con la correlación potencial entre el máximo contenido de humedad y la densidad básica de la madera (figura 3).

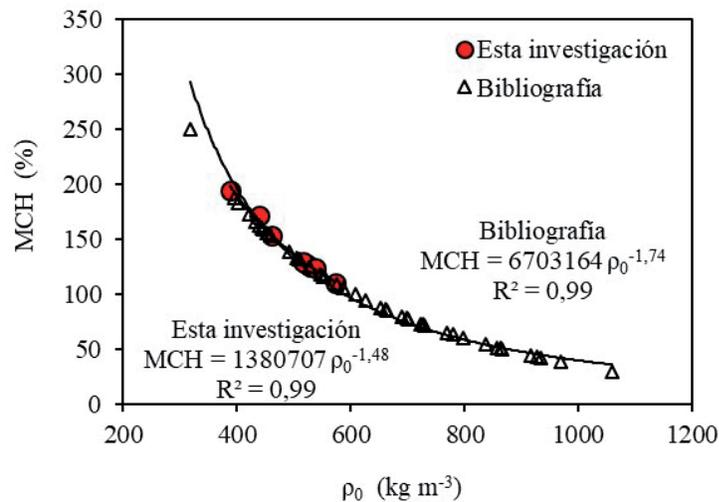


Fig. 3. Correlaciones entre el máximo contenido de humedad y la densidad básica.

En el mismo contexto, la correlación potencial de la presente investigación es similar a la calculada con los datos de Torelli y Gorišek^{26,27} (figura 3). Además, sigue la misma tendencia estadística de Tamarit y Fuentes² quienes analizan datos publicados para especies mexicanas por Bárcenas³⁷ y Fuentes.⁷ La correlación potencial calculada con estos datos indica una tendencia negativa $MCH = 46252560 \rho_0^{-2.10}$ con un coeficiente de determinación muy alto $R^2 = 0.93$.

Porcentaje de pared celular y espacios vacíos

Las magnitudes promedio del porcentaje de pared celular (ecuación 4) variaron en el intervalo que va desde un mínimo de 25 % (*C. lindleyi*) hasta un máximo de 37 % (*G. ulmifolia*). Como complemento al 100 % de un volumen elemental de materia, el porcentaje de espacios vacíos (ecuación 5) es inversamente proporcional al valor del porcentaje de pared celular (tabla II). Esto es también cierto para los valores promedio de las ocho especies. Sin embargo, el coeficiente de variación del porcentaje de pared celular es el doble respecto al del porcentaje de espacios vacíos. El porcentaje de espacios vacíos es equivalente a la porosidad.³²

Así, se confirma que la madera absorbe más humedad a medida que es más porosa para las maderas *C. lindleyi*, *C. odorata* y *S. macrophylla*,² pero no para las otras cinco especies.

Las correlaciones lineales entre los porcentos de pared celular y de espacios vacíos en función de la densidad básica, calculados con las ecuaciones (4) y (5), así como los derivados del análisis de Torelli y Gorišek²⁷ y Tamarit y Fuentes² resultan en modelos similares y con coeficientes de determinación muy altos (figuras 4 y 5). Para el caso del porcentaje de pared celular, este aumenta a medida que la densidad básica incrementa (figura 4). Lo opuesto se observa para el porcentaje de espacios vacíos (figura 5).

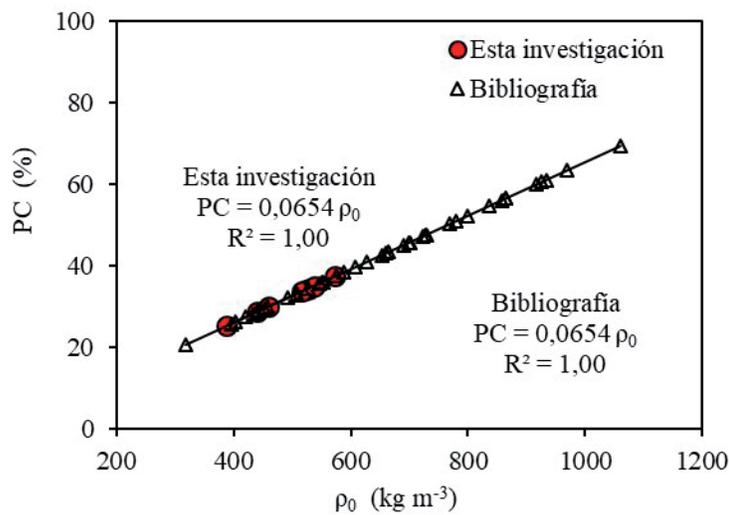


Fig. 4. Correlaciones entre porcentaje de pared celular y densidad básica.

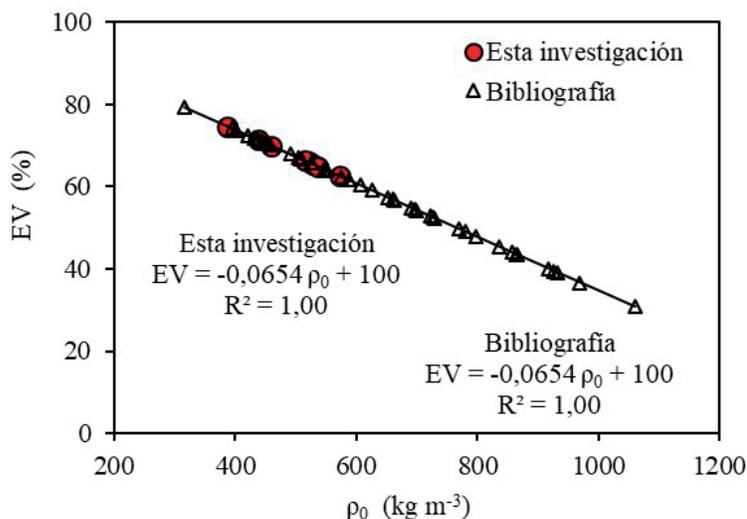


Fig. 5. Correlaciones entre porcentaje de espacio vacío y densidad básica.

A mayor magnitud de los espacios vacíos (EV), mayor será la porosidad del material. En consecuencia, es mayor la velocidad de hidratado y menor la dificultad para aplicar tratamientos de secado y de impregnación con sustancias de protección. El volumen de espacio vacío interno por unidad de volumen externo que caracteriza a cada especie de madera, predice el volumen máximo de solución preservante que es capaz de absorber. Conociendo esto, se puede variar la concentración de la solución preservante para que se logren los niveles de retención óptimos, siguiendo a Tamarit y Fuentes.²

CONCLUSIONES

La magnitud de las características higroscópicas de las maderas *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* y *Guazuma ulmifolia* es similar a las de otras especies mexicanas reportadas en la literatura.

Los modelos estadísticos permiten predecir el máximo contenido de humedad, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos en función de la densidad básica de la madera.

La estrategia experimental se orientó hacia el análisis de resultados especie por especie. De acuerdo con el paradigma contemporáneo en ciencias de la madera, es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera, y con datos derivados de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. Una vez teniendo observaciones integrantes y estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico, y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar.

REFERENCIAS

1. Abdelmohsen, S., Adriaenssens, S., El-Dabaa, R., Gabriele, S., Olivieri, L., & Teresi, L. (2019). A multi-physics approach for modeling hygroscopic behavior in wood low-tech architectural adaptive systems. *Computer-Aided Design*, 106, 43-53.
2. Tamarit Urias, J. C., & 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.
3. Berry, S. L., & Roderick, M. L. (2005). Plant-water relations and the fibre saturation point. *New Phytologist*, 168, 25-37.
4. De Almeida, G., Huber, F., Perré, P. (2014). Free shrinkage of wood determined at the cellular level using an environmental scanning electron microscope. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(2), 187-198.
5. Hamid, N. H. A., Ahmad, M., & Suratman, M. N. (2011). Swelling and Shrinkage Characteristics of Kapur (*Dryobalanops aromatica*) Wood in Three Anatomical Directions. 2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA). Langkawi, Malaysia: IEEE. pp. 98-101.

6. Ajuziogu, G. C., Amujiri, A. N., Njoku, E. U., Ozokolie, C. B., & Ojua, E. O. (2020). Determination of Swelling and Dimensional Stability of Some Nigerian Timber Species. *Annual Research & Review in Biology*, 35(1), 24-29.
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.
8. Hernández, R. E. (2007b). Effects of extraneous substances, wood density and interlocked grain on fiber saturation point of hardwoods. *Wood Material Science and Engineering*, 2(1), 45-53.
9. Herrera-Builes, J. F., Ananías, R. A., & Osorio, J. A. (2020). Incidencia de la impregnación de madera con alcohol polivinílico y polietilenglicol en algunas propiedades físicas y mecánicas de pino oocarpa. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(2), 213- 222.
10. Liu, M., Xu, G., Wang, J., Wu, Z., Lv, J., & Xu, W. (2020). Effects of Shellac Treatment on Wood Hygroscopicity, Dimensional Stability and Thermostability. *Coatings*, 10, 881.
11. Németh, R., Horváth, N., Fodor, F., Báder, M., & Bak, M. (2020). Wood Modification for Under-Utilized Hardwood Species. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 505, 012017.
12. Schneid, E., Gonzalez de Cademartori, P. E., & Gatto, D. (2014). The effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of *Luehea divaricata* hardwood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(4), 413-422.
13. Schorr, D., & Blanchet, P. (2020). Improvement of White Spruce Wood Dimensional Stability by Organosilanes Sol-Gel Impregnation and Heat Treatment. *Materials*, 13(4), 973-987.
14. Fang, C. H., Cloutier, A., Blanchet, P., Koubaa, A., & Mariotti, N. (2011). Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part I: dimensional stability. *BioResources*, 6(1), 373-385.
15. Laine, K., Belt, T., Rautkari, L., Ramsay, J., Hill, C. A. S., & Hughes, M. (2013). Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood. *Journal of Materials Science*, 48, 8530-8538.
16. El-Dabaa, R., & Abdelmoshen, S. (2019). HMTM: Hygromorphic-Thermobimetal Composites as a Novel Approach to Enhance Passive Actuation of Adaptive Façades. 18th International Conference, CAAD Futures 2019, Proceedings. Daejeon, Korea: Springer. pp. 567- 577.
17. Engelund, E. T., Thygesen, L. G., Svensson, S., & Hill, C. A. S. (2013). A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Science and Technology*, 47(1), 141-161.
18. Ávila, L. E., & Herrera, M. A. (2012). Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Bosque*, 33(2), 227-232.
19. Nakano, T. (2003). Effects of Cell Structure on Water Sorption for Wood. *Holzforschung*, 57, 213-218.

20. Ištok, I., Sedlar, T., Šefc, B., Sinkovi, T., & Perkovi, T. (2016). Physical Properties of Wood in Poplar Clones 'I-214' and 'S1-8'. *Drvna Industrija*, 67(2), 163-170.
21. Hernández, R. E. (2007a). Swelling properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density, and interlocked grain. *Wood and Fiber Science*, 39(1), 146-158.
22. Sahin, H. T. (2010). Experimental determination of the anisotropic swelling and water sorption properties of chestnut wood. *Wood Research*, 55(1), 33-40.
23. Tamarit Urias, J. C. & López Torres, J. L. (2007). *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*. Puebla: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
24. Silva Guzmán, J. A., Fuentes Talavera, F. J., Rodríguez Anda R., Torres Andrade, P. A., Lomelí Ramírez, M. A., Ramos Quirarte, J., Waitkus, C., & Richter, H. G. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. México: Comisión Nacional Forestal.
25. Bárcenas Pazos, G. M. (2020). Banco de información sobre características tecnológicas de maderas mexicanas. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO). México: Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.
26. Torelli, N., & Gorišek, Ž. (1995a). Mexican tropical hardwoods. Dimensional stability. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 53, 277-280.
27. Torelli, N., & Gorišek, Ž. (1995b). Mexican tropical hardwoods. Stepwise shrinkage and transverse shrinkage anisotropy. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 53, 155-157.
28. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1982). Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas. Programa de Cooperación Científica y Técnica, México-Yugoslavia: SARH. SFF.
29. Chiniforush, A. A., Akbarnezhad, A., Valipour, H., & Malekmohammadi, S. (2019). Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 207, 70-83.
30. Koman, S., & Feher, S. (2015). Basic density of hardwoods depending on age and site. *Wood Research*, 60(6), 907-912.
31. Tippner, J., Hrivnák, J. & Kloiber, M. (2016). Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood using Acoustic Methods. *BioResources*, 11(1), 503-518.
32. Shukla, S. R., & Kandem, D. P. (2010). Dimensional stability of nine tropical hardwoods from Cameroon. *Journal of Tropical Forest Science*. 22(4), 389-396.
33. Sotomayor Castellanos, J. R., & 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.
34. De Almeida, T., De Almeida, D. H., De Araujo, V. A., Da Silva, S. A. M., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2017). Density as Estimator of Dimensional Stability Quantities of Brazilian Tropical Woods. *BioResources*, 12(3), 6579-6590.

35. De Almeida, T. H., De Almeida, D. H., Aquino, V. B. M., Chahud, E., Pinheiro, R. V., Branco, L. A. M. N., De Almeida, J. P. B., Christoforo, A. L. & Lahr, F. A. R. (2020). Investigation of the Fiber Saturation Point of Tropical Brazilian Wood Species. *BioResources*, 15(3), 5379-5387.
36. Bárcenas Pazos, G. M. (1995). Caracterización tecnológica de veinte especies maderables de la Selva Lacandona. *Madera y Bosques*, 1(1), 9-38.
37. Bárcenas Pazos, G. M. (1985). Recomendaciones del uso de 80 especies de acuerdo con su estabilidad dimensional. Nota Técnica no.11. Xalapa: LACITEMA-INIREB.
38. Sotomayor Castellanos, J. R., & Ramírez Pérez, M. (2014a). Características físicas de 12 maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 10(1), 4-35.
39. Sotomayor Castellanos, J. R., & Ramírez Pérez, M. (2014b). Caracterización físico-mecánica e indicadores de calidad de la madera de *Lysiloma* spp. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 10(3), 4-65.
40. Sotomayor Castellanos, J. R. (2017). Densificado higro-termo-mecánico de madera de *Gyrocarpus americanus*. Pruebas de higroscopía. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 13(2), 4-21.
41. Sotomayor Castellanos, J. R., Tinoco Campos, L. M., & Raya González, D. (2020). Características higroscópicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum*, *Cupressus lindleyi* y *Cedrela odorata*. *Ciencia Nicolaita*, 79(1), 75-93.
42. Sargent, R. (2019). Evaluating dimensional stability in solid wood: a review of current practice. *Journal of Wood Science*, 65, 36-47.1

ANEXO

Densidad básica, máximo contenido de humedad, porcentaje de pared celular, porcentaje de espacios vacíos y punto de saturación de la fibra de 43 especies mexicanas adaptados de Torelli y Gorišek.^{26,27} (de *Alchornea latifolia* a *Dialium guianense*).

Especies	ρ_0 (kg m ⁻³)	Características higroscópicas			
		MCH	PC	EV	PSF
		(%)			
<i>Alchornea latifolia</i>	402	183	26	74	31
<i>Ampelocera hottlei</i>	690	80	45	55	28
<i>Aspidosperma megalocarpum</i>	798	60	52	48	23
<i>Blepharidium mexicanum</i>	626	94	41	59	31
<i>Brosimum allicastrum</i>	865	50	57	43	19
<i>Bursera simaruba</i>	452	156	30	70	22
<i>Calophyllum brasiliense</i>	575	109	38	62	28
<i>Cordia alliodora</i>	552	116	36	64	27
<i>Cymbopetalum penduliflorum</i>	395	188	26	74	47
<i>Dendropanax arboreus</i>	421	172	28	72	37
<i>Dialium guianense</i>	917	44	60	40	21

ANEXO (CONTINUACIÓN)

Densidad básica, máximo contenido de humedad, porcentaje de pared celular, porcentaje de espacios vacíos y punto de saturación de la fibra de 43 especies mexicanas adaptados de Torelli y Gorišek.^{26,27} (de *Dipholis stevensonii* a *Zuelania guidonia*).

Especies	ρ_0 (kg m ⁻³)	Características higroscópicas			
		MCH	PC	EV	PSF
		(%)			
<i>Dipholis stevensonii</i>	969	38	63	37	19
<i>Guarea glabra</i>	587	105	38	62	23
<i>Guatteria anomala</i>	432	166	28	72	35
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	837	54	55	45	20
<i>Lonchocarpus hondurensis</i>	729	72	48	52	21
<i>Manilkara zapota</i>	926	43	61	39	17
<i>Misanteca pekii</i>	653	88	43	57	23
<i>Nectandra sp.</i>	508	131	33	67	35
<i>Pachica acuática</i>	526	125	34	66	38
<i>Pithecellobium arboreum</i>	700	77	46	54	19
<i>Pithecellobium leucocalix</i>	505	133	33	67	21
<i>Platymiscium yucatanum</i>	727	72	48	52	18
<i>Poulsenia armata</i>	445	159	29	71	31
<i>Pseudobombax ellipticum</i>	444	160	29	71	27
<i>Pseudolmedia oxyphyllaria</i>	723	73	47	53	24
<i>Pterocarpus hayesii</i>	508	131	33	67	38
<i>Quercus anglohondurensis</i>	857	51	56	44	27
<i>Quercus skinneri</i>	1060	29	69	31	27
<i>Schizolobium parahibum</i>	317	250	21	79	29
<i>Sebastiana longicuspis</i>	607	99	40	60	19
<i>Sickingia salvadorensis</i>	769	65	50	50	25
<i>Simarouba glauca</i>	439	162	29	71	28
<i>Spondias mombin</i>	491	138	32	68	31
<i>Swartzia cubensis</i>	933	42	61	39	20
<i>Sweetia panamensis</i>	864	50	56	44	20
<i>Swietenia macrophylla</i>	458	153	30	70	29
<i>Talauma mexicana</i>	551	116	36	64	26
<i>Terminalia amazonia</i>	663	85	43	57	20
<i>Vatairea lundelli</i>	780	63	51	49	21
<i>Vitex gaumeri</i>	660	86	43	57	21
<i>Vochysia hondurensis</i>	547	117	36	64	34
<i>Zuelania guidonia</i>	698	78	46	54	23

ρ_0 = Densidad básica; CH = Contenido de humedad inicial; MCH = Máximo contenido de humedad; PC = Porcentaje de pared celular; EV = Porcentaje de espacios vacíos; PSF = Punto de saturación de la fibra.