

COMPORTAMIENTO HIGROSCÓPICO DE LA MADERA DE *Persea americana* var. *guatemalensis* Mill (Hass)

F. J. Fuentes-Talavera¹; J. A. Silva-Guzmán¹; M. G. Lomelí-Ramírez¹;
H. G. Richter²; R. Sanjuán-Dueñas¹

¹Departamento de Madera, Celulosa y Papel "Ing. Karl Augustin Grellmann". Universidad de Guadalajara, Jalisco. México.

²Institut für Holzschutz und Holzbiologie. Hamburg Universität. Hamburg, Deutschland.

RESUMEN

Probetas de madera de *Persea americana* de 20 x 20 x 10 mm, saturadas de humedad, fueron acondicionadas a humedades relativas del aire de 85, 65, 35, 0 % y posteriormente a inmersión en agua, para determinar sus índices de hinchamiento y contracción, así como de sus principales anisotropías. Otro grupo de estas probetas fue utilizado para determinar curvas de desorción y sorción de humedad, en el rango higroscópico de la madera.

El movimiento dimensional de *P. americana* resultó ser de pequeño a muy pequeño. Su movimiento en servicio, calculado con base al hinchamiento lineal que fue de 1.72 %, que la ubica en la categoría de pequeño. Con base en la anisotropía de la contracción por secado ($A_{\beta n} = 2.67$) se considera que el mayor riesgo de distorsiones por cambio de humedad, puede ocurrir al secar la madera, es decir del PSF al 12 % de C. H., mientras que la anisotropía del hinchamiento ($A_q = 2.13$) muestra que la madera de *Persea americana* puede ser considerada como moderadamente estable frente a los cambios de su contenido de humedad que ocurran en el intervalo de 18 a 8 %.

Los valores de histéresis fluctuaron de 0.788 a 0.885 resultando un promedio de 0.834, para el intervalo de humedad relativa del aire del 30 al 90 %.

PALABRAS CLAVES: *Persea americana*, índices de hinchamiento y contracción, anisotropías de la contracción, curvas de sorción y desorción, humedad de equilibrio.

HYGROSCOPIC BEHAVIOR OF AVOCADO WOOD (*Persea americana* VAR. *guatemalensis* MILL)

SUMMARY

Water saturated *Persea americana* wood samples of 20 x 20 x 10 mm were conditioned to 85, 65, 35, 0% relative humidity to determine their swelling and shrinking indexes as well as their main anisotropies. Another group of these wood samples was used to determine humidity desorption and sorption along the hygroscopic range of the wood.

The dimensional change of *Persea americana* wood was from small to very small. Their service movement calculated from the linear swelling index (α) was 1.72 %, which is qualified as small. According to the drying shrinkage anisotropy ($A_{\beta n} = 2.67$), it is considered that the biggest risk of possible distortion from moisture change could occur during drying from fiber saturation point to 12 % moisture content. Also, swelling anisotropy ($A_q = 2.13$) showed that the *Persea americana* wood can be considered moderately stable when its moisture content changes within the range of 18 to 8 %.

Hysteresis values fluctuated from 0.788 to 0.885, with an average value of 0.834 for the relative humidity interval of 30 to 90 %.

KEY WORDS: *Persea americana*, swelling and shrinkage coefficients, shrinkage and swelling anisotropies, sorption and desorption curves, moisture content equilibrium.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento higroscópico de la madera es uno de los temas de estudio que pueden ser considerados como indispensables para un buen aprovechamiento del recurso forestal en la fabricación de distintas manufacturas. Independientemente de que sean para un uso en interiores o exteriores, es necesario determinar el efecto de las condiciones climáticas sobre el cambio de humedad y de forma de la madera, y con ello inferir los fenómenos que pueden ocurrir ante un eventual y siempre probable cambio de humedad.

Por lo regular, el comportamiento higroscópico de la madera es indicado o deducido en función de la determinación del hinchamiento y/o contracción máxima de la madera, y de su anisotropía. Si bien esto es válido (ASTM D 143-94, section 20), también es importante señalar que pudiera ser incompleto, ya que en muy pocos usos, los productos base madera son llevados hasta tales extremos. La mayoría de manufacturas de madera está expuesta en el uso práctico a un rango de humedades relativas del aire que fluctúa en promedio de un 30 a un 85 %, que en términos de contenido de humedad de equilibrio corresponde entre un 7 a 18 % aproximadamente.

Adicionalmente también es conocido, que no existe una linealidad en el cociente de la contracción tangencial y radial (β_t/β_r) en todo el rango higroscópico de la madera, por lo que este valor está en función del rango de humedad en que sea determinado, tal y como lo muestran estudios publicados por Skaar (1988) y Torelli y Gorizek (1995).

Por lo anterior, determinar y conocer numéricamente los índices que avalen el comportamiento higroscópico para el rango de humedades previamente citado, es contar con un mayor número de elementos de juicio que faciliten analizar y dictaminar el comportamiento higroscópico de una madera y de los productos que de la misma se elaboren.

Otro aspecto importante a considerar es la determinación de las humedades de equilibrio de la madera en el proceso de desorción y adsorción de humedad (de 100 % \rightarrow 0 % \rightarrow 100 % humedad relativa del aire). Normalmente las humedades de equilibrio son determinadas a partir de gráficos ya existentes que a su vez fueron obtenidos del promedio de diversas especies de madera, por lo que suele ocurrir que no son representativos de muchas especies, existiendo divergencias importantes con respecto a sus humedades reales de equilibrio. (Ahmet *et al.* 1999).

Considerando los señalamientos anteriores, el objetivo del presente trabajo es dar a conocer un estudio

del comportamiento higroscópico de la madera de *Persea americana* en función no solamente del hinchamiento y/o contracción máxima, sino también de una serie de indicadores derivados de los cambios dimensionales que ocurren principalmente en el rango de uso práctico del 30 al 85 % de humedad relativa del aire, y de la indagación de las humedades de equilibrio durante los procesos de desorción y sorción de humedad, en el amplio rango de 98 a 0 % de humedad relativa del aire y viceversa.

Crterios para calificar el Movimiento Dimensional de la Madera

Para calificar el movimiento dimensional que presenta una madera por efecto del cambio de su contenido de humedad, se han hecho diversos señalamientos en distintos trabajos, la mayoría basados en la contracción total y/o parcial de la madera, o en función de la anisotropía de la contracción, es decir, el cociente de la contracción total tangencial y radial. Así por ejemplo, Echenique *et al.* (1975) hace una calificación que denomina índice para distorsiones y alabeos generado por la relación de la contracción total tangencial y radial, es decir, la anisotropía de la contracción (CT/CR). En el Cuadro 1 se indican tales categorías y sus valores correspondientes. Es obvio que entre mayor sea este índice, mayor probabilidad existe que ocurra una distorsión en la pieza de madera por cambio de humedad.

CUADRO 1. Índice para distorsiones y alabeos con base en la relación de la contracción tangencial y radial.

Categoría	Relación CT/CR
Baja	1.0 – 1.7
Alta	1.71 – 2.3
Muy alta	> 2.3

Ordóñez *et al.* (1990) muestran en su trabajo algunos criterios de calificación de la estabilidad dimensional de la madera basados también en la anisotropía de la contracción, y a diferencia de Echenique *et al.* (1975), ésta la califican en cinco categorías que se muestran en el Cuadro 2.

CUADRO 2. Criterios para calificar la estabilidad dimensional de la madera.

Categoría	Anisotropía de la contracción
Muy estable	< 1.5
Estable	1.5 a 2.0
Moderadamente estable	2.0 – 2.5
Inestable	2.5 – 3.0
Muy inestable	> 3.0

Otra posibilidad para calificar el movimiento dimensional de la madera es a través de su contracción por secado (β_N , de verde a 12 % C. H.) y/o de su contracción total ($\beta_{m\acute{a}x}$, de verde a 0 % C. H.). Al respecto en los Cuadros 3 y 4, se muestran los criterios sugeridos en la base de datos Prospect, ver. 2,1 (1997).

CUADRO 3. Calificación de la contracción (β_N) al disminuir la humedad de la madera del estado verde a un 12 %.

Categoría	Contracción radial %	Contracción tangencial %
Muy pequeña	< 2.0	< 3.0
Pequeña	2.1 – 2.5	3.1 – 4.0
Moderada	2.6 – 3.0	4.1 – 5.0
Ligeramente grande	3.1 – 3.5	5.1 – 6.0
Grande	> 3.5	> 6.0

CUADRO 4. Calificación de la contracción ($\beta_{m\acute{a}x}$) al disminuir la humedad de la madera del estado verde a un 0 %.

Categoría	Contracción radial %	Contracción tangencial %
Muy pequeña	< 3.0	< 5.0
Pequeña	3.1 – 4.0	5.1 – 6.5
Moderada	4.1 – 5.0	6.6 – 8.0
Ligeramente grande	5.1 – 6.0	8.1 – 9.5
Grande	> 6.0	> 9.5

Otro criterio interesante para calificar el movimiento dimensional de la madera es el denominado como movimiento en servicio, que es definido por la suma de los cambios porcentuales radial y tangencial que sufre la madera en sus dimensiones, a consecuencia del cambio de humedad relativa del aire en el rango de 90 a 60 %. Por tanto, puede ser aplicado tanto para contracción como para el hinchamiento, dependiendo del caso. En el Cuadro 5 se muestran las categorías y valores para calificar el movimiento en servicio sugeridos en la base de datos Prospect, ver. 2.1 (1997).

CUADRO 5. Calificación del movimiento en servicio.

Categoría	%
Pequeño	< 3.0
Mediano	3 – 4.5
Grande	> 4.5

Este último concepto tiene la ventaja de que califica el movimiento dimensional de la madera, justamente en el rango de humedades relativas del aire en que ocurre más frecuentemente el hinchamiento y contracción de la mayoría de manufacturas de madera en uso práctico.

MATERIALES Y MÉTODOS

La madera se recibió en 10 trozas de aproximadamente 1 m de longitud y diámetros de 25 cm, procedentes de fustes derribados en una huerta ubicada en Jujucato, Michoacán, municipio de Santa Clara del Cobre. Se trató de árboles relativamente jóvenes, 17 años de edad y aproximadamente 12 m de altura, derribados por maniobras de aclareo, tal y como se especificó en el trabajo de Silva *et al.* (1999).

De cada una de las trozas se obtuvo una rodaja de aproximadamente 5 cm de grosor, de las cuales se procedió a elaborar las probetas para la determinación de los índices de hinchamiento y contracción, y las curvas de desorción y adsorción de humedad; estas últimas en el rango de 98 a 0 % de humedad relativa del aire.

El contenido de humedad inicial de la madera, determinada en cada una de las rodajas fue de 37 %, lo que permitió comprobar el estado de saturación de la fibra, indispensable para la determinación del comportamiento higroscópico de la madera.

De cada una de las rodajas se elaboraron 10 probetas de 20 x 20 x 10 mm, distribuidas aleatoriamente en el diámetro de las mismas, perfectamente orientadas con respecto a sus anillos anuales y acorde a las especificaciones señaladas en la norma para la determinación de los índices de hinchamiento y contracción de la madera. DIN 52 184 (1979). La mitad del total de probetas se destinó para determinar el hinchamiento y contracción de la madera y la otra parte para la desorción y adsorción de humedad.

Procedimiento para determinar el hinchamiento y contracción de la madera

A cada una de las probetas se les determinó sus dimensiones y peso inicial en estado de saturación de humedad, procediéndose luego a su acondicionamiento secuencial acorde al diagrama de la Figura 1. Al final de cada una de las etapas de acondicionamiento, secado y saturación por inmersión en agua, se determinó el peso y dimensiones de las probetas con lo cual se calcularon los índices de hinchamiento y contracción, definidos en la norma DIN 52 184 de la siguiente manera:

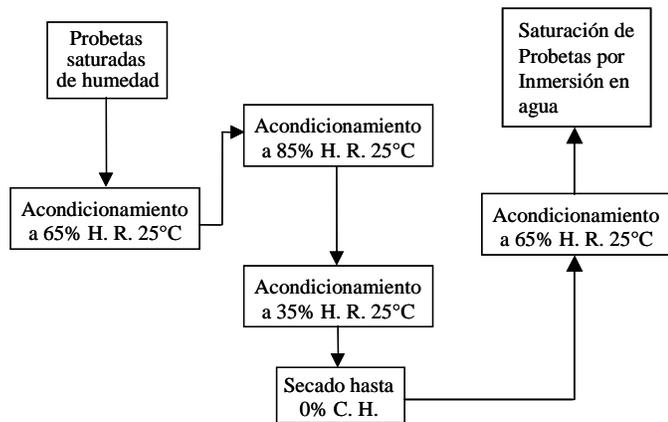


Figura. 1. Diagrama para la determinación experimental del hinchamiento y contracción de la madera, acorde a DIN 52 184.

- *Hinchamiento lineal (a)*.- Se define como el incremento de las dimensiones lineales (radial (r), tangencial (t), longitudinal (l)) de la madera, al pasar a un nivel de contenido de humedad (C. H.) mayor. Se calcula con base en la norma DIN 52184 con la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{L_2 - L_1}{L_o} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

L_1 = Dimensión en mm de alguno de los ejes (r, t, l) de la madera a un contenido de humedad C. H. ₁.

L_2 = Dimensión en mm de alguno de los ejes (r, t, l) de la madera a un contenido de humedad C. H. ₂, mismo que será mayor a C. H. ₁.

L_o = Dimensión en mm de alguno de los ejes (r, t, l) de la madera en estado anhidro.

- *Contracción lineal (β)*.- Se trata de la acción inversa al hinchamiento lineal. En este caso particular se denomina como contracción lineal a la disminución de las dimensiones lineales (radial, tangencial, longitudinal) de la madera, al reducirse su contenido de humedad. Se calcula con base en la norma DIN 52184 con la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{L_2 - L_1}{L_w} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

L_w = Dimensión en mm de algunos de los ejes (r, t, l) de la madera a un estado saturado de humedad.

- *Hinchamiento máximo ($\alpha_{m\acute{a}x}$)*.- Es definido como el aumento de las dimensiones lineales (longitudinal, radial y tangencial), que sufre una pieza de madera, al pasar de un estado seco a otro completamente húmedo. Se calcula con base en la norma DIN 52184 con la siguiente expresión:

$$\alpha_{\max} = \frac{L_w - L_o}{L_o} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

- *Contracción por secado (β_N)*.- Se define como contracción por secado al cambio dimensional que sufre la madera en sus ejes principales, al reducirse su humedad de un estado de saturación (C. H. ≥ 30 %) a un estado seco correspondiente a 65 % de humedad relativa del aire (H. R.) y 20 °C, es decir a un 12 % de contenido de humedad. Se calcula con base en la norma DIN 52184 con la siguiente expresión:

$$\beta_N = \frac{L_w - L_N}{L_w} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

L_N = Dimensión en alguno de los ejes (r, t, l) de la madera a un contenido de humedad normal (20 °C, 65 % H. R.).

- *Coefficiente de hinchamiento (h)*.- Es el cambio que sufre una pieza de madera en sus dimensiones lineales, por cada 1 % de modificación de la humedad relativa del aire, en el rango de 35 a 85 %. Generalmente este coeficiente se expresa en %/%, y se calcula con base en la norma DIN 52184 con la siguiente expresión:

$$h = \frac{L_h - L_s}{L_o(\phi_h - \phi_s)} \times 100 \quad (\%/%) \quad (5)$$

donde:

L_h = Dimensión en alguno de los ejes (r, t, l) de la madera a un estado de acondicionamiento de 85 % de humedad relativa del aire.

L_s = Dimensión en alguno de los ejes (r, t, l) de la madera a un estado de acondicionamiento de 35 % de humedad relativa del aire.

j_h = Humedad relativa del aire = 85 %.

j_s = Humedad relativa del aire = 35 %.

- *Hinchamiento diferencial (q)*.- Es el cambio dimensional en porcentaje, que sufre una pieza de madera en sus dimensiones lineales (longitudinal, radial y tangencial) por cada 1 % de variación en su contenido de humedad, en un rango de humedades de uso práctico entre 5 y 20 %. Generalmente se expresa en %/%, y se calcula con base en la norma DIN 52184 con la siguiente expresión:

$$q = \frac{L_h - L_s}{L_o(HE_h - HE_s)} \times 100 \quad (\%/%) \quad (6)$$

HE_h = Humedad de equilibrio de la madera al acondicionarse a un clima húmedo de 85 % de

humedad relativa del aire.

HEs = Humedad de equilibrio de la madera al acondicionarse a un clima seco de 35 % de humedad relativa del aire.

El cálculo de cambio dimensional de una pieza de madera utilizando el valor de hinchamiento diferencial, se hace de la siguiente forma:

$$\Delta l = l \cdot (CH_1 - CH_2) \cdot \frac{q}{100} \text{ en mm} \quad (7)$$

DI = Cambio dimensional debido a un incremento o disminución del contenido de humedad.

l = Dimensión de la pieza de madera en mm.

CH_1 y CH_2 = dos diferentes contenidos de humedad ($CH_1 > CH_2$)

Vale la pena mencionar que tanto el coeficiente de hinchamiento como el hinchamiento diferencial, nominalmente son indicados en la norma DIN 52 184 como hinchamientos, no obstante que son determinados en un proceso de contracción al cambiar las probetas de un clima húmedo de 85 % a un clima seco de 35 % de humedad relativa del aire. De acuerdo a Schwab (2002), en determinaciones de coeficientes de hinchamiento e hinchamiento diferencial realizados en numerosas especies de maderas, siguiendo tanto la secuencia de acondicionamiento de 65 % → 85 % → 35 % como la de 65 % → 35 % → 85 %, no se encontró diferencia sistemática significativa, atribuyendo las pequeñas diferencias más al efecto de la variación del clima de acondicionamiento que a la secuencia de acondicionamiento, por lo que estos índices pueden ser utilizados indistintamente. Una explicación más amplia sobre este aspecto es señalada también por Burmester (1974).

- *Anisotropía del hinchamiento (A_q)*. - Se define como el cociente del hinchamiento diferencial tangencial e hinchamiento diferencial radial. Este cociente es un indicador de posibles deformaciones y/o agrietamientos debido a cambios de humedad, que ocurren en el rango de humedad relativa entre el 35 y 85 %. Su valor numérico es adimensional, y entre mayor sea, mayor riesgo de distorsiones son probables. Se calcula con base a la norma DIN 52184 con la siguiente expresión:

$$A_q = \frac{q_t}{q_r} \quad (7)$$

Donde:

q_t = Hinchamiento diferencial en la dirección tangencial.

q_r = Hinchamiento diferencial la dirección radial.

- *Anisotropía de la contracción (A_p)*. - En este caso se trata del cociente resultante de la contracción por secado radial y de la contracción por secado tangencial; por supuesto válido para el cambio de humedad que ocurre en la madera del Punto de Saturación de la Fibra al 12 %. También es adimensional y se calcula con base a la norma DIN 52184 con la siguiente expresión:

$$A = \frac{\beta_{N,t}}{\beta_{N,r}} \quad (8)$$

Donde:

$b_{N,t}$ = Contracción por secado del eje tangencial de la madera.

$b_{N,r}$ = Contracción por secado del eje radial de la madera.

El acondicionamiento de las probetas se realizó en pequeñas cámaras (39 x 32 x 25 cm), herméticamente cerradas y con un sistema de movimiento continuo del aire en su interior (ventilador). Las humedades relativas requeridas se generaron por medio de soluciones salinas saturadas de Nitrito de Sodio ($NaNO_2$) para un 65 %, Cloruro de Potasio (KCL) para un 85 % y Cloruro de Magnesio ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) para un 35 % de humedad relativa. Una tabla con diversas soluciones químicas para el rango de 15 a 100 % es mostrada por Siau (1995).

Procedimiento para la determinación de las curvas de sorción y desorción

La determinación de las curvas de desorción y adsorción se realizó por medio de un acondicionamiento secuencial para cada caso particular. Para la desorción, las probetas se acondicionaron del estado de saturación al 98 % → 89 % → 79 % → 68 % → 59 % → 48 % → 39 % → 30 % → 20 % → 10 % → 0 % de H. R., y para la adsorción se siguió la siguiente secuencia: 0 % → 11 % → 20 % → 30 % → 40 % → 50 % → 60 % → 70 % → 80 % → 90 % → 97 % de H. R. Al final de cada una de las etapas de acondicionamiento se registró el peso de las probetas para calcular las humedades de equilibrio correspondientes.

Este acondicionamiento se realizó en una cámara con control automático de humedad relativa (91 x 61 x 45 cm) de línea, equipada con ventilador, humidificador y bomba de vacío para su operación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 6 se presentan 9 diferentes valores de hinchamiento y contracción determinados en la madera de *Persea americana*, a través de los cuales se analizará su comportamiento higroscópico, obviamente también

considerando los criterios de calificación del movimiento dimensional de la madera, previamente descritos.

Contracción por secado (β_N) y Contracción total ($\beta_{m\acute{a}x}$)

De acuerdo a los criterios indicados en los Cuadros 3 y 4 respectivamente, la contracción por secado de la madera de *Persea americana* (radial = 1.05 %, tangencial = 2.69 %) se considera como muy pequeña tanto para el eje radial como para el tangencial.

Por su parte la contracción total (radial = 2.56 %, tangencial = 5.75 %) se ubica en muy pequeña para la dirección radial, y pequeña para la dirección tangencial. Estos valores resultaron cerca de un 50 % más bajos que los reportados por Lavers (1966) para la madera de *Persea linge*, y los de Flynn y Holder (2001) que reportan para madera de *Persea americana* y *Persea borbonia* valores de contracción máxima radial de 4.8 % y tangencial de 9.5%.

Movimiento en servicio

El movimiento en servicio para la madera de *Persea americana* resultó ser de 1.72 %, calculado con base en el hinchamiento lineal. Este valor se ubica en la categoría de pequeño. Sin embargo, es importante señalar que fue determinado en un rango de humedad relativa del aire del 65 a 85 %, y no en el de 60 a 90 %, por lo que pudiera existir una pequeña diferencia en el valor del movimiento en servicio, aunque muy probablemente la calificación no se modificaría debido a que la categoría de pequeño incluye a todos los valores de movimiento en servicio menores a 3.0 %.

El análisis único de la contracción y del movimiento en servicio, indica que se trata de una madera con poco movimiento dimensional, y los índices señalados en el Cuadro 6 son apropiados para estimar los movimientos dimensionales que pudiera tener un elemento y/o producto

construido con este tipo de madera, sin embargo, un análisis más completo es con base en la anisotropía del hinchamiento y/o contracción. Para este caso particular se hará considerando la anisotropía de la contracción determinada a diferentes rangos de humedad de la madera, tal y como se muestra en el Cuadro 7.

Anisotropías de la contracción

Los valores de anisotropía de la contracción mostrados en el Cuadro 7 fluctúan desde 2.02, para el cambio de contenido de humedad de 13 a 8 %, hasta 3.03 para el cambio de humedad del estado verde al 18 %.

Ahora bien, si la anisotropía de la contracción se calcula en función de la contracción total ($\beta_{m\acute{a}x}$) de la madera, es decir, para el cambio de humedad del estado de saturación al 0 % de contenido de humedad, su valor es igual a 2.25, por lo cual se calificaría a la madera como moderadamente estable o como con alta disponibilidad a distorsión.

Por otro lado, si se analiza la anisotropía de la contracción por secado ($A_{\beta N}$ del estado de saturación a 13 % C. H.), su valor es de 2.62 por lo cual la calificación de la madera de *Persea americana* sería de inestable o con muy alta disponibilidad a distorsiones, dependiendo de los criterios de calificación que se apliquen.

Por su parte todas las anisotropías de la contracción comprendidas dentro del intervalo de cambio de contenido de humedad del 18 al 0 %, ubican a la madera en la categoría de moderadamente estable, coincidiendo esta calificación con la correspondiente a la anisotropía de la contracción máxima. Este tipo de coincidencia no siempre se presenta, por lo que es más recomendable calificar la estabilidad de la madera en función de la anisotropía en el rango de humedad en que se manifiesten los cambios. Ejemplos al respecto se muestran en un trabajo de Torelli

CUADRO 6. Valores de hinchamiento y contracción de la madera de *Persea americana*

Índice de	Coeficiente de variación (%)			
	Radial	Tangencial	Radial	Tangencial
Hinchamiento Lineal (a, %)*	0.51	1.21	14.9	16
Contracción Lineal (b, %) [§]	1.16	2.46	14.9	15.5
Hinchamiento máximo ($a_{m\acute{a}x}$, %)	2.63	6.11	15.0	17.4
Contracción máxima ($b_{m\acute{a}x}$, %)	2.56	5.75	14.7	16.5
Contracción por secado (b_N , %)	1.05	2.70	22.5	19.3
Coeficiente de hinchamiento (h, %/%)	0.0237	0.0524	15.2	16.3
Hinchamiento diferencial (q, %/%)	0.1282	0.2722	16.1	15.8
Anisotropía del hinchamiento A_q	2.13	8.1		
Anisotropía de la contracción $A_{\beta N}$	2.67	18.9		

*Calculado del 65 al 85 % de humedad relativa del aire.

§Calculado del 85 al 35 % de humedad relativa del aire.

y Gorisek (1995) sobre anisotropía de la contracción de maderas tropicales mexicanas.

Para el caso de todas las anisotropías de la contracción correspondientes al intervalo de cambio de humedad del 13 al 0 %, ubican también a la madera de *Persea americana* como moderadamente estable.

Del anterior análisis de las anisotropías de la contracción para diferentes rangos de humedad, es claro que los puntos más críticos del cambio de humedad para la madera de *Persea americana*, ocurren al reducir su contenido de humedad del estado de saturación al 18 % y/o del estado de saturación al 13 % respectivamente; es decir, prácticamente en madera aserrada durante su proceso de secado. Esto coincide también con el alto valor resultante para la anisotropía de la contracción por secado ($A_{pn} = 2.67$) indicado en el Cuadro 6.

Sin embargo, una vez que esta madera ha sido secada, las fluctuaciones de humedad comprendidas en los intervalos desde el 18 al 0 % de su contenido de humedad, que bien pudieran darse ya en diversos tipos de manufacturas, pudieran considerarse como de un riesgo moderado, acorde a los criterios de calificación presentados por Ordóñez *et al.* (1990).

Curvas de desorción y sorción de humedad

En la Figura 2 se muestran las curvas de desorción y sorción de humedad para la madera de *Persea americana* en el rango de 0 a 98 % de humedad relativa del aire, mismas que fueron ajustadas con base a un polinomio de quinto orden, utilizando los valores experimentales del Cuadro 8.

La magnitud de la histéresis (A/D), definida en este caso por el cociente de la humedad de equilibrio durante la adsorción (A) y la humedad de equilibrio durante la

CUADRO 8. Valores experimentales de humedad de equilibrio

Desorción		Adsorción	
Humedad Relativa del Aire (%)	Humedad de Equilibrio (%)	Humedad Relativa del Aire (%)	Humedad de Equilibrio (%)
98	24.73	0	0
89	20.19	11	2.9
79	15.45	20	4.1
68	12.45	30	5.72
59	11.34	40	6.82
48	9.82	50	8.69
39	8.12	60	9.53
30	6.94	70	10.52
20	4.93	80	12.57
10	3.13	90	15.91
0	0	97	23.18

desorción (D), fluctuó de 0.788 a 0.885 resultando un promedio de 0.834, en el intervalo de humedad relativa del aire del 30 al 90 %, que es el que corresponde al uso práctico de la mayoría de manufacturas de madera, y por consiguiente es el de mayor interés.

Por supuesto que entre más bajo sea el valor de este cociente, debe entenderse que menor es la capacidad de adsorción de la madera después de haber sido secada. Valores de histéresis dentro del mismo rango han sido reportados por Spalt (1958) para 10 maderas latifoliadas de Norteamérica (0.790 ... 0.828 ... 0.849).

En comparación con algunas maderas mexicanas, el valor de histéresis de la *Persea americana* resultó muy superior a los determinados por Farias (1997) en seis maderas tropicales: habillo (0.59 ... 0.65 ... 0.76), rosamorada (0.60 ... 0.66 ... 0.82), parota (0.57 ... 0.64 ... 0.77), barcino (0.63 ... 0.70 ... 0.82), papelillo (0.70 ... 0.73

CUADRO 7. Anisotropías de la contracción de la madera de *Persea americana* determinados a diferentes intervalos de humedad.

Cambio de contenido de humedad %	Contracción		Anisotropía	Calificación de la Anisotropía	
	Radial %	Tangencial %	b_t/b_r	Ordóñez <i>et al.</i> (1990)	Echenique <i>et al.</i> (1975)
Saturación a 18	0.53	1.49	3.03	Muy inestable	Muy alta
Saturación a 13	1.02	2.63	2.62	Inestable	Muy alta
Saturación a 8	1.68	3.95	2.36	Mod. estable	Muy alta
Saturación a 0	2.56	5.75	2.25	Mod. estable	Alta
18 a 8	1.16	2.46	2.14	Mod. estable	Alta
18 a 0	2.04	4.26	2.11	Mod. estable	Alta
13 a 8	0.66	1.33	2.02	Mod. Estable.	Alta
13 a 0	1.54	3.12	2.06	Mod. Estable.	Alta
8 a 0	0.88	1.80	2.13	Mod. estable	Alta

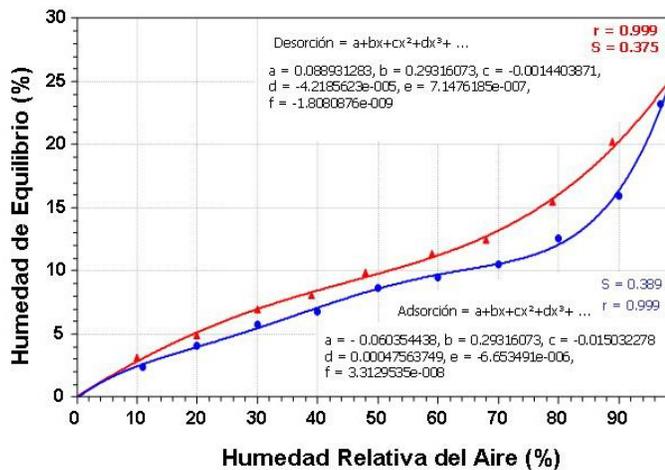


Figura 2. Diagrama de la desorción y sorción de la madera de *Persea americana*.

... 0.81), granadillo (0.47 ... 0.57 ... 0.71), por lo que la madera de *Persea americana* debe considerarse con una mayor capacidad higroscópica que las maderas previamente señaladas.

La diferencia de histéresis entre maderas es atribuida, según Skaar (1988), a diversos factores tales como estados de equilibrio de humedad incompletos, historia previa de las muestras de madera, temperatura de la determinación, y especial énfasis pone en las diferencias físico-químicas en la pared celular y en el contenido de extractivos.

CONCLUSIONES

Los movimientos dimensionales en la Madera de *Persea Americana* por cambio de humedad se ubican en las categorías de pequeños y muy pequeños. Sin embargo, el efecto de esos cambios dimensionales analizados con base en las Anisotropías de la madera, indican como puntos más críticos los cambios de humedad que ocurran del Punto de Saturación de la Fibra al 18 y/o 13%, o sea, lo más probable en madera aserrada durante su proceso de secado.

Para las fluctuaciones de humedad comprendidas en el intervalo del 18 al 0%, muy probablemente ya en diferentes tipos de manufacturas, el análisis de las anisotropías mostró que la influencia por el cambio de humedad puede considerarse de un riesgo moderado.

El movimiento en servicio de la madera de *Persea americana*, determinado con base en el hinchamiento lineal, resultó ser muy pequeño, lo cual permite concluir que manufacturas elaboradas de esta madera, en el rango de

humedad relativa del aire del 60 a 90 %, no sufrirán cambios dimensionales de consideración mayor.

LITERATURA CITADA

- AHMET K.; DAI G.; JAZAYERI S.; TOMLIN R.; KACZMAR, P.; RIDDIOUGH S. 1999. Experimental procedures for determining the equilibrium moisture content of twenty timbers. *Forest Products Journal* 49 (1): 88-93 pp.
- ASTM D 143-94. 1998. Standard Methods of Testing small clear specimens of Timber. Annual Book of ASTM Standard. Section 4 Construction. Volume 04.10 Wood. pp. 22-52.
- BURMESTER A. 1974. Veränderung der Darrabmessungen von Holz durch Umlagerung wasserlöslicher Stoffe in der Zellwand. *Holz als Roh- und Werkstoff* 32, pp. 229-234.
- DIN 52 184. 1979. Prüfung von Holz. Bestimmung der Quellung und Schwindung. DIN Taschenbuch 31. Holznormen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag GmbH – Berlin. pp. 70-73.
- ECHENIQUE-MANRIQUE R.; et. al. 1975. Caracterización tecnológica de diez especies. Estudio botánico y ecológico de la región de Uxanapa, Ver. No. 1. INIREB-P.N.I.E.T. CONACYT. México, D. F. pp. 61-65. Citado en: Guadalupe Martha Bárcenas Pazos. (1985). Recomendaciones para el uso de 80 maderas de acuerdo con su estabilidad dimensional. Nota Técnica 11, Inst. Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Lab. de Ciencia y Tecnología de la Madera. 17 p.
- FLYNN J. H.; HOLDER CH. D. 2001. A guide to Useful Woods of the World. Second Edition. Forest Products Society. Madison Wi. pp. 402-405.
- LAVERS, G. M. 1966. The strength properties of timbers. *Forest Products Research Bulletin*, No. 50. Ministry of Technology, Her Majesty's Stationary office, London.
- ORDÓÑEZ C., V. R.; BÁRCENAS P., G. M.; QUIRÓZ A. 1990. Características físico-mecánicas de la madera de diez especies de San Pablo Macuiltianguis, Oax. *La Madera y su Uso*. No. 21, Instituto de Ecología, A. C.-Universidad Autónoma Metropolitana. 30 p.
- PROSPECT, VER. 2.1. The Wood database CD Room. 1997. Oxford Forestry Institute.
- SCHWAB E. 2002. Comunicación personal a pregunta expresa sobre la Norma DIN 52 184. Miembro del comité de revisión de las normas DIN. Profesor del Instituto de Física y Tecnología Mecánica de la madera del Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Universidad de Hamburgo, Alemania.
- SIAU J., F. 1995. Wood: Influence of moisture on physical properties. Department of Wood Science and Forest Products. Virginia Polytechnic Institute and State University. pp. 8-10.
- SILVA G., J. A.; FUENTES T., F. J.; RICHTER H., G.; ÁNGELES A., G.; SANJUÁN D., R. 1999. Estructura de la madera de *Persea americana* var. *Guatemalensis* Mill (Hass). *Madera y Bosques* 5(1): 53-59.
- SKAAR, C. *Wood Water Relations*. 1988. Springer-Verlag. Series in Wood Science. pp. 161-162.
- SPALT H. A. 1958. The fundamentals of water vapor sorption by wood. *Forest Products Journal* 8, pp. 288-295.
- TORELLI N.; GORISEK Z. 1995. Mexican tropical hardwood: stepwise shrinkage and transverse shrinkage anisotropy. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 53, pp. 155-157.