

# Anisotropía del módulo de elasticidad y de resistencia en compresión de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*

Anisotropy of the modulus of elasticity and strength by compression of *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* and *Pinus pringlei* wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos\*, Mariana Ramírez Pérez\*

## RESUMEN

El carácter anisotrópico de la madera le confiere versatilidad para el diseño de productos y estructuras. El objetivo de esta investigación fue determinar el módulo de elasticidad y resistencia en compresión en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*. Se realizaron ensayos de compresión en 39 probetas y se determinó su contenido de humedad y su densidad básica. Para cada una de las especies, los resultados del análisis de varianza entre las direcciones radial, tangencial y longitudinal del módulo de elasticidad y de resistencia en compresión indicaron una diferencia significativa entre las medias de los valores de las tres direcciones para los parámetros elásticos y resistentes. Estos resultados confirman que las propiedades elásticas y mecánicas de la madera varían según la dirección en que se miden, verificando el carácter anisotrópico del material.

## ABSTRACT

The anisotropy feature of wood confers versatility for designing products and wood structures. The objective of this research was to determine the modulus of elasticity and strength by compression on the radial, tangential and longitudinal directions, for *P. Michoacana*, *P. pringlei* and *P. douglasiana* wood. Compression tests were performed on 39 specimens and wood moisture content and basic density were calculated. For each of the species studied, the results of an analysis of variance between radial, tangential and longitudinal directions of modulus of elasticity and strength by compression, suggest a significant difference between the mean values of the three variables grouped into elastic and strength parameters. These results confirm that the elastic and mechanical properties of wood vary according to the direction in which they are measured, verifying the anisotropy feature of the material.

Recibido: 25 de mayo de 2014

Aceptado: 22 de julio de 2014

### Palabras clave:

Densidad; dirección radial; dirección tangencial; dirección longitudinal; anisotropía.

### Keywords:

Density; radial direction; tangential direction; longitudinal direction; anisotropy.

### Cómo citar:

Sotomayor Castellanos, J. R. & Ramírez Pérez, M. (2014). Anisotropía del módulo de elasticidad y de resistencia en compresión de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. *Acta Universitaria*, 24(5), 3-12. doi: 10.15174.au.2014.624

## INTRODUCCIÓN

La magnitud del módulo de elasticidad y de la resistencia mecánica de la madera varía según las direcciones radial, tangencial y longitudinal, debido a que la madera es un material anisotrópico (Mascia & Vanalli, 2012). En el caso de una pieza de madera aserrada, estas direcciones son referidas al fuste del tronco de un árbol que puede ser modelado como un cilindro. Esta propiedad le confiere a la madera una versatilidad para el diseño de productos no estructurales (muebles e instrumentos musicales) y estructurales (columnas, vigas, etcétera), donde la colocación relativa de los elementos anatómicos de la madera, en diferentes combinaciones con sus direcciones de anisotropía, juegan un papel importante para resistir sollicitaciones de compresión (Breyer, Fridley, Pollock & Cobeen, 2003).

\* Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Múgica s/n, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58030. Tel.: y fax: (443)3223500. Correo electrónico: madera999@yahoo.com; mbc7a@yahoo.com

Los esfuerzos de compresión también están presentes durante los procesos tecnológicos de transformación de la madera, tales como el de secado y el de impregnado, así como en la fabricación de tableros aglomerados y contrachapados. Por otra parte, el desarrollo tecnológico reciente en la industria de productos compuestos de madera demanda información sobre sus características mecánicas en diferentes direcciones.

El conocimiento del módulo de elasticidad y de la resistencia en compresión en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera es útil para el diseño basado en la confiabilidad estructural (Dávalos, 1996). Igualmente, es necesario para diseñar y calcular estructuras (Comisión Forestal de América del Norte, 1994), y permite aplicar el método de los elementos finitos para obtener las solicitaciones en cualquier punto de un elemento o componente (Macckerle, 2005; Vasic, Smith & Landis, 2005).

Para determinar las propiedades elásticas y mecánicas en las direcciones principales de la madera, usualmente se realizan ensayos de compresión en pequeñas probetas orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, y libres de particularidades de crecimiento, tales como nudos y/o desviación de la fibra. Estos experimentos están establecidos en normas, como la *American Society for Testing and Materials International* (ASTM) D143-09 (ASTM International, 2009) y la *International Organization for Standardization* (ISO) 3129:2012 (ISO, 2012), entre otras. Estas pruebas están diseñadas para estudiar maderas que crecen en el extranjero y que tienen diferentes características de crecimiento a las de las especies nativas de México. Por ejemplo, la velocidad de desarrollo del árbol, reflejada en el ancho de los anillos de crecimiento y en la densidad, es más lenta en climas fríos y de latitudes más templadas que se dan en países como los Estados Unidos de América, Canadá y los países europeos, en comparación con crecimientos rápidos en latitudes tropicales, como es el caso de Latinoamérica, África y el sureste asiático. Como resultado, los datos obtenidos con normas desarrolladas para condiciones específicas de Norteamérica, Latinoamérica y Europa no necesariamente son apropiados para las condiciones del país. Por ello es necesario desarrollar métodos de investigación adecuados para conocer las propiedades de las maderas endémicas del estado de Michoacán.

Las propiedades elásticas pueden ser determinadas experimentalmente mediante ensayos mecánicos (ASTM Internacional, 2009; ISO, 2012), o estimadas a partir de modelos estadísticos, empleando la densidad

de la madera como variable de predicción de sus propiedades mecánicas (Hernández, 2010). Los datos obtenidos con estas técnicas son útiles para el análisis estructural, utilizando los criterios referentes a los estados límites (Dietsch & Köhler, 2010) y por el método de los elementos finitos (Fortino, Mirianon & Toratti, 2009).

Las propiedades físicas y mecánicas son indispensables para el diseño de productos de madera y para su análisis estructural. Además, el desarrollo de la industria de productos forestales y el de la construcción con madera requiere datos experimentales confiables y especies con características tecnológicas que permitan un empleo adecuado para un uso específico.

En México existe información sobre las características mecánicas de las maderas que se analizan en el presente trabajo. Echenique & Díaz (1969) y Herrera (1992) presentan datos sobre características mecánicas derivadas de ensayos en flexión estática. Sotomayor-Castellanos (2005) indica valores de resistencia mecánica y elástica. Sotomayor-Castellanos, Guridi-Gómez & García-Moreno (2010) determinan módulos de elasticidad por ultrasonido y Sotomayor-Castellanos, García-Mariscal, Moya-Lara & Olguín-Cerón (2010) calculan los valores en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de las velocidades del ultrasonido y de los módulos de elasticidad dinámicos.

En estas investigaciones resalta el hecho de que las propiedades en la dirección longitudinal de la madera son significativamente superiores a las propiedades en las direcciones tangencial o radial, indicando el carácter anisotrópico del material. De la revisión de los trabajos anteriores se detectó que las características derivadas de ensayos en compresión son antiguas y escasas, e inexistentes para las especies de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*.

El objetivo de esta investigación fue determinar el módulo de elasticidad y la resistencia en compresión en las tres direcciones principales (radial, tangencial y longitudinal) para madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño experimental

El diseño experimental se realizó siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez-Pulido & De la Vara-Salazar (2012). Para cada especie, primero se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de la densidad, módulo de

elasticidad y resistencia en compresión. Luego, para cada una de las propiedades se realizó la prueba *F* de Fisher para determinar diferencias significativas entre las tres direcciones, para lo cual se utilizaron 13 réplicas por cada dirección estudiada, totalizando 351 observaciones (figura 1). Adicionalmente, para el contenido de humedad se realizó una prueba de diferencia de medias entre las diferentes orientaciones de las probetas (radial (r), tangencial (t) y longitudinal (l)) y entre las especies estudiadas.

## Materiales

El material experimental consistió en madera de *Pinus michoacana* var. *cornuta* Martínez, *Pinus douglasiana* Martínez y *Pinus pringlei* Shaw. Las tres especies tienen un hábitat natural en el estado de Michoacán, México, y pertenecen a la división botánica de las gimnospermas. Las probetas utilizadas fueron extraídas del mismo lote de madera empleado por Sotomayor-Castellanos *et al.* (2010a).

Se seleccionó un ejemplar de cada especie recolectado en el municipio de Morelia en el estado de Michoacán (19°42'10"N 101°11'32"O), del cual se cortaron dos trozas de 40 cm y 70 cm de diámetro y 2.5 m de longitud. De estas trozas se prepararon piezas de 30 cm × 30 cm × 60 cm, que fueron almacenadas en agua durante 60 días antes de proceder a los ensayos de laboratorio (figura 2). A partir de estas piezas se dimensionaron listones de 7.5 cm × 7.5 cm × 60 cm, de los cuales se prepararon 39 probetas de 50 mm × 50 mm × 50 mm orientadas en las direcciones radial (r), tangencial (t) y longitudinal (l) del plano leñoso. Las probetas, conteniendo solamente madera de albura y libres de nudos, fibra desviada y madera de reacción, fueron almacenadas durante un año en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C y con una humedad relativa del aire de 60%, hasta lograr un contenido de humedad uniforme.

## Contenido de humedad y densidad

Para cada probeta se determinó el contenido de humedad (CH) al momento del ensayo, de acuerdo con la ecuación (1) (Haygreen & Bowyer, 1996), y la densidad básica de acuerdo con la ecuación (2) (Haygreen & Bowyer, 1996):

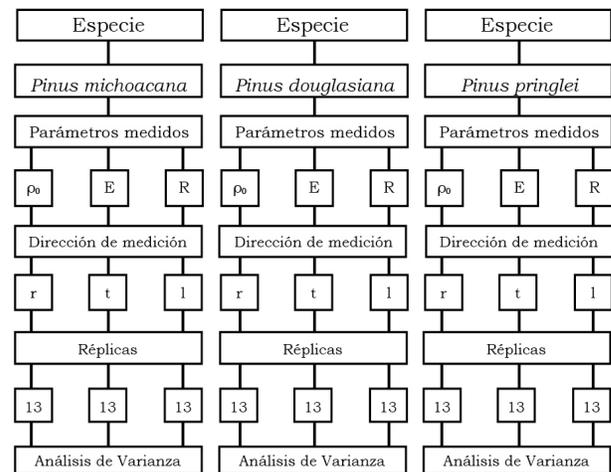
$$CH = \frac{w_s - w_A}{w_A} (100) \quad (1)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad de la madera (%).

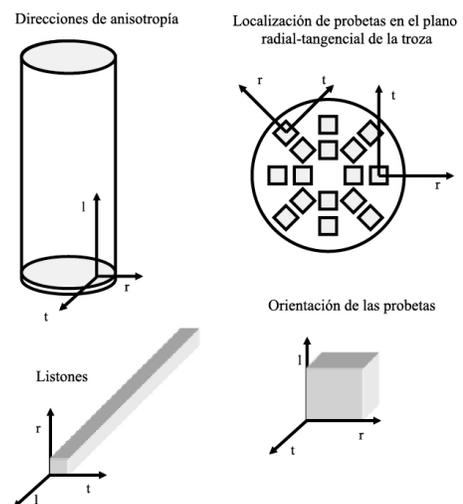
$w_s$  = Peso de la probeta al momento del ensayo (kg).

$w_A$  = Peso de la probeta en estado anhidro (kg).



**Figura 1.** Diagrama del diseño experimental.  $\rho_0$ : densidad básica; E: módulo de elasticidad en compresión; R: resistencia en compresión; r: dirección radial; t: dirección tangencial; l: dirección longitudinal.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2.** Direcciones de anisotropía de la madera, localización y orientación de listones y probetas. r: dirección radial; t: dirección tangencial; l: dirección longitudinal.

Fuente: Adaptado de Sotomayor-Castellanos *et al.* (2010a).

$$\rho_0 = \frac{w_A}{V_S} \quad (2)$$

Donde:

$\rho_0$  = Densidad básica de la madera ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

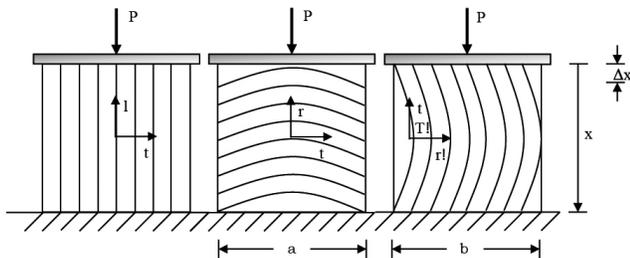
$w_A$  = Peso de la probeta en estado anhidro (kg).

$V_S$  = Volumen de la probeta en estado saturado de agua ( $\text{m}^3$ ).

### Pruebas de compresión

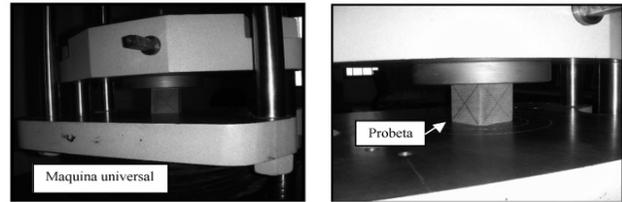
Los ensayos de compresión consistieron en aplicar una carga en las direcciones radial, tangencial y longitudinal a tres grupos de trece probetas de cada especie, para cada dirección de anisotropía estudiada (figura 3). Para aplicar la carga en compresión a las probetas se empleó una máquina universal de pruebas mecánicas *Tinius Olsen*® (figura 4) y se capturó la carga aplicada ( $P$  en N) y su desplazamiento ( $\Delta x$  en m) en la dirección  $x$  (figura 3) correspondiente a las direcciones de observación  $r$ ,  $t$ ,  $l$ . A partir de estas mediciones se calcularon el esfuerzo en el área de la sección transversal ( $bh$ , en  $\text{m}^2$ ) a la dirección de la carga ( $\sigma = P/bh$ , en Pa) y la deformación correspondiente ( $\epsilon = \Delta x/x$ , en  $\text{m}/\text{m}$ ), y se prepararon los diagramas esfuerzo-deformación para cada probeta de acuerdo con las tres direcciones observadas (figura 5).

Las pruebas de compresión se realizaron hasta la ruptura y se registró la carga a la ruptura ( $P_{rup}$  en N) al momento de la primera falla de las probetas (figura 5) y se calculó la resistencia en compresión ( $R$  en Pa). Las velocidades promedio de desplazamiento de la carga variaron desde  $0.005 \text{ mm}/\text{s}$  hasta  $0.007 \text{ mm}/\text{s}$ .

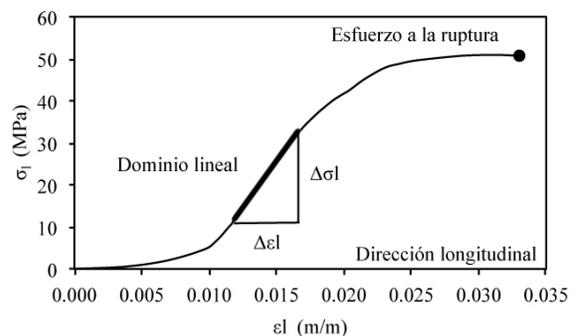
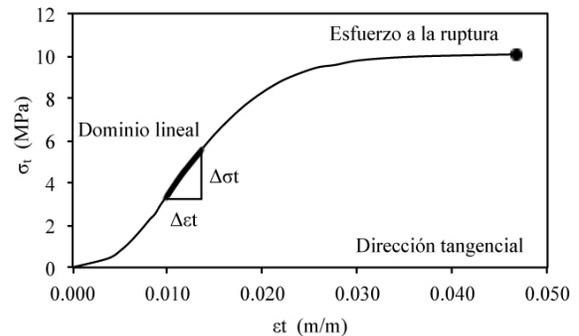
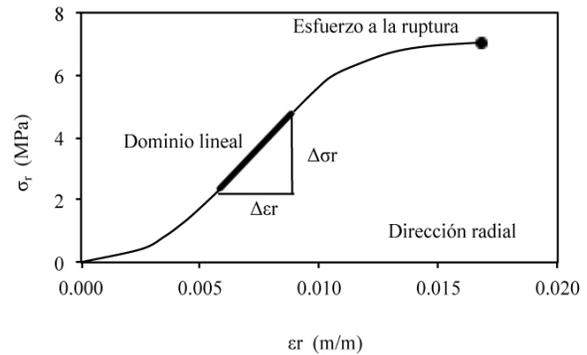


**Figura 3.** Orientación de las probetas en las pruebas de compresión.  $P$ : carga;  $x$ : dirección de la carga;  $\Delta x$ : desplazamiento de la carga en la dirección  $x$ ;  $r$ : dirección radial;  $t$ : dirección tangencial;  $l$ : dirección longitudinal;  $a$ : altura de la probeta;  $b$ : base de la probeta.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.** Pruebas de compresión. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.** Diagramas esfuerzo ( $\sigma$ ) deformación ( $\epsilon$ ) para tres probetas de *P. pringlei*.  $r$ : dirección radial;  $t$ : dirección tangencial;  $l$ : dirección longitudinal. Fuente: Elaboración propia.

Los niveles promedio de deformación máxima para el cálculo del módulo de elasticidad fueron de 1.7%, 4.7% y 3.3% de la carga a la ruptura, respectivamente, para las direcciones r, t y l. El módulo de elasticidad se calculó en el dominio lineal del diagrama esfuerzo-deformación (figura 5), con la fórmula (3) (Bodig & Jane, 1982):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad (Pa).

$\Delta\sigma$  = Intervalo de esfuerzo en el dominio lineal (Pa).

$\Delta\varepsilon$  = Intervalo de deformación en el dominio lineal (m/m).

La resistencia en compresión se calculó con la fórmula (4) (Bodig & Jane, 1982):

$$R = \frac{P_{rup}}{bh} \quad (4)$$

Donde:

R = Resistencia en compresión (Pa).

$P_{rup}$  = Carga a la ruptura (N).

b = Base de la probeta en dirección transversal a la dirección de la carga (m).

h = Altura de la probeta en dirección transversal a la dirección de la carga (m).

Una vez determinados los valores de los módulos de elasticidad y de la resistencia en compresión, se calculó su variación con respecto a las direcciones de anisotropía r, t, l.

La variación del módulo de elasticidad y de la resistencia en compresión se calculó con la ecuación (5) (Bodig & Jane, 1982):

$$CM_{\theta} = \frac{CM_l CM_{r,t}}{CM_l \sin^n \theta + CM_{r,t} \cos^n \theta} \quad (5)$$

Donde:

$CM_{\theta}$  = Característica mecánica para el ángulo  $\theta$ .

$CM_l$  = Característica mecánica en la dirección longitudinal (l).

$CM_{r,t}$  = Característica mecánica en la dirección radial (r) o tangencial (t).

$\theta$  = Ángulo entre la dirección longitudinal y la radial o tangencial.

n = Constante empírica. Módulo de elasticidad: 2; resistencia en compresión: 2.5.

## Análisis estadístico

Suponiendo una distribución normal con media cero y varianza constante ( $\sigma^2$ ) e independientes entre sí, se verificó la hipótesis nula  $H_0 : \sigma_r^2 = \sigma_t^2 = \sigma_l^2$ , y se contrastó con la hipótesis alterna  $H_A : \sigma_r^2 \neq \sigma_t^2 \neq \sigma_l^2$ , para un nivel de confianza del 95%, donde  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  y  $\sigma_l$  son valores correspondientes a las varianzas de los resultados de cada una de las pruebas y correspondientes a las direcciones r, t, l para cada especie. Para el caso de las densidades, consideradas muestras independientes, las direcciones r, t y l se refieren a las probetas en las cuales se determinaron los módulos de elasticidad y las resistencias en compresión. Los cálculos estadísticos fueron realizados con el programa *Statgraphics®*.

## RESULTADOS

La tabla 1 presenta los resultados de las pruebas de compresión en las direcciones r, t y l para la madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*. Incluye, además, los estadígrafos de la densidad básica y del contenido de humedad de la madera.

## DISCUSIÓN

### Análisis estadístico

Para cada especie, el análisis de varianza ANOVA entre las direcciones radial, tangencial y longitudinal del módulo de elasticidad y de la resistencia en compresión concluyeron en valores  $p < 0,05$  de la prueba F, resultado que permite rechazar la hipótesis nula y la igualdad de varianzas, indicando que para cada una de las especies existe diferencia significativa con un nivel del 95% de confianza, entre las medias de los valores de las tres variables agrupadas en parámetros elásticos ( $E_r$ ,  $E_t$  y  $E_l$ ) y de resistencia ( $R_r$ ,  $R_t$  y  $R_l$ ). Este resultado confirma que las características mecánicas de la madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y de *P. pringlei* varían según la dirección en que sean determinadas.

**Tabla 1.**  
Resultados de las pruebas de compresión.

	Dirección radial (r)				Dirección tangencial (t)				Dirección longitudinal (l)			
	$\rho_0$	CH	Er	Rr	$\rho_0$	CH	Et	Rt	$\rho_0$	CH	El	Rl
	kg/m <sup>3</sup>	%	MPa	MPa	kg/m <sup>3</sup>	%	MPa	MPa	kg/m <sup>3</sup>	%	MPa	MPa
<i>Pinus michoacana</i>												
$\bar{x}$	369	10.36	489	4.82	371	10.42	289	6.19	367	10.30	2199	32.84
$\sigma$	12.81	0.12	103	0.48	17.99	0.12	29.14	0.49	11.24	0.14	307	1.94
CV	0.03	0.01	0.21	0.10	0.05	0.01	0.10	0.08	0.03	0.01	0.14	0.06
<i>Pinus douglasiana</i>												
$\bar{x}$	377	10.35	386	4.98	369	10.60	296	5.82	355	10.39	1597	36.30
$\sigma$	5.00	0.72	66	0.33	14.80	0.21	30.96	0.24	4.03	0.18	123.82	1.64
CV	0.01	0.07	0.17	0.07	0.04	0.02	0.10	0.04	0.01	0.02	0.08	0.05
<i>Pinus pringlei</i>												
$\bar{x}$	460	10.52	649	7.02	451	10.71	419	8.12	496	10.70	3206	48.36
$\sigma$	21.36	0.13	106	0.59	15.09	0.11	128	0.71	24.22	0.11	817	3.39
CV	0.05	0.01	0.16	0.08	0.03	0.01	0.31	0.09	0.05	0.01	0.26	0.07

$\rho_0$ : Densidad básica; CH: contenido de humedad; E: módulo de elasticidad en compresión; R: resistencia de compresión; r: dirección radial; t: dirección tangencial; l: dirección longitudinal.  $\bar{x}$ : media aritmética;  $\sigma$ : desviación estándar; CV: coeficiente de variación.

Fuente: Elaboración propia.

## Densidad

La densidad básica de la madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y de *P. pringlei* fue similar a la reportada para las mismas especies por Sotomayor-Castellanos *et al.* (2010b).

Los resultados de ANOVA mostraron que existe diferencia significativa entre las medias de la densidad básica de las tres especies, con un nivel de confianza del 95%. Los coeficientes de variación se sitúan en el rango encontrado para las maderas mexicanas con densidad similar del género *Pinus* reportadas por Silva (2008). De acuerdo con la tabla FITECMA (Sotomayor-Castellanos, 2008), las maderas de *P. michoacana* y de *P. douglasiana* se clasifican como de densidad media, y la madera de *P. pringlei* como de densidad alta.

## Contenido de humedad

Los resultados de pruebas de comparación de medias demostraron que no existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza entre el contenido de humedad entre grupos de probetas y entre las tres especies. El contenido de humedad promedio no es mayor de 11% y puede ser considerado uniforme y sin influencia en el análisis posterior de los resultados.

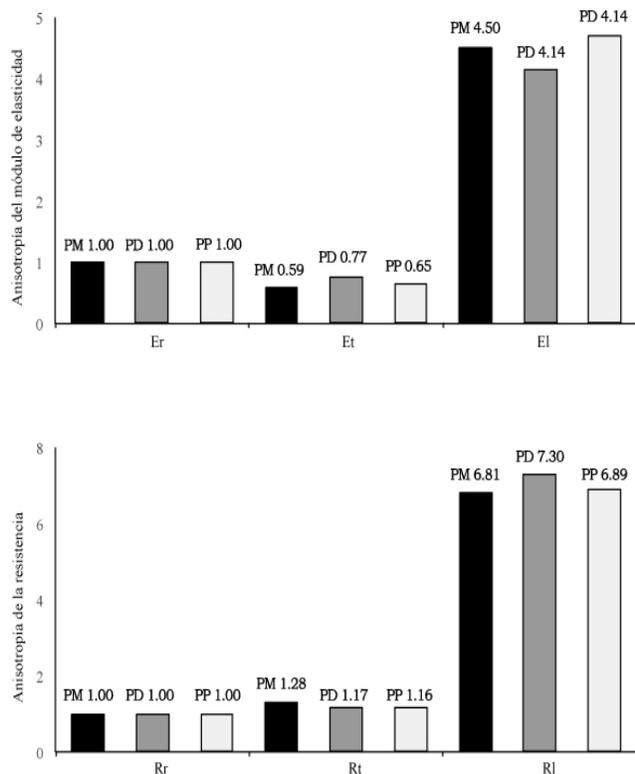
## Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad varió según la dirección de anisotropía en la que se determinó. En la dirección longitudinal, este parámetro fue mayor en comparación con los de las direcciones radial y tangencial, en una proporción de anisotropía que va desde 4.50 hasta 7.30 (figura 6). Las probetas de *P. michoacana* y *P. pringlei* mostraron valores similares entre sí, mientras que las de *P. douglasiana* fueron en promedio 60% mayores con respecto a las de *P. michoacana* y *P. pringlei*.

Franke & Quenneville (2010), empleando probetas de *Pinus radiata* en forma de cubo y orientadas en direcciones similares a las de esta investigación, encontraron valores del módulo de elasticidad de  $E_t = 288$  MPa,  $E_r = 515$  MPa y  $E_l = 5430$  MPa, con densidad de 470 kg/m<sup>3</sup> y CH de 12%, resultados que son cercanos a los de esta investigación.

El módulo de elasticidad fue proporcional a la densidad básica de la madera para las tres especies y en las tres direcciones, con excepción de la dirección tangencial de *P. douglasiana*, que mostró un valor mayor al correspondiente, resultados que coinciden con los de Ellis & Steiner (2002), quienes estudiaron en compresión probetas cúbicas de 25.4 mm de arista, de cinco maderas mexicanas con densidades que van de 323 kg/m<sup>3</sup> hasta 979 kg/m<sup>3</sup>.

Sotomayor-Castellanos *et al.* (2010b), utilizando técnicas de ultrasonido, proponen relaciones de anisotropía entre los módulos de elasticidad de las direcciones principales para las mismas especies aquí estudiadas, y que se muestran en la tabla 2, valores que se pueden contrastar con los resultados de esta investigación y que son esquematizados en la figura 6. Estos resultados coinciden igualmente con las relaciones de anisotropía presentadas por Baradit, Niemz & Fernández-Pérez (2013) para maderas coníferas chilenas de *Fitzroya cupressoides* y *Podocarpus nubigena*, con densidades comprendidas entre 412 kg/m<sup>3</sup> y 561 kg/m<sup>3</sup> (tabla 2). Estas comparaciones corroboran que las propiedades mecánicas de la madera son inherentes al material y no dependen del método empleado para su determinación. Ellas varían según la dirección considerada debido al carácter anisotrópico de la madera.



**Figura 6.** Anisotropía de la madera. E: módulo de elasticidad en compresión; R: resistencia en compresión; r: dirección radial; t: dirección tangencial; l: dirección longitudinal; PM: *P. michoacana*; PD: *P. douglasiana*; PP: *P. pringlei*.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.**

Relaciones de anisotropía en los módulos de elasticidad por ultrasonido.

$\rho_0$ (kg/cm <sup>3</sup> )	Er/ER	Et/ER	El/ER
Sotomayor-Castellanos <i>et al.</i> (2010b).			
<i>Pinus michoacana</i>			
369	1	0.40	7.75
<i>Pinus douglasiana</i>			
367	1	0.46	9.25
<i>Pinus pringlei</i>			
470	1	0.56	7.20
Baradit <i>et al.</i> (2013)			
<i>Fitzroya cupressoides</i>			
412	1	0.48	5.96
<i>Podocarpus nubigena</i>			
561	1	0.56	5.40

$\rho_0$ : Densidad básica; E: módulo de elasticidad en compresión; r: dirección radial; t: dirección tangencial; l: dirección longitudinal.

Fuente: Sotomayor-Castellanos *et al.* (2010b) y Baradit *et al.* (2013).

## Resistencia en compresión

La resistencia en compresión varió según la dirección de anisotropía en la que se determinó. En la dirección longitudinal fue mayor en comparación con los de las direcciones radial y tangencial, con relaciones de anisotropía que van desde 0.77 hasta 6.89 (figura 6). Estos resultados son similares a los de Keskin, Atar & Togay (2008), quienes encontraron valores de resistencia en compresión en el rango de 30 MPa a 63 MPa para maderas de *Fagus orientalis*, *Quercus petraea*, *Pinus sylvestris*, *Abies bornmülleriana* y *Picea orientalis*, con densidades que van de 306 kg/m<sup>3</sup> a 657 kg/m<sup>3</sup>, y con CH promedio de 12%.

Las relaciones de anisotropía presentadas en la figura 6 para las resistencias en compresión son comparables con los resultados de Kretschmann (2010), quien presenta valores de resistencia en compresión para diferentes maderas con relaciones de anisotropía en la misma proporción a las determinadas aquí.

La resistencia en compresión fue proporcional a la densidad básica de la madera para las tres especies y en las tres direcciones, con excepción de la dirección tangencial de *P. douglasiana*, que mostró un valor menor al correspondiente.

### Variación del módulo de elasticidad y de la resistencia en compresión en función del ángulo de inclinación $\theta$

La figura 7 presenta una prospectiva de la evolución del valor del módulo de elasticidad para las tres especies estudiadas, cuando el ángulo formado entre la dirección longitudinal y las direcciones radial y/o tangencial no es de 90 grados. Esta situación se presenta cuando una pieza de madera no está aserrada, recordada o alineada con respecto a las direcciones longitudinal, tangencial y radial.

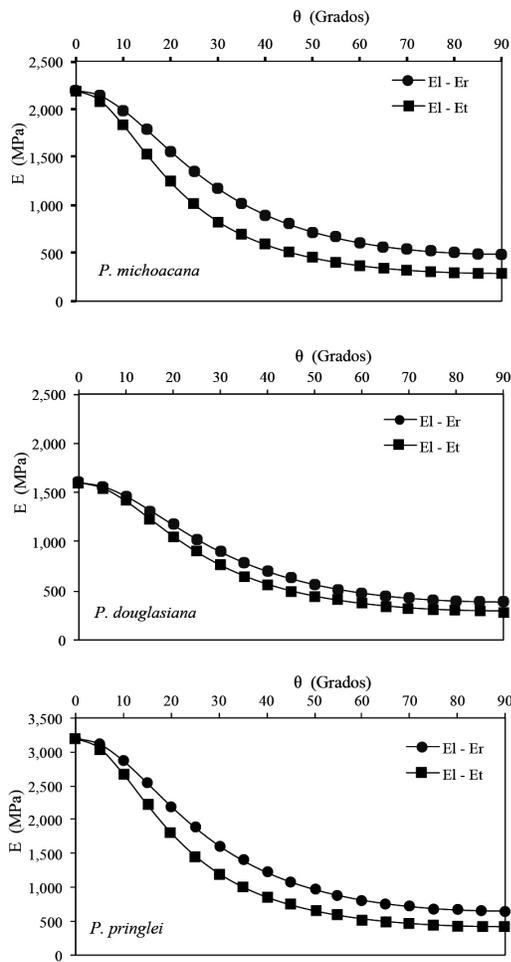


Figura 7. Variación del módulo de elasticidad (E) en función del ángulo  $\theta$  entre la dirección longitudinal (l) y las direcciones radial (r) y tangencial (t). Fuente: Elaboración propia.

La tendencia de la variación del módulo de elasticidad es similar para las tres especies, y sugiere que las propiedades elásticas son comunes e independientes de la especie y que difieren según la dirección considerada, confirmando el carácter anisotrópico de la madera.

La figura 8 presenta la variación de la resistencia en compresión para las tres especies estudiadas. La tendencia de la variación es similar a la reportada por Reiterer & Stanzl-Tschegg (2001), quienes realizaron pruebas de compresión en cubos de madera y aplicaron la teoría de elasticidad para sólidos anisotrópicos.

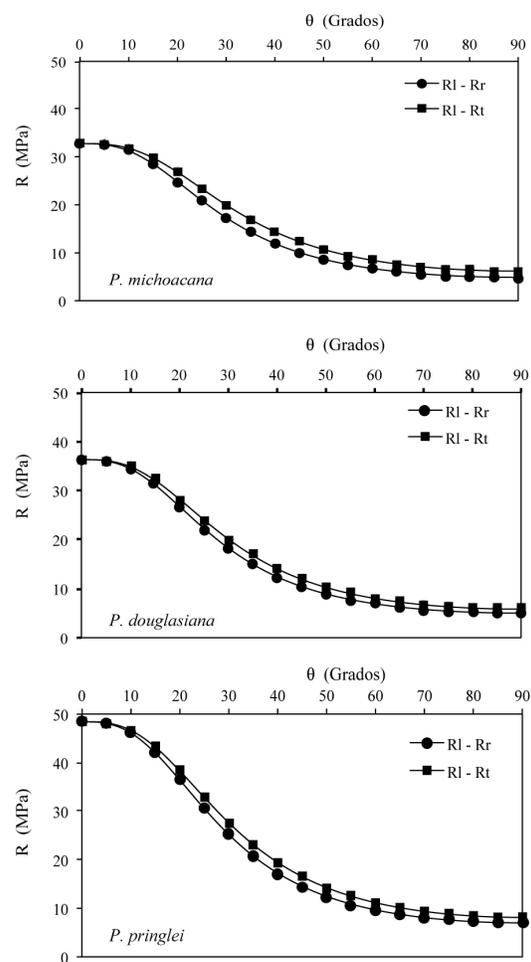


Figura 8. Variación de la resistencia en compresión (R) en función del ángulo  $\theta$  entre la dirección longitudinal (l) y las direcciones radial (r) y tangencial (t). Fuente: Elaboración propia.

Sus pruebas fueron realizadas con madera de *Picea abies*, con densidad variando de 40 kg/m<sup>3</sup> a 430 kg/m<sup>3</sup> y CH entre 10% y 12%. Al igual que la anisotropía del módulo de elasticidad discutida en la sección precedente, este resultado concuerda con los de Bodig & Jayne (1982).

## CONCLUSIONES

La investigación se enfocó en la determinación experimental de la densidad, del módulo de elasticidad y de la resistencia mecánica en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y de *P. pringlei*. Las tendencias de la variación de las propiedades mecánicas fueron similares para las tres especies y confirman que las propiedades elásticas de la madera son comunes e independientes de la especie.

La estrategia de utilizar probetas de pequeñas dimensiones, orientadas y con forma de cubo, permitió determinar propiedades físicas y mecánicas de maderas nativas del país. Esta iniciativa contribuye al desarrollo de procedimientos experimentales apropiados para la caracterización mecánica de especies mexicanas.

Los valores promedio de las características mecánicas determinadas coinciden con los valores de especies con densidad similar encontrados en la bibliografía revisada. La magnitud de la densidad fue mayor para *P. michoacana*, seguida de *P. douglasiana* y *P. pringlei*.

Los módulos de elasticidad y la resistencia en compresión fueron diferentes en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera, confirmando el carácter anisotrópico de la madera. Este comportamiento se observa en las tres especies.

Para la madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*, el valor promedio del módulo de elasticidad en compresión en la dirección radial fue mayor que el del módulo de elasticidad en la dirección tangencial. Ambos parámetros fueron menores que el del módulo de elasticidad longitudinal. El *P. pringlei* presentó valores mayores del módulo de elasticidad en comparación con los de *P. michoacana* y *P. douglasiana*.

La resistencia en compresión fue mayor para *P. pringlei* en comparación con la de *P. michoacana* y *P. douglasiana*.

Finalmente, el conocimiento de la variación del módulo de elasticidad y de la resistencia en compresión de la madera entre las direcciones longitudinal y radial y tangencial permitió adecuar los valores disponibles en la literatura técnica que están referidos usualmente a las tres direcciones de anisotropía. Cuando una pieza de madera aserrada no está orientada en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, este ajuste puede mejorar el diseño y cálculo de productos y estructuras de madera.

## REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials International (ASTM) (2009). ASTM D143-09. *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM Volume 04.10 Wood*. Philadelphia, USA: ASTM International.
- Baradit, E., Niemz, P. & Fernández-Pérez, A. (2013). Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 15(2), 235-244.
- Bodig, J. & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of Wood Composites*. USA: Van Nostrand Reinhold.
- Breyer, D. E., Fridley, K. J., Pollock, D. G. & Cobeen, K. E. (2003). *Design of wood structures*. San Francisco, USA: The McGraw-Hill Companies.
- Comisión Forestal de América del Norte (1994). *Manual de construcción de estructuras ligeras de madera*. México: Consejo Nacional de la Madera en la Construcción.
- Dávalos Sotelo, R. (1996). Diseño probabilístico de estructuras de madera en Norteamérica. *Madera y Bosques*, 2(1), 9-31.
- Dietsch, P. & Köhler, J. (2010). *Assessment of Timber Structures, Modelling of the Performance of Timber Structures*. COST Action E55. European Science Foundation. Deutschland: Shaker Verlag.
- Echenique Manrique, R. & Díaz Gómez, V. (1969). Algunas características tecnológicas de la madera de once especies mexicanas. *Boletín técnico*, 27. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría Forestal y de la Fauna. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales.
- Ellis, S. & Steiner, P. (2002). The behaviour of five wood species in compression. *IAWA Journal*, 2(2), 201-211.
- Fortino, S., Mirianon, F. & Toratti, T. (2009). A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures. *Mechanical Time-Dependent Materials*, 13, 333-356.
- Franke, S. & Quenneville, P. (2010). The Material Behaviour of Radiata Pine under Compression. *New Zealand Timber Design Journal*, 18(3), 13-18.

- Gutiérrez-Pulido, H. & De la Vara-Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw Hill.
- Haygreen, J. G. & Bowyer, J. L. (1996). *Forest Products and Wood Science. An Introduction*. USA: Iowa State University Press.
- Hernández Maldonado, S. A. (2010). *Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones* (Tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo: México. Recuperado de <http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/handle/123456789/1793>
- Herrera Ferreyra, M. A. (1992). *Características físico-mecánicas de la madera de 15 especies del municipio de Morelia* (Tesis de licenciatura). Escuela de Ingeniería en Tecnología de la Madera-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo: México.
- International Organization for Standardization (ISO) (2012). *ISO 3129:2012. Wood-Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens*. Switzerland: International Standard Organization.
- Keskin, H., Atar, M. & Togay, A. (2008). Impacts of impregnation with Imersol-Aqua on the compression strength of some solid wood materials. *Construction and Building Materials*, 22, 1402-1408.
- Kretschmann, D. E. (2010). Mechanical Properties of Wood. En U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, *Wood Handbook. General Technical Report FPL-GTR-190 (5-1-5-46)*. Madison, USA: Forest Products Laboratory.
- Mackerle, J. (2005). Finite element analyses in wood research: a bibliography. *Wood Science and Technology*, 39, 579-600.
- Mascia, N. T. & Vanalli, L. (2012). Evaluation of the coefficients of mutual influence of wood through off-axis compression tests. *Construction and Building Materials*, 30, 522-528.
- Reiterer, A. & Stanzl-Tschegg, S. E. (2001). Compressive behavior of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain. *Mechanics of Materials*, 33, 705-715.
- Silva Guzmán, J. A. (2008). *Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México* (tomo I). México: Comisión Nacional Forestal.
- Sotomayor-Castellanos, J. R. (2008). *Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas*. México: Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Coordinación de la Investigación Científica-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Recuperado el 2 de abril de <https://umich-mx.academia.edu/JavierRam%C3%B3nSotomayorCastellanos>
- Sotomayor-Castellanos, J. R. (2005). Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies de maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 1(1), 3-20.
- Sotomayor-Castellanos, J. R., García-Mariscal, J. L., Moya-Lara, C. E. & Olguín-Cerón, J. B. (2010a). Higriscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. Higrócontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 6(3), 3-32.
- Sotomayor-Castellanos, J. R., Guridi-Gómez, L. I. & García-Moreno, T. (2010b). Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 6(1), 3-32.
- Vasic, S., Smith, I. & Landis, E. (2005). Finite element techniques and models for wood fracture mechanics. *Wood Science and Technology*, 39, 3-17.