

Módulos de elasticidad y de ruptura de tres maderas angiospermas mexicanas

Mariana Ramírez y Javier Sotomayor

M. Ramírez y J. Sotomayor
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
madera999@yahoo.com

M. Ramos.,V.Aguilera.,(eds.). Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

Abstract

The Designer and Engineer who work with wood require physical-mechanical characteristics and indicators to orient the manufacture and performance of products and structures of this material. This research had the objective of determining the material indices of elasticity and flexural strength, both derived from static bending tests. For this, wood of tropical species from temperate weather was used: *Cedrela odorata*, *Quercus* spp. and *Platymiscium dimorphandrum*. Previously, the density, moisture content, modulus of elasticity and modulus of rupture, were determined in normalized specimens of the three wood species in study. The results of the ANOVA analysis established that there is a statistically significant difference between the means of the three variables analyzed from the three species, with a confidence level of 95 %. This result suggests that the density and the moduli MOE and MOR are different from and to each of the three species.

10 Introducción

El diseño ingenieril con madera demanda cualidades específicas de las propiedades físicas de este material. Estos requisitos se expresan, por ejemplo, como baja densidad, alta elasticidad y conveniente resistencia mecánica. Con el objeto de solucionar estos requerimientos, se procede inicialmente a separar y clasificar un repertorio de materiales, en este caso un inventario de especies de maderas, que posean características físico-mecánicas específicas que las catalogue candidatas para satisfacer el proyecto de diseño (Ashby, 2003). Los aspectos relacionados a la disponibilidad del material, a los costos de manufactura y a la apreciación estética y comercial de la madera, los cuales son también de vital importancia en diseño, no se discutirán, dado que van más allá del alcance de esta investigación.

Dado el amplio espectro de la biodiversidad en México, esta primera selección de especies puede ser muy amplia. Para acotarla, se proponen límites a las propiedades, lo cual resulta en una segunda selección de maderas que satisfacen de forma cada vez más precisa los requerimientos de diseño. Finalmente, la selección se optimiza clasificando las especies preseleccionadas de acuerdo a su capacidad para maximizar su rendimiento.

El rendimiento de un material no está limitado solamente por una sola propiedad, sino por una combinación de varias. Estas combinaciones de parámetros son nombradas índices materiales, propiedades que cuando se maximizan, optimizan el rendimiento de un componente de ingeniería, en este caso, actuando en un sistema estructural. En el ámbito de la tecnología de la madera, un componente actuando en un sistema estructural, puede tratarse desde una pieza de un mueble, hasta un sistema estructural que soporte una edificación, pasando por tableros compuestos de madera reconstituída, maderas de ingeniería como lo son las vigas laminadas de madera, y viguetas con perfiles diseñados para aumentar su rigidez y al mismo tiempo disminuir su peso.

Una traviesa funcionando como elemento estructural en una edificación y solicitada principalmente en tensión a lo largo de su eje principal, requiere, por ejemplo, un valor alto en la relación rigidez- peso, la cual puede ser expresada por el módulo de elasticidad específico, que es definido por la relación, E/ρ donde E es el módulo de Young y ρ es la densidad. Para el caso de una viga resistiendo cargas en la dirección transversal a su eje principal, es decir, trabajando en flexión, el módulo de Young es sustituido por el módulo de elasticidad en flexión (MOE) y se habla del índice material de elasticidad (Imoe).

Otro ejemplo es el de una viga portante, cuyo diseño requiere un valor igualmente alto para la relación módulo de ruptura (MOR) versus su peso relacionado directamente con su densidad: MOR/ρ . Esta combinación de características se define como módulo de ruptura específico, el cual también se puede especificar como el índice material de resistencia en flexión.

Cada índice material es idóneo según la función, el objetivo y las restricciones prescritas por los criterios de diseño. La función de un componente responde a la pregunta ¿Qué hace el componente? Por ejemplo, ¿Soporta cargas o resiste esfuerzos? El objetivo se refiere al cuestionamiento de qué debe ser maximizado o minimizado: debe ser ligero y/o resistente, además de seguro. Las restricciones resuelven las incógnitas para definir las condiciones de seguridad y/o estabilidad que son deseables, y si es recomendable modificarlas. Por ejemplo, la viga no puede tener una relación de esbeltez mayor que 4 a 1 y al mismo tiempo una densidad superior a 500 kg/m^3 , sean estos requisitos de diseño o de normatividad. La función, el objetivo y las restricciones definen, en el caso de un elemento estructural, los requerimientos límite para la selección de un material y la forma de su sección transversal.

De acuerdo con Ashby (2003), el índice material es la combinación de propiedades materiales que caracteriza su rendimiento para una aplicación prescrita. Un componente estructural realiza la función física de soportar cargas y de la misma forma, satisface requerimientos funcionales. Estos requerimientos funcionales son especificados por el proyecto de diseño: una viga debe soportar deformaciones de flexión, una columna debe soportar cargas axiales, una placa está sometida a deformaciones ocasionadas por esfuerzos de torsión, etcétera.

El diseño de un elemento estructural es específico a tres criterios: los requerimientos funcionales, la geometría y las propiedades del material del cual está hecho. De tal forma que la ecuación (1) (Ashby, 2003) describe el rendimiento del componente:

$$P \geq F, G, M$$

Donde:

- p = Rendimiento del componente
- F = Requerimientos funcionales
- G = Parámetros geométricos
- M = Propiedades materiales

En la ecuación (1), p describe algún aspecto del rendimiento del componente, por ejemplo, su masa, su volumen o su costo, y f se refiere a que es una “función de”, que “depende de”. El diseño óptimo es la selección del material y de la geometría que maximiza o minimiza p.

Los tres grupos de parámetros en la ecuación (1) son separables si esta se escribe:

$$p \geq F(G, M)$$

En la ecuación (2), f_1 , f_2 y f_3 son funciones separables y pueden ser multiplicadas.

Cuando los grupos $f(\cdot)$ son separables, la selección óptima de un material es independiente de los detalles del diseño, y esto aplica para cualquier geometría G y para todos los valores de los requerimientos funcionales F.

De tal forma, que el subconjunto de materiales candidatos posibles a resolver el diseño, en este caso las especies de maderas disponibles, puede ser identificado sin resolver el problema completo de diseño, o incluso, sin conocer todos los detalles de F y G.

Esta argumentación permite una enorme simplificación: el rendimiento de F y G se optimiza si se maximiza $f_3(M)$, lo que define un coeficiente de eficiencia también llamado índice material. Por contraste, las partes remanentes señaladas en la ecuación (2) $f_1(F)$ y $f_2(G)$, se especifican como coeficientes de eficiencia estructural o índices estructurales. Cada combinación de función, objetivo y restricciones de un proyecto de diseño conducen a un índice material, el cual es una característica de dicha combinación.

La argumentación precedente, puede ser adaptada al material madera. Y la diversidad de materiales para el diseño de un producto en específico puede ser transpuesta a la selección de las especies de madera disponibles para el diseño de productos y estructuras de madera. Ésta es la hipótesis de trabajo de la investigación.

En México, existen bases de datos de características físicas y mecánicas de especies de maderas endémicas, esta información forma el cuerpo de conocimientos en ciencias y tecnología de la madera del país. Estas compilaciones reportan resultados experimentales (Torelli, 1982; Sotomayor-Castellanos, 2005; Silva-Guzmán y col. 2010 y 2012; Tamarit-Urias y López-Torres, 2007; Tamarit-Urias y Fuentes-Salinas, 2003) y otras presentan datos estimados empleando modelos teóricos de predicción (Hernández-Maldonado y Sotomayor-Castellanos, 2013). Complementando, Sotomayor-Castellanos, Guridi-Gómez y García-Moreno (2010); Sotomayor-Castellanos, Ramírez-Pérez y Suárez-Béjar (2013); Sotomayor-Castellanos, Banda-Cervantes, Ramírez-Pérez y Suárez Béjar (2013); Sotomayor-Castellanos, Reyes-Rodríguez, Rincón-González y Suárez-Béjar (2013), presentan características físico-mecánicas e índices materiales de maderas mexicanas determinados con métodos no destructivos: ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones. Durante la revisión bibliográfica, no se encontraron datos sobre índices materiales de maderas mexicanas derivadas de pruebas de flexión estática.

Considerando que el Diseñador y el Ingeniero en Tecnología de la Madera requieren de información de índices materiales de la madera para diseñar y calcular componentes estructurales que trabajan en flexión, esta investigación tuvo por objetivo determinar los índices materiales de elasticidad y de resistencia en flexión, ambos derivados de ensayos en flexión estática.

Para ello, se empleó madera de las especies gimnospermas: *Cedrela odorata*, *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum*. Para lograr este propósito, previamente se determinó la densidad, el contenido de humedad, el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura, en probetas normalizadas de las tres maderas en estudio.

10.1 Materiales y métodos

A partir de piezas de madera aserrada de *Cedrela odorata* (Cedro rojo), *Quercus* spp. (Encino) y *Platymiscium dimorphandrum* (Hormiguillo), se recortaron al azar 32 probetas normalizadas de cada especie según la norma ISO 3129:2012 (ISO, 2012). Las probetas fueron almacenadas durante 24 meses en una cámara de acondicionamiento con una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del aire de 65 %, hasta lograr un peso constante.

Las dimensiones de las probetas fueron de 20 mm x 20 mm de sección transversal, por 320 mm de longitud, orientadas respectivamente en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con respecto al plano leñoso. Las probetas se elaboraron solamente con madera de albura y se revisó que estuviesen libres de anomalías de crecimiento y de madera de duramen. Para cada probeta, se evaluó el contenido de humedad de la madera por el método de diferencia de pesos y se determinó la densidad básica de la madera.

El contenido de humedad de la madera se calculó con la fórmula (3) (Haygreen y Bowyer, 1996):

$$H = \frac{W - w}{w} \cdot 100 \quad (10)$$

Donde:

- CH = Contenido de humedad de la madera (%)
- wS = Peso de la probeta en estado saturado de agua (kg)
- wA = Peso de la probeta en estado anhidro (kg)

La densidad básica de la madera se calculó con la fórmula (4) (Haygreen y Bowyer, 1996):

$$\rho_0 = \frac{w}{V_S} \quad (10.1)$$

Donde:

- ρ_0 = Densidad básica de la madera (kg/m³)
- wA = Peso de la probeta en estado anhidro (kg)
- VS = Volumen de la probeta en estado saturado de agua (m³)

Las pruebas de flexión estática consistieron en solicitar a la probeta en medio de su portada de flexión con una velocidad promedio de 0.002 mm/s hasta la ruptura (Figura 1). Para tal fin, se utilizó una máquina universal de ensayos mecánicos *Tinius Olsen*®. La Figura 10.1 presenta la configuración del ensayo en la máquina universal. Los parámetros que se midieron fueron la carga y la deformación (Figura 10.1). La pendiente $\Delta P/\Delta y$ se midió en el intervalo elástico de 600 a 1,100 N, correspondiente aproximadamente al 50 % al interior del dominio lineal de la relación carga- deformación.

Figura 10. Configuración de las pruebas de flexión estática. P: Carga, L: Largo de la probeta en la dirección longitudinal, L_{flex}: Portada entre apoyos, b: base de la probeta, a: altura de la probeta, R: Dirección radial, T: Dirección tangencial.

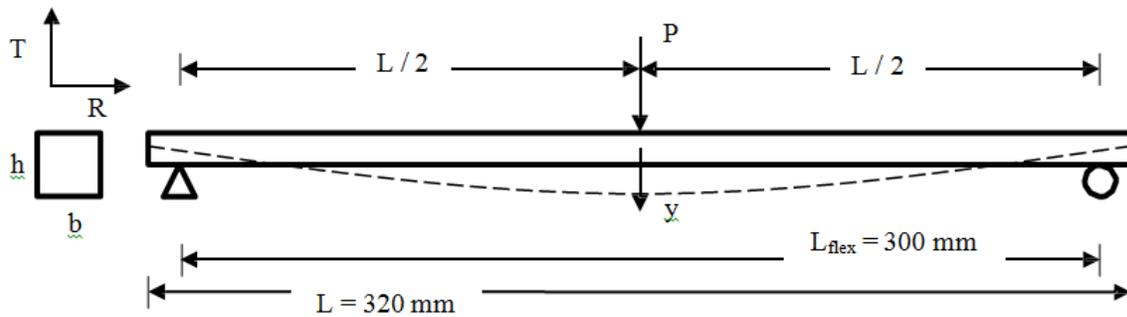
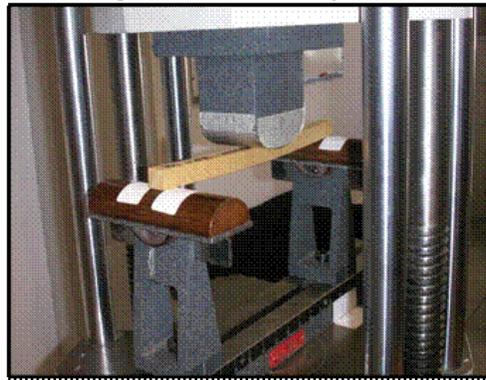


Figura 10.1 Fotografía de un ensayo de flexión estática.



El módulo de elasticidad se calculó con la fórmula (5) (Bodig y Jane, 2008):

$$\text{MOE} = \frac{\Delta P}{\Delta y} \frac{L_{\text{flex}}^3}{48 I} \quad (10.2)$$

Donde:

MOE = Módulo de elasticidad (Pa)

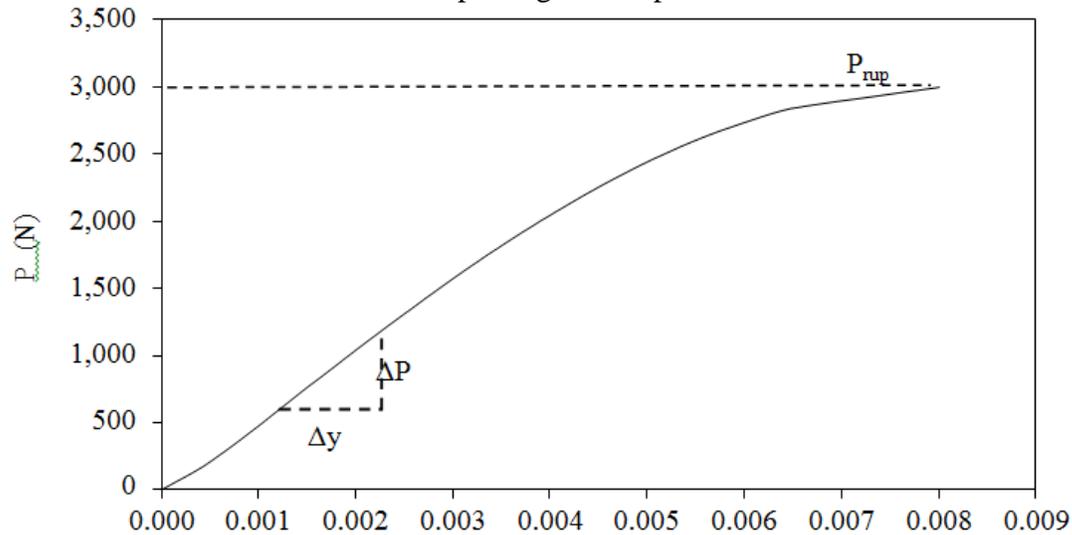
ΔP = Intervalo de carga en el dominio elástico (N)

L_{flex} = Distancia entre apoyos (m)

Δy = Intervalo de deformación en el dominio elástico (m)

I = Segundo momento de inercia de la sección transversal (m⁴)

Figura 10.2. Diagrama carga-deformación de una probeta de *Quercus* spp. P: Carga, y: deformación, ΔP : Intervalo de carga en el dominio elástico, Δy : Intervalo de deformación en el dominio elástico, P_{rup} : Carga a la ruptura.



El módulo de ruptura se calculó con la fórmula (6) (Bodig y Jane, 2008):

$$MOR = \frac{3}{2} \frac{P_{rup} L_{flex}}{b h^2} \quad (10.3)$$

Donde:

MOR = Módulo de ruptura (Pa)
 P_{rup} = Carga a la ruptura (N)
 L_{flex} = Portada entre apoyos (m)
 b = Base de la probeta (m)
 h = Altura de la probeta (m)

El índice material de elasticidad se calculó con la fórmula (7) (Ashby, 2003):

$$Imoe = \frac{\sqrt{MOE}}{\rho_0} \quad (10.4)$$

Donde:

$Imoe$ = Índice material de elasticidad (m²/s²)
 MOE = Módulo de elasticidad (Pa)
 ρ_0 = Densidad básica (kg/m³)

El índice material de resistencia en flexión se calculó con la fórmula (8) (Ashby, 2003):

$$Mf = \frac{\sqrt[2]{MOR^3}}{\rho_n} \quad (10.5)$$

Donde:

Mf = Índice material de resistencia en flexión (m²/s²)

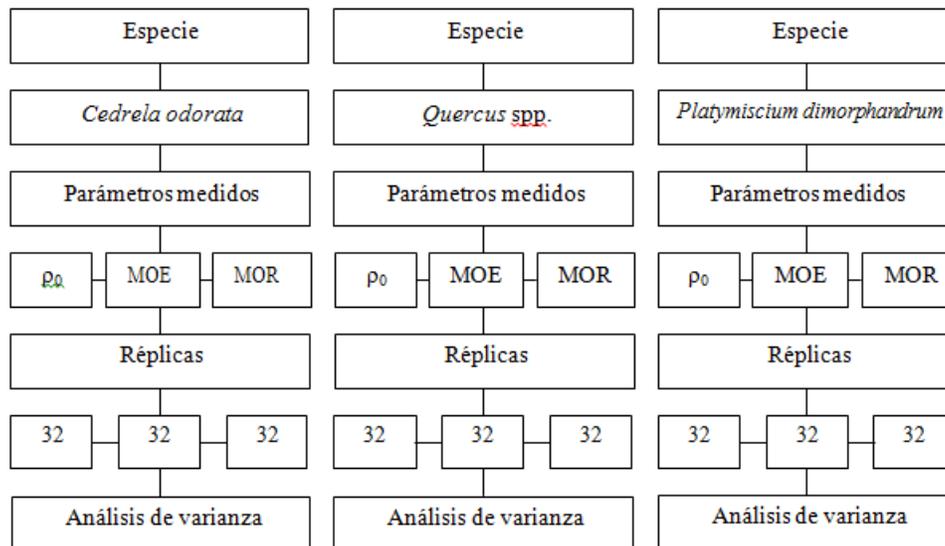
MOR = Módulo de ruptura (Pa)

ρ₀ = Densidad básica (kg/m³)

Diseño experimental

Se diseñó un experimento siguiendo las recomendaciones de Gutiérrez-Pulido y de la Vara-Salazar (2012). Para cada especie, se realizó un análisis de varianza para los parámetros densidad, módulo de elasticidad y resistencia a la ruptura. Para cada uno de los tres parámetros, se corrió una prueba *F* de Fisher, con 32 réplicas para cada una, totalizando 96 observaciones experimentales para cada variable.

Figura 10.3 Diagrama del diseño experimental. ρ₀: Densidad básica; E: Módulo de elasticidad en compresión; R: Resistencia a la compresión; r: Dirección radial; t: Dirección tangencial; l: Dirección longitudinal.



Suponiendo una distribución normal con media cero y varianza constante (σ^2) e independientes entre sí, se verificó la hipótesis nula $H_0: \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, y se contrastó con la hipótesis alterna

10.2 Resultados y discusión

La Tabla 10 presenta los resultados de la densidad, del contenido de humedad, el módulo de elasticidad y la resistencia a la ruptura, así como de los índices materiales para la madera de *Cedrela odorata*, *Quercus spp.* y *Platymiscium dimorphandrum*.

Tabla 10. Densidad básica, contenido de humedad, módulo de elasticidad, módulo de ruptura e índices materiales.

Nombre botánico (Nombre común) Número de probetas		ρ_0 (kg/m ³)	CH (%)	MOE (MPa)	Imoe (m ² /s ²)	MOR (Pa)	Mf (m ² /s ²)
<i>Cedrela odorata</i> (Cedro rojo) 32	\bar{x}	489	11.23	9,279	0.20	89	1.74
	σ	44	0.57	729	0.02	11	0.33
	CV	0.09	0.05	0.08	0.09	0.13	0.19
<i>Quercus spp.</i> (Encino) 32	\bar{x}	715	10.54	16,286	0.18	143	2.42
	σ	52	0.67	2,712	0.02	29	0.69
	CV	0.07	0.06	0.17	0.10	0.20	0.28
<i>Platymiscium dimorphandrum</i> (Hormiguillo) 32	\bar{x}	786	9.84	13,575	0.15	149	2.33
	σ	36	0.54	1,542	0.01	25	0.50
	CV	0.05	0.05	0.11	0.04	0.17	0.22

\bar{x} Media aritmética; σ Desviación estándar; CV Coeficiente de variación, ρ_0 : Densidad básica; CH: Contenido de humedad, MOE: Módulo de elasticidad, Imoe: Índice material de elasticidad en flexión, MOR: Módulo de ruptura en flexión, Imor: Índice material de resistencia en flexión.

Los resultados del análisis ANOVA establecieron que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las tres variables analizadas de las tres especies, con un nivel de confianza del 95 %. Este resultado propone que la densidad y los módulos MOE y MOR son diferentes entre y para cada una de las tres especies. En el mismo contexto, las magnitudes de los parámetros medidos y los coeficientes de variación se sitúan en el rango encontrado para las maderas gimnospermas mexicanas por los investigadores citados anteriormente.

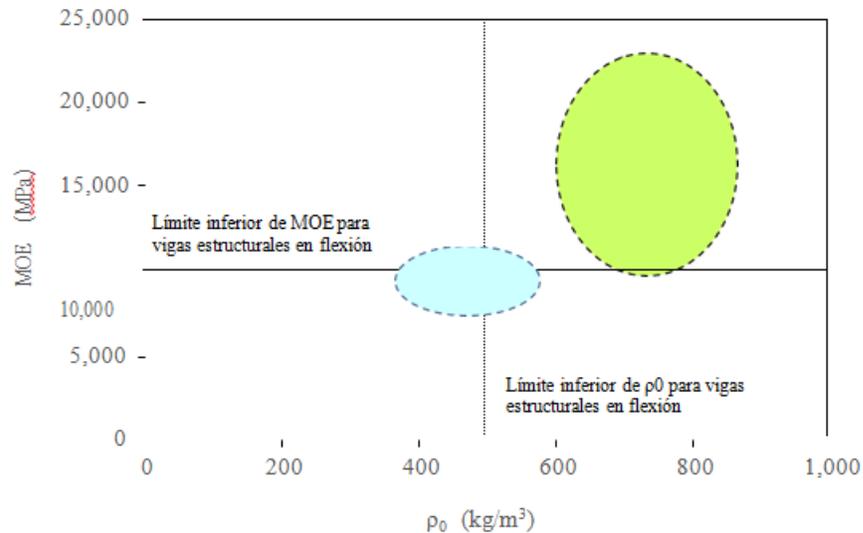
Contenido de humedad

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 al interior de cada grupo de probetas de las tres especies. En consecuencia, el contenido de humedad es considerado uniforme y sin influencia en el análisis posterior de los resultados.

Análisis comparativo

Un primer enfoque es analizar los valores del MOE en función de ρ_0 (Figura 5). Los valores de la madera de las especies *Quercus spp.* y *Platymiscium dimorphandrum* se sitúan por arriba de los límites inferiores de MOE y ρ_0 , indicadores propuestos aquí como recomendables para uso de la madera en vigas estructurales trabajando en flexión. En contraste, la madera de *Cedrela odorata*, con valores menores, se encuentra en la intersección entre estos límites. Aparentemente esta especie está en desventaja, desde el punto de vista de su selección para un empleo estructural. Este razonamiento, se aplica usualmente en la práctica de la Ingeniería en Tecnología de la Madera (Comisión Forestal de América del Norte, 1994 y Gobierno del Distrito Federal, 2004).

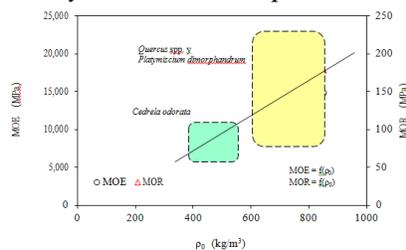
Figura 10.4 Límites inferiores para el módulo de elasticidad (MOE y el de ruptura (MOR) y posición de los valores para las probetas de las tres especies estudiadas. Los puntos corresponden a 32 probetas ensayadas por cada especie. Como existen valores iguales o similares, por un efecto de escala, aparentemente en el gráfico no se muestran los 96 valores analizados.



Otro procedimiento de análisis en la caracterización mecánica de la madera, es proponer a la densidad como característica y/o variable explicativa de las propiedades mecánicas en correlaciones estadísticas (Bodig y Jane, 1982), del mismo tipo que la presentada en la Figura 6. Una vez más, la madera de *Cedrela odorata*, con bajos valores de densidad y de módulos de elasticidad y de ruptura, está en desventaja competitiva en comparación con las especies *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum*. Este enfoque es útil para validar métodos y resultados de laboratorio. Empero, es demasiado simple para seleccionar una especie de madera para una función específica en un proyecto de fabricación o constructivo.

A continuación, se propone un enfoque que considera en el análisis a los índices materiales de la madera.

Figura 10.5 Distribución de los valores del módulo de elasticidad (MOE) y del módulo de ruptura MOR en función de la densidad ρ_0 de la madera de *Cedrela odorata*, *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum*.

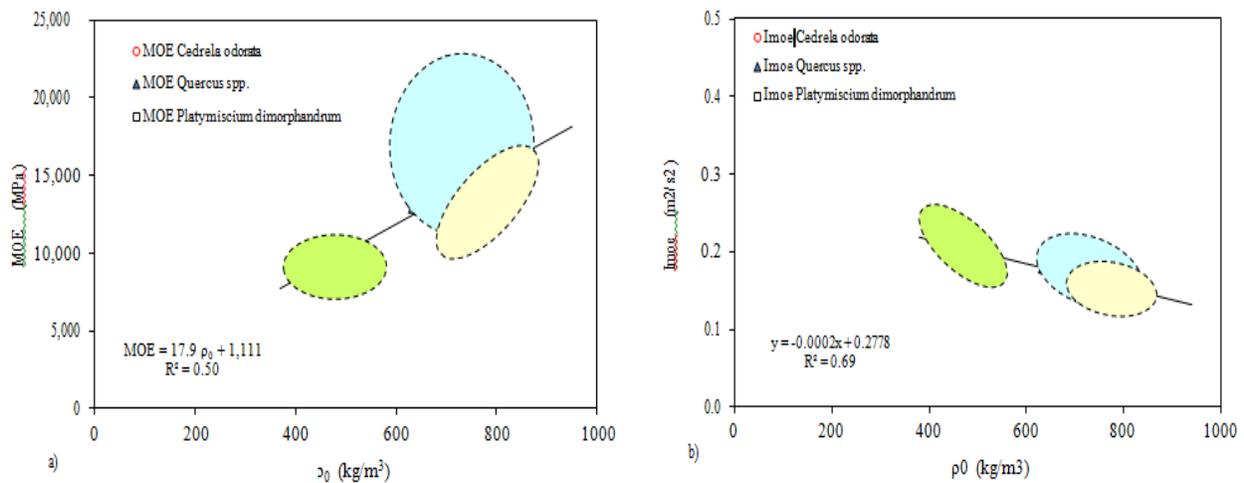


Índices materiales

La Figura 10.6 presenta la distribuciones del módulo de elasticidad en flexión estática (MOE) y del índice material en flexión estática $Imoe$, en función de la densidad básica ρ_0 de la madera de *Cedrela odorata*, *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum*. Las líneas representan las regresiones entre MOE e $Imoe$ y ρ_0 , considerando las 96 probetas observadas. R^2 es el coeficiente de determinación con un 95 % de confianza.

En las Figuras 10.6 y 10.7, los puntos corresponden a 32 probetas ensayadas por cada especie. Como existen valores iguales o similares, por un efecto de escala, aparentemente en el gráfico no se muestran todos los valores.

Figura 10.6 Distribuciones y agrupamientos. a) del módulo de elasticidad (MOE) y b) del índice material de elasticidad en flexión ($Imoe$), ambos parámetros en función de la densidad básica ρ_0 de la madera de *Cedrela odorata*, *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum*. Las líneas representan las regresiones entre MOE y ρ_0 e $Imoe$ y ρ_0 , considerando las 96 probetas observadas. R^2 es el coeficiente de determinación con un 95 % de confianza.



Si se correlaciona el índice material $Imoe$ versus ρ_0 , el valor del coeficiente R^2 entre estos parámetros aumenta (Figura 7b). Este resultado se advierte en el agrupamiento aparente o en la disminución de la dispersión entre los puntos de los gráficos 7a y 7b.

Además, la intersección entre los conjuntos de los datos de *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum* aparentemente se mejora, y lo más importante, todos los datos se distribuyen alrededor de una línea guía, en este caso la regresión lineal, la cual puede ser propuesta como una tendencia que sirva como frontera, límite o criterio para la clasificación y/o selección de la madera para fines de diseño. En el mismo contexto, esta propuesta sugiere igualmente una agrupación de estas dos especies para aplicación práctica en diseño, acotando esta proposición únicamente al enfoque de las propiedades materiales de las especies en consideración.

Desde otro punto de vista, si se modifica la correlación simple por una correlación múltiple donde MOR y ρ_0 son variables explicativas de $Imoe$, el coeficiente de determinación R^2 aumenta a 0.83, con la ecuación: $Imoe = 0.282 + 4.25 \times 10^4 MOR - 2.427 \times 10^4 \rho_0$, resultado que sugiere una alta probabilidad de predicción del índice de material de elasticidad ampliando el número de variables explicativas.

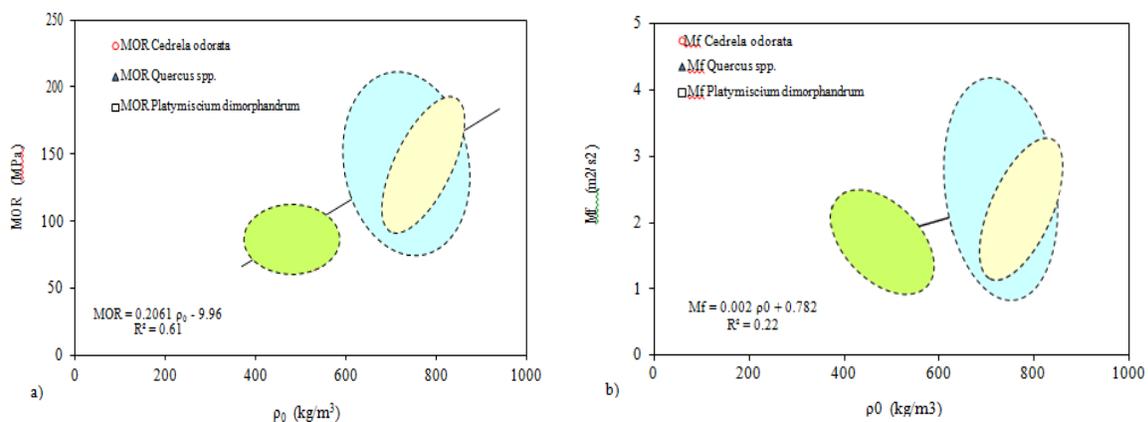
Empleando el índice material Imoe, los valores de *Cedrela odorata* se posicionan mejor que los de *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum*, cuando el diseño requiere un valor alto para la relación módulo de ruptura (MOR) versus su densidad: MOR/ ρ .

En otras palabras: la madera de *Cedrela odorata* tiene valores de resistencia (MOR) comparativamente menores que las maderas *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum*. No obstante, cuando se pretenda optimizar el requerimiento de diseño de máxima resistencia con mínimo peso, es la madera de *Cedrela odorata*, la que tendrá un mejor funcionamiento, considerando siempre los requerimientos funcionales y de geometría.

La densidad se propone como un predictor del módulo de ruptura MOR con un coeficiente de determinación R² de 0.61. Este resultado se puede mejorar si se incorpora el módulo de elasticidad en un análisis de correlación múltiple, de tal forma que el coeficiente R² aumenta a 0.76, con una ecuación: $MOR = -15.984 + 5.646 \times 10^3 MOE + 104.525 \times 10^3 \rho_0$, donde MOR es función de MOE y ρ_0 . Es decir, la predicción del MOR mejora si se incorporan el MOE y la densidad como variables explicativas.

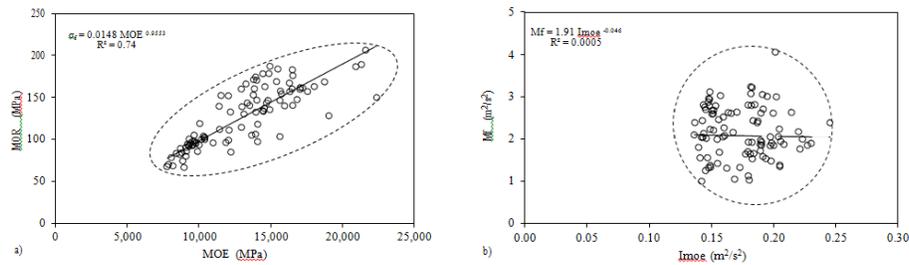
Con un procedimiento análogo al anterior, en este caso para el índice material Mf, si se incorpora el módulo de elasticidad en la correlación múltiple, da por resultado un coeficiente R² de 0.54, con la ecuación: $Mf = 0.624666 + 1.42883 \times 10^4 MOE - 4.90483 \times 10^4 \rho_0$. En este caso, el coeficiente R² disminuye y en consecuencia la predicción no se mejora.

Figura 10.7 Distribuciones y agrupamientos. a) del módulo ruptura (MOR) y b) del índice material de resistencia en flexión Mf, ambos parámetros en función de la densidad básica ρ_0 de la madera de *Cedrela odorata*, *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum*. Las líneas representan las regresiones entre MOR y ρ_0 y Mf y ρ_0 , considerando las 96 probetas observadas. R² es el coeficiente de determinación con un 95 % de confianza.



Sugiere que el MOE es un buen predictor de MOR con un R² de 0.74 en una correlación de tipo potencia (MOE = a MOR^b). Resultado que coincide con las conclusiones de (biblio, 9999). Cuando se estandarizan estos parámetros convirtiéndolos en índices materiales (Figura 9b), la correlación entre las variables Mf e Imoe es prácticamente nula y la forma de la distribución se modifica.

Figura 10.8 Correlaciones entre a) el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE), y b) el índice material de la resistencia en flexión (Mf) y el índice material en flexión (Imoe). La línea representa la regresión entre las variables, considerando las 96 probetas observadas. R2 es el coeficiente de determinación con un 95 % de confianza.



10.3 Conclusiones

Se observó una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las variables densidad, módulo de elasticidad y módulo de ruptura de las especies *Cedrela odorata*, *Quercus* spp. y *Platymiscium dimorphandrum*.

La incorporación de los índices materiales de elasticidad y de resistencia en flexión en el diseño de productos y estructuras de madera es útil al Diseñador y al Ingeniero en la apreciación de una especie o grupo de especies.

10.4 Agradecimientos

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

10.5 Referencias

- Ashby, M.F. (2nd Ed.) (2003). *Materials selection in mechanical design*. England. Butterworth Heinemann.
- Bodig, J. & Jayne, B.A. (1982). *Mechanics of Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold, USA.
- Comisión Forestal de América del Norte (COFAN). (1994). *Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera*. México. Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, A.C.
- Gobierno del Distrito Federal. (2004). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera. I: 103-BIS. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. México.
- 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. & Sotomayor Castellanos, J.R. (2013). *Características elásticas de maderas mexicanas*. Base de datos. III Congreso Latinoamericano de IUFRO. Costa Rica.

International Organization for Standardization. (2012). ISO 3129: (2012). Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. ISO Catalog 79 Wood technology; 79.040 Wood, sawlogs and saw timber. International Organization for Standardization. Brussels.

Silva Guzmán, J.A. & col. (2012). *Industrialización Comercialización y Manejo Sostenible de diez Especies Nativas Mexicanas*. Capítulo 3. Caracterización Tecnológica de las Especies de Madera. Proyecto ITTO PD 385/05 Rev. 4 (I.F.). Organización Internación de Maderas Tropicales. Universidad de Guadalajara. Comisión Nacional Forestal, México.

Silva-Guzmán, J.A. & col. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas se México e importadas*. México. Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara y Comisión Nacional Forestal.

Sotomayor Castellanos, J.R. (2005). Características mecánicas y clasificación de 150 especies de maderas Mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. UMSNH. 1(1):3-22. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Banda Cervantes, Y.; Ramírez Pérez, M. & Suárez Béjar, G. (2013). Características dinámicas e indicadores de calidad de la madera de *Quercus* spp (encino) del Estado de Michoacán estudiada por métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 9(2):14-29. México.

Sotomayor Castellanos, J.R.; Guridi Gómez, L.I. & García Moreno, T. (2010). 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. México.