

PREDICCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LA MADERA EN FUNCIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE LA PARED CELULAR Y VARIABLES AMBIENTALES

PREDICTION OF EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT IN WOOD IN RELATION TO THE SPECIFIC GRAVITY OF THE CELL WALL AND ENVIRONMENTAL VARIABLES

Natalia Pérez-Peña¹, Luis Valenzuela¹, Juan Eduardo Díaz-vaz², Rubén A. Ananías³

RESUMEN

Se determinó la variación del contenido de humedad de equilibrio (**CHE**) en el tiempo, en especies con diferente densidad básica (**Db**). Además, se generó un modelo para la predicción del **CHE** en función de los factores ambientales y algunas propiedades físicas de la madera.

Probetas de 2.5 x 7.5 x 20 cm, en espesor, ancho y largo, respectivamente, provenientes de 3 coníferas y 6 latifoliadas, fueron ubicadas en un cobertizo al exterior, y se controló el peso (**Pa**) de ellas, así como también, la temperatura (**T**) y la humedad relativa (**HR**) del aire, una vez por semana y por dos años. Finalizado el ensayo, se determinó la densidad básica (**Db**), densidad anhidra (**Da**), peso específico de la pared celular anhidra (**Gbpc**) y la porosidad anhidra (**V**), de las probetas.

La variación del **CHE** de la madera en el tiempo, fue mayor en especies de menor **Db** y mayor **V**. El modelo que consideró la **T**, **HR**, **Gbpc** y **Pa**, como variables independientes, explicó en un 98,5% la variación del **CHE**. El coeficiente de correlación (**R**) entre valores del **CHE** medidos y del **CHE** estimados por el modelo, fue 0.979.

Palabras clave: Contenido de humedad de equilibrio, densidad de la madera, porosidad, peso específico de la pared celular, regresiones múltiples.

ABSTRACT

The equilibrium moisture content (**EMC**) variation owing to the time in species with different basic density (**BD**) was determined. Further, of generating a model for the prediction of **EMC** as a function of environmental factors and some physical properties of wood.

Small samples of 2.5 x 7.5 x 20 cm in depth, width and length, respectively, from 3 conifers and 6 hardwoods were located in a shed at the exterior. And the weight of small samples (**WSS**), as well as, the temperature (**T**) and relative humidity (**RH**) of air were controlled, once a week and for 2 years. After finishing the trial the basic density (**BD**), oven dry density (**ODD**), specific gravity of the cell wall (**SGCW**) and porosity (**P**) of the small samples were determined.

¹Laboratorio Silvotecnológico de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Concepción. Chile.

²Instituto de Tecnología de Productos Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Chile

³Departamento Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.

Autor para correspondencia: nattperez@gmail.com

Recibido: 27.01.2011 Aceptado: 27.06.2011.

EMC variation of wood in relation to the time was higher, in species with lower **BD** and higher **V**. The predicting model that considered the **T**, **RH**, **SGCW** and **WSS** as independent variables explained in a 98.5 % the variation of **EMC**. The correlation coefficient (**R**) between measured **EMC** and estimated **EMC** by the predicting model was 0.979.

Keywords: equilibrium moisture content, wood density, porosity, specific gravity of the cell wall, multiple regressions.

INTRODUCCIÓN

La madera es un material higroscópico con la capacidad de intercambiar humedad con el aire circundante dentro de su rango higroscópico, esto es entre el 0 % de contenido de humedad y el punto de saturación de las fibras (**PSF**) de cada especie en particular.

El contenido de humedad de equilibrio (**CHE**), es el estado en el cual la humedad de la madera logra un equilibrio con las condiciones ambientales. Este estado es afectado por los cambios de humedad relativa (**HR**) y temperatura (**T**) del aire circundante. Como las condiciones ambientales varían constantemente, ninguna madera se encuentra en equilibrio estable y su contenido de humedad sigue las fluctuaciones que le condiciona el lugar en que se encuentra (Siau 1984, Skaar 1988, Simpson 1998, Baraúna y Oliveira 2009).

La madera, en sus diversos usos y especialmente cuando es empleada en exteriores, se encuentra sometida a rápidos cambios en las condiciones ambientales, lo cual origina que normalmente, excepto para espesores muy reducidos, no pueda alcanzar el **CHE** antes de que varíe de nuevo la **T** y la **HR** del ambiente. El grado de humedad de la madera cambia, por consiguiente, menos que lo que se podría esperar de las condiciones meteorológicas y, en general, con cierto retraso en relación a ellas. Este fenómeno es conocido como inercia higroscópica (Álvarez y Fernández 1996).

El conocimiento del **CHE** de la madera, es de gran importancia para múltiples aplicaciones prácticas de ella, especialmente en usos al exterior. La madera que se utilice debe corresponder a la más adecuada para servir en cada ambiente. De este modo se evitarán cambios dimensionales y deformaciones no deseadas (Bluhm *et al.* 1965, Peck 1965, Rosende 1969, Vergara y González 1993).

Se conocen dos metodologías para la determinación del **CHE** de la madera, la primera se basa en muestras expuestas a las condiciones ambientales de **T** y **HR** de un lugar específico, protegidas del sol y la lluvia, y la segunda se realiza con muestras expuestas a un ambiente controlado de laboratorio (cámara de clima).

Teóricamente, el **CHE** de la madera puede ser calculado en base a gráficos y ecuaciones, que para determinadas condiciones constantes de **T** y **HR** del ambiente, entregan un determinado valor del **CHE** de la madera (Simpson 1971, 1973, 1998, Galvão 1975, Avramidis 1989, Chen *et al.* 2009). Simpson (1973), comparó diferentes modelos de predicción del **CHE** de la madera, y concluyó que para expresar la humedad de equilibrio de la madera en función de la **T** y **HR**, el mejor modelo fue el que se basaba en la teoría de sorción de Hailwood y Horrobin, el cuál predice el **CHE** de la madera (en %), independiente de la especie.

$$CHE = \frac{18}{W} \left(\frac{Kh}{1 - Kh} + \frac{K_1Kh + 2K_1K_2K^2h^2}{1 + K_1Kh + K_1K_2K^2h^2} \right) * 100 \quad (1)$$

Cuando se utiliza este modelo, para una condición termodinámica específica, donde **T** y **HR**, permanecen constantes por un periodo prolongado de tiempo, dos piezas de madera de distintas especies tendrán, según esta ecuación, un mismo **CHE**, aunque tengan una densidad básica (**Db**) diferente. Sin embargo, la bibliografía demuestra que generalmente para una especie de mayor o menor **Db** se tendrá un **CHE** menor o mayor, respectivamente (Rosende 1969, Jankowsky 1985). Esto sugiere que el **CHE** de la madera depende, no sólo de las condiciones ambientales, sino que también, de las características intrínsecas de la especie maderera (Bluhm *et al.* 1965, Rosende 1969).

Aunque la **HR** del aire es el factor más importante afectando el **CHE** de la madera, otros factores son la especie, la densidad y porosidad de la madera y la **T** del aire (Siau 1984). Así como también, la diferencia entre albura y duramen en una misma especie y la cantidad de extractivos (Wangaard y Granados 1967, Skaar 1972, Ball *et al.* 2001). Sin embargo, en la literatura revisada no se encontraron evidencias acerca de la predicción del **CHE** de la madera, en función de las propiedades físicas de la madera y de las variables ambientales (**T** y **HR**), en conjunto.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, los objetivos de este trabajo fueron determinar la variación del **CHE** en el tiempo, para especies con diferente **Db** y además, generar un modelo matemático para la predicción del **CHE** en función de variables ambientales y algunas propiedades físicas de la madera. Las propiedades físicas consideradas fueron la densidad básica, densidad anhidra, peso específico de la pared celular y la porosidad.

MATERIALES Y MÉTODO

Procedencia del material.

El material estuvo constituido por 9 especies: coihue (*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.) albura y duramen, lenga (*Nothofagus pumilio* (P. et E.) Krasser) duramen, mañío (*Podocarpus nubigena* Lindl.) duramen, pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) albura y duramen, raulí (*Nothofagus nervosa* (Phil.) Krasser) duramen, roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) duramen, sequoia (*Sequoia sempervirens* D. Don) albura, teca (*Tectona grandis* Linn.) duramen, y tepa (*Laureliopsis philippiana* (Looser) Schodde) duramen, proveniente de un stock residual de madera almacenado en el Laboratorio Silvotecnológico de la Madera (LSTM), perteneciente a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción.

De cada especie se obtuvo dos piezas de madera de 2.5 x 7.5 x 25 cm, en espesor, ancho y largo, respectivamente, las que fueron acondicionadas en una cámara de clima, a 20° C y 65 % de **HR**. De estas piezas se obtuvo una probeta principal de 20 cm de largo y dos probetas secundarias de 2 cm de largo (Figura 1).

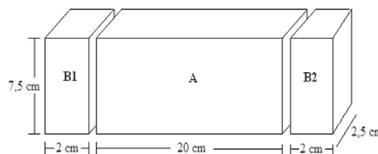


Figura 1. Esquema de obtención de probetas: A probeta principal, B₁ y B₂ probetas secundarias.

Determinación del contenido de humedad inicial (CH_i).

A las probetas secundarias, B_1 y B_2 (Figura 1), se les determinó el contenido de humedad por el método de secado en estufa mediante la siguiente ecuación:

$$CH_s = \frac{M_h - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde CH_s es el contenido de humedad de la probeta secundaria (%); M_h es la masa húmeda de la probeta secundaria (g) y M_0 es la masa anhidra de la probeta secundaria (g).

Con el objetivo de determinar la masa anhidra de la probeta principal (M_{0p}), los valores de CH_s de las probetas secundarias, B_1 y B_2 , se promediaron, y su valor se consideró como el contenido de humedad inicial de la probeta principal (CH_i). La masa anhidra de la probeta principal se determinó mediante la siguiente expresión:

$$M_{0p} = \frac{M_{hp}}{1 + 0,01 * CH_i} \quad (3)$$

Donde M_{hp} fue la masa de la probeta principal (g), acondicionada a 20°C y 65% de HR.

La M_{0p} se utilizó para determinar el CHE de cada probeta principal, con la siguiente expresión:

$$CHE = \frac{M_a - M_{0p}}{M_{0p}} \cdot 100 \quad (4)$$

Donde M_a fue la masa actual de la probeta principal (g).

En cada oportunidad de medición M_a fue controlada, permitiendo así, la determinación del CHE para cada probeta principal de las diferentes especies consideradas.

Cada probeta principal fue pintada en sus extremos, para evitar la pérdida de humedad en la dirección longitudinal. Luego, las probetas fueron colgadas en un cobertizo al exterior, protegidas del sol y de la lluvia o algún otro fenómeno distinto a la temperatura y a la humedad ambiental, y que pudiera influir en la absorción o pérdida de humedad de las piezas de madera.

El pesaje de las probetas (M_a en ecuación 4), se realizó una vez a la semana, repitiéndose en cada semana, el día y la hora (mediodía), por un periodo de dos años. Luego del pesaje, las probetas eran nuevamente ubicadas dentro del cobertizo, de forma aleatoria. Además, se llevó un registro detallado de la temperatura y humedad relativa existente en el momento del pesaje, medidas con un psicrómetro digital, instalado en las mismas condiciones de las muestras.

Determinación de la densidad básica (D_b) y densidad anhidra (D_a) de las probetas principales.

Una vez finalizado el ensayo, se procedió a la obtención de dos subprobetas de la parte central de las probetas principales (Figura 1), para determinar la D_b y D_a . Las dimensiones de estas subprobetas fueron de 25 x 75 x 20 mm en espesor, ancho y largo, respectivamente.

Las subprobetas fueron saturadas en agua y se les aplicó vacío (60 cm Hg), para obtener el volumen (V_v) sobre el PSF. Posteriormente fueron puestas en una estufa de secado a una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, hasta obtener una masa constante. En ese momento se obtuvo la masa anhidra (M_0) y el volumen anhidro (V_0).

La D_b y D_a se obtuvieron con las siguientes ecuaciones:

$$D_b = \frac{M_0}{V_v} \quad (5)$$

$$D_a = \frac{M_0}{V_0} \quad (6)$$

Determinación del peso específico de la pared celular (G_{bpc}) y de la porosidad (V), en estado anhidro, de las probetas principales.

Para la determinación del G_{bpc} , se obtuvieron dos miniprobetas, de la parte central de las probetas principales (adyacentes a las subprobetas, Figura 1), cuyas dimensiones fueron de 3 x 25 x 35 mm en espesor, ancho y largo respectivamente.

La determinación del G_{bpc} se realizó con la metodología desarrollada por Valenzuela *et al.* (2004), la cual se describe a continuación. Las miniprobetas fueron sometidas a una extracción en agua a 100°C por un periodo de 4 horas, terminando completamente saturadas y posteriormente se aplicó un vacío (60 cm Hg), con el fin de remover el aire remanente de las cavidades celulares. A las mini probetas saturadas, se les determinó su masa mediante una balanza digital (precisión 0.001 g) y su volumen por inmersión en agua (norma D-2395, ASTM 1998). Posteriormente, estas mini probetas se secaron en un horno a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 24 horas, y se obtuvo la masa anhidra de cada una de ellas. Este método se denomina medición del G_{bpc} por desplazamiento de fluidos (Siau 1984), en este caso el fluido fue agua.

Con las mediciones de la masa saturada en agua (M_s), la masa anhidra (M_0) y el volumen saturado (V_s), se determinó el contenido de humedad máximo (CH_{\max}) y el peso específico básico saturado (G_{b_s}) con las siguientes ecuaciones:

$$CH_{\max} = \frac{M_s - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad (7)$$

$$G_{b_s} = \frac{M_0}{V_s \cdot \rho} \quad (8)$$

Donde ρ es la densidad del agua (g/cm^3).

Arreglando la fórmula expuesta por Smith (1954), para la determinación del peso específico de pequeñas muestras usando el método del contenido de humedad máximo (CH_{\max}), se obtuvo la fórmula para determinar el peso específico de la pared celular en estado anhidro (G_{bpc}), la cual queda expresada como:

$$G_{bpc} = \frac{G_{b_s}}{1 - 0.01 \cdot G_{b_s} \cdot CH_{\max}} \quad (9)$$

En la determinación de la porosidad en estado anhidro (**V**), se utilizó la fórmula entregada por Siau (1984).

$$V = \left(1 - \frac{Gb_s}{Gbpc}\right) \cdot 100 \quad (10)$$

Análisis estadístico.

Para el modelo de predicción se consideró cada valor de **CHE** de la madera, como variable dependiente, y los parámetros termodinámicos del ambiente (**T** y **HR**) y las propiedades de la madera (**Db**, **Da**, **V** y **Gbpc**), así como también, algunas combinaciones entre ellas, como variables independientes. Luego se trataron en un análisis de regresión lineal múltiple, seguido del método stepwise para seleccionar las variables independientes de mayor significancia en la predicción del **CHE**.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas de las especies ensayadas.

En tabla 1 se muestran los valores promedios de las propiedades físicas medidas para las especies ensayadas, ordenadas por densidades, de menor a mayor. El **Gbpc** promedio fue de 1.450 y el valor mínimo y máximo fue de 1.392 y 1.492 para el duramen y la albura de pino radiata, respectivamente. Los valores de **Gbpc** reportados en este estudio, usando agua como medio de desplazamiento, fueron menores a los usados por Kollman y Côté (1968) de 1.50, por Siau (1984) y Simpson (1993) de 1.53 y mayores a los informados por Diaz-vaz *et al.* (1975) de 1.0 calculada a partir de valores de densidad medida con rayos X y determinaciones ópticas de la pared celular, al 12 % de contenido de humedad.

También se puede apreciar en tabla 1 que la porosidad anhidra, **V**, disminuye al aumentar la densidad básica, **Db**. Por ejemplo, para la albura de sequoia y para el duramen de teca se obtuvieron valores de **Db** de 306.3 y 622.9 kg/m³, y sus valores de **V** fueron de 74.7 y 51 %, respectivamente. Lo mismo ocurre al comparar la densidad anhidra, **Da**, con la porosidad. Este comportamiento de la porosidad, de disminuir al aumentar la densidad, es igual a lo recientemente reportado por Plötze y Niemz (2010), quienes trabajaron con 24 especies, entre coníferas y latifoliadas.

Tabla 1. Resumen de propiedades físicas determinadas, para las especies incluidas en el ensayo de contenido de humedad de equilibrio.

Especie	Da (kg/m ³)	Db (kg/m ³)	Gbpc	V (%)	\overline{CHE} (%)
Sequoia (albura)	326.5	306.3	1.414	74.7	15.5
P. radiata (duramen)	381.7	357.9	1.392	72.9	14.8
Tepa (duramen)	459.1	416.1	1.483	69.6	17.1
Mañío (duramen)	488.3	447.5	1.449	67.1	17.8
Raúlí (duramen)	491.0	447.6	1.488	68.4	14.4
Lenga (duramen)	612.6	467.9	1.485	54.4	15.9
P. radiata (albura)	538.3	475.5	1.492	62.8	15.2
Roble (duramen)	617.7	543.5	1.434	55.0	17.8
Coihue (albura)	642.9	546.3	1.470	51.0	15.5
Coihue (duramen)	666.4	565.3	1.443	50.6	14.7
Teca (duramen)	658.8	622.9	1.395	51.4	11.7

Nota: Da: densidad anhidra; Db: densidad básica; Gbpc: peso específico de la pared celular; V: porosidad anhidra, \overline{CHE} : contenido de humedad de equilibrio promedio (anual).

Variación del Contenido de humedad de equilibrio (CHE) para las especies ensayadas.

La variación del CHE promedio mensual por especie, durante un año, desde Agosto del año 1 hasta Julio del año 2, se muestra en figura 2. En esta figura se puede observar para cada especie, una disminución paulatina del CHE desde Agosto del año 1 hasta Marzo del año 2; luego se observa que el CHE aumenta desde Marzo hasta Julio del año 2. Esta variación del CHE se debe a los cambios de las condiciones ambientales, producto de las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa del aire circundante, propias de las estaciones del año para un clima templado como el de Concepción.

Es importante mencionar que la variación del promedio mensual del CHE, a lo largo de un año, de las especies coihue y pino radiata en este estudio, fue similar a los reportados por otros autores (Bluhm *et al.* 1965), para la localidad de Concepción, Chile.

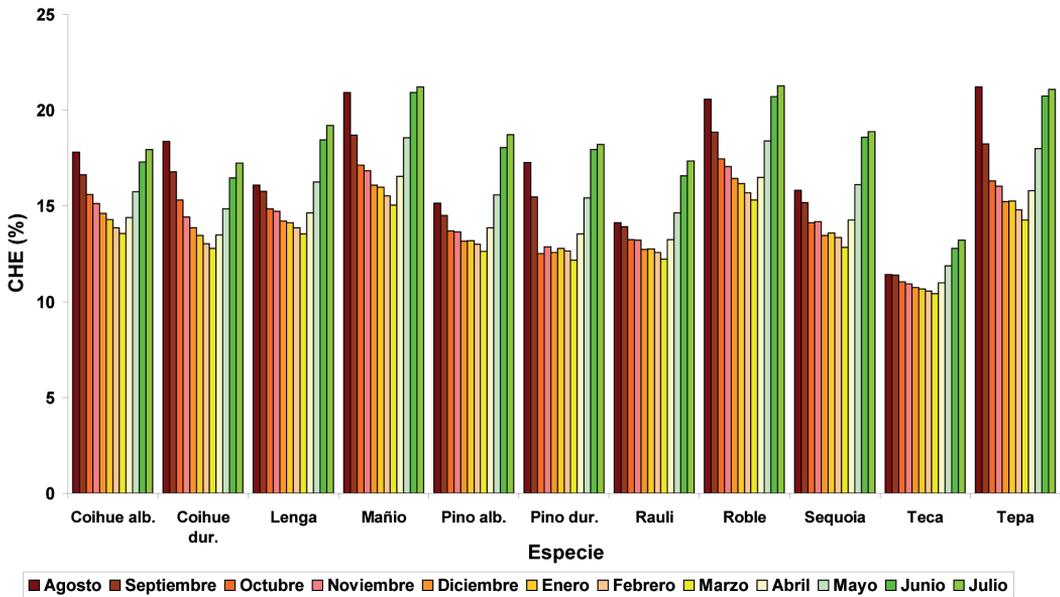


Figura 2. Variación del CHE promedio mensual por especie, durante un año de medición (desde Agosto del año 1 hasta julio del año 2).

Las especies ensayadas no presentaron el mismo comportamiento higroscópico, ya que expuestas a las mismas condiciones ambientales, a lo largo de 12 meses de medición, lograron distintos CHE, similar a lo reportado en trabajos anteriores (Bluhm *et al.* 1965, Rosende 1969) (Tabla 2). Esto implica que, cuando se utilizan gráficos, tablas o fórmulas que sólo consideran las variables termodinámicas del ambiente como la **T** y **HR**, y no las características físicas, químicas y anatómicas de la madera, se producen diferencias con los valores medidos en la práctica (Ahmet *et al.* 1999).

Un ejemplo de lo anteriormente mencionado se muestra en las figuras 3 y 4, para las especies sequoia (albura) y teca (duramen), respectivamente, donde se compara el CHE estimado con la ecuación (1) (Simpson 1973) y el CHE medido. En la figura 3 se puede observar que para la sequoia (albura), una de las especies de menor densidad (Tabla 1), la ecuación de Simpson subestima los valores de CHE, a diferencia de lo que sucede en el caso de especies con mayor densidad, como es el caso de teca, en donde la ecuación de Simpson sobre estima los valores de CHE, como se puede observar en figura 4. Estos resultados son coincidentes con los encontrados por otros autores, en otras especies maderables cultivadas en Brasil (Trugilho *et al.* 2000).

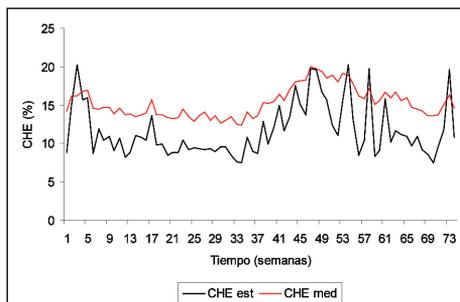


Figura 3. Comparación del CHE medido (CHE med) y el CHE estimado con la fórmula de Simpson (1973) (CHE est), para sequoia.

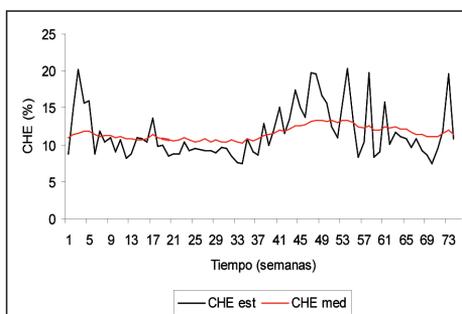


Figura 4. Comparación del CHE medido (CHEm) y el CHE estimado con la fórmula de Simpson (1973) (CHEe), para teca.

Considerando el coeficiente de variación (CV) del CHE (Tabla 2), se encontró que las especies con menor **Db** y mayor **V** presentaron una mayor variabilidad que las especies con mayor **Db** y menor **V**, como se muestra en figura 5. Cabe mencionar que las tendencias que se muestran en la figura 5, no han sido reportadas en investigaciones de similares características, dentro de la literatura revisada. En este estudio, las especies que mostraron una mayor variación del promedio anual del CHE fueron pino radiata (duramen) y tepa (duramen), con un CV de 14.7 y 14.0 %, respectivamente. Por otro lado, las especies que tuvieron una menor variabilidad anual del CHE fueron la teca (duramen) y el coihue (albura), con un CV de 8.6 y 9.5 %, respectivamente.

Tabla 2. Variación del CHE (promedio mensual y anual en %), para la madera de las especies ensayadas.

Mes	Especie										
	<i>L. philippiana</i>	<i>N. nervosa</i>	<i>N. dombeyi (albura)</i>	<i>N. dombeyi (duramen)</i>	<i>N. pumilio</i>	<i>N. obliqua</i>	<i>P. radiata (duramen)</i>	<i>P. radiata (albura)</i>	<i>P. nubigena</i>	<i>S. sempervirens</i>	<i>T. grandis</i>
En	15.2	12.8	14.3	13.5	14.1	16.2	12.8	13.2	16	13.6	10.7
Feb	14.8	12.6	13.8	13.0	13.9	15.7	12.6	13	15.5	13.3	10.5
Mar	14.2	12.2	13.6	12.8	13.5	15.3	12.2	12.6	15.0	12.8	10.4
Ab	15.8	13.2	14.4	13.5	14.6	16.5	13.5	13.9	16.5	14.3	11.0
May	18.0	14.6	15.7	14.8	16.2	18.4	15.4	15.6	18.6	16.1	11.9
Jun	20.7	16.6	17.3	16.5	18.4	20.7	17.9	18.1	20.9	18.6	12.8
Jul	21.1	17.3	17.9	17.2	19.2	21.3	18.2	18.7	21.2	18.9	13.2
Ag	20.0	16.7	17.4	16.8	18.4	20.4	17.3	17.9	20.3	18.0	13.0
Sept	17.5	15.2	16.1	15.4	16.6	17.5	15.5	16.0	18.2	16.1	12.2
Oct	17.6	15.2	16.0	15.3	16.6	18.3	15.6	16.0	18.3	16.1	12.2
Nov	15.4	13.7	14.7	14.0	15.0	16.5	13.9	14.3	16.4	14.2	11.5
Dic	15.2	12.7	14.6	13.9	14.2	16.4	12.6	13.2	16.1	13.5	10.7
Media	17.1	14.4	15.5	14.7	15.9	17.8	14.8	15.2	17.8	15.5	11.7
Mín	14.2	12.2	13.6	12.8	13.5	15.3	12.2	12.6	15.0	12.8	10.4
Máx	21.1	17.3	17.9	17.2	19.2	21.3	18.2	18.7	21.2	18.9	13.2
D.Est	2.403	1.797	1.478	1.526	1.976	2.055	2.176	2.165	2.16	2.154	1.009
C.V.	0.14	0.125	0.095	0.104	0.124	0.116	0.147	0.142	0.122	0.139	0.086

Nota: D. Est: desviación estándar, C.V.: coeficiente de variación

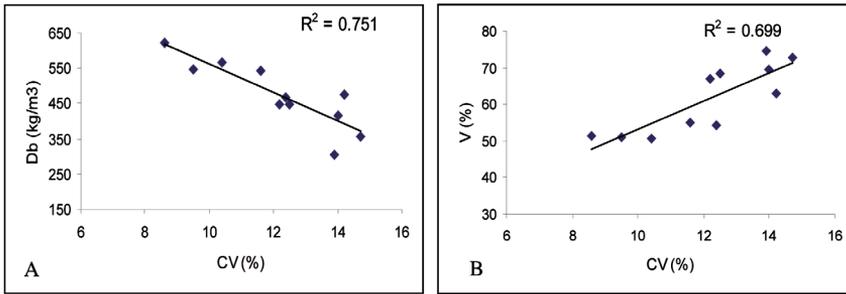


Figura 5. Relación entre propiedades físicas y variabilidad del contenido de humedad de equilibrio de la madera. A: Relación entre densidad básica (Db) y coeficiente de variación del CHE (CV) y B: Relación entre porosidad anhidra (V) y coeficiente de variación del CHE (CV).

Modelo de predicción del contenido de humedad de equilibrio (CHE)

La modelación del CHE se llevó a cabo con las mediciones realizadas en las especies ensayadas, utilizando solo el 60% de ellas, y considerando las variables termodinámicas del ambiente y las propiedades físicas de la madera, como variables independientes, en un análisis de regresión lineal múltiple. Posteriormente, se segregó mediante el método stepwise y el mejor modelo generado por este procedimiento fue el siguiente:

$$CHE = \beta_0 - \beta_1 * (T) - \beta_2 * (K_1) + \beta_3 * (Gbp) - \beta_4 * (K_2) + \beta_5 * (K_1 * T) \tag{11}$$

Donde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 , corresponden a las constantes del modelo, cuyos valores se entregan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultado del stepwise, relacionando el CHE con los parámetros ambientales (T y HR) y propiedades físicas de la madera (Gbp).

Variable dependiente	Fuente de variación	β	valor-p	Medidas de asociación
CHE	Intercepto	135.025	< 0.01	R: 0.995 R ² :0.990 EEE:0.26 p:<0.001 n: 693
	T	-0.349	< 0.01	
	K ₁	-156.80	< 0.01	
	Gbp	38.321	< 0.01	
	K ₂	-1.678	< 0.01	
	K ₁ *T	0.559	< 0.01	

Nota: R: coeficiente de correlación, R²: coeficiente de determinación, EEE: error estándar de estimación, n: número de observaciones., T: temperatura, Gbp: peso específico de la pared celular.

En el modelo (ecuación 11), los parámetros **T** y **Gbpc** son la temperatura ambiente (° C) y el peso específico de la pared celular en estado anhidro (adimensional), respectivamente, de la especie a la cual se le desea estimar el **CHE**. El parámetro K_1 se expresa en función del peso actual de la pieza de madera (**Pa**, en gramos), de la temperatura ambiente (**T**, en ° C) y de la humedad relativa del aire (**HR**, en %) y se determina como:

$$K_1 = 0,03271 + 0,002332 * Pa + 0,000604 * T - 0,000112 * HR \quad (12)$$

Por otro lado, el parámetro K_2 se expresa en función de la **T**, **HR** y del parámetro K_1 , y se determina como:

$$K_2 = 98,5456 + 0,1312 * T - 0,0257 * HR - 86,6601 * K_1 \quad (13)$$

Los coeficientes de determinación (R^2) para las ecuaciones 12 y 13 fueron 0.9742 y 0.9815, respectivamente. En la construcción de estas ecuaciones también se utilizó el 60% de las mediciones.

Validación del modelo de predicción.

Para la validación del modelo se utilizó el 40% de las mediciones restantes. La relación lineal entre los **CHE** medidos y los **CHE** estimados por el modelo, y la dispersión de puntos entorno a la línea de regresión, se muestran en figura 6.

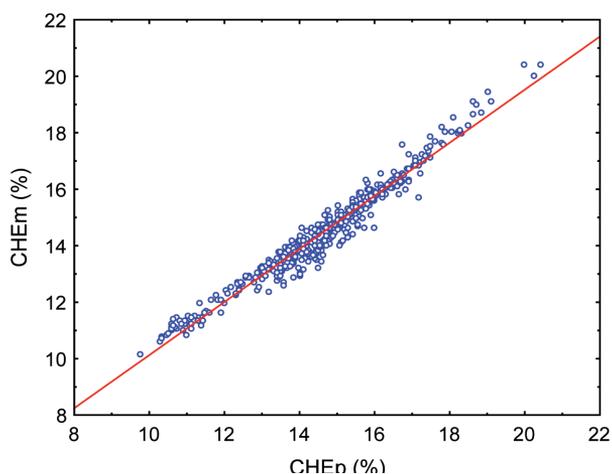


Figura 6. Relación entre el contenido de humedad de equilibrio (**CHEm**) y el contenido de humedad de equilibrio estimado por el modelo (**CHEp**)

Por otro lado, en figura 7, se muestra la relación entre el **CHE** medido y el **CHE** estimado con la ecuación entregada por Simpson (1973, ecuación 1). En esta figura, se observa una mayor dispersión de los puntos en torno a la recta de regresión, en comparación a la relación entre el **CHE** medido y el **CHE** estimado por el modelo generado (ecuación 11, Figura 6). También en la figura 7 se puede observar, que los datos forman hileras paralelas al eje de las ordenadas (**CHE** medido) entregando un solo valor en el eje de las abscisas (**CHE** estimado), este comportamiento indica que para una condición termodinámica con **T** y **HR** constantes por periodo de tiempo, el **CHE** estimado por la fórmula de Simpson es el mismo para todas las especies, aunque tienen una densidad diferente.

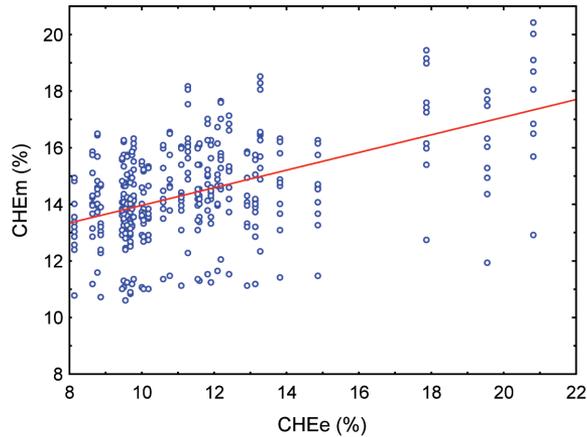


Figura 7. Relación entre el contenido de humedad de equilibrio medido (CHEm) y el contenido de humedad de equilibrio estimado con fórmula (Simpson 1973) (CHEe).

En tabla 4, se entrega la comparación de los parámetros estadísticos de asociación y precisión para las relaciones entre CHE medidos y CHE estimados, por ambos modelos. De esta tabla se desprende que los CHE estimados por el modelo generado en esta investigación, presentó una mejor asociación con los CHE medidos, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.959, lo que significa que sólo el 4.1 % de la variación del CHE medido queda sin explicar, así como también, una mejor precisión en la predicción, con un error estándar de estimación (EEE) de solo un 0.37 % de contenido de humedad.

Tabla 4. Comparación de parámetros estadísticos de asociación de precisión para la relación entre los CHE medidos y CHE estimados, por el modelo generado y para la fórmula entregada por Simpson (1973).

	R	R^2	EEE	F	p
Modelo	0.979	0.959	0.37	10.691.99	< 0.001
Simpson	0.515	0.266	2.51	139.69	< 0.001

Nota: R: coeficiente de correlación, R^2 : coeficiente de determinación, EEE: error estándar de estimación.

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se puede concluir que:

La variación del contenido de humedad de equilibrio de la madera, es mayor en maderas de mayor porosidad y menor densidad.

El modelo generado en esta investigación, que consideró las variables de temperatura y humedad relativa del ambiente, en conjunto con el peso específico de la pared celular y el peso de la pieza de madera, predicen el contenido de humedad de equilibrio de la madera con una mayor precisión, en comparación a la fórmula desarrollada por Simpson.

Aunque el modelo presentó una buena precisión, en la predicción del contenido de humedad de equilibrio de las especies incluidas en el ensayo, presenta limitaciones, ya que para estimar el contenido de humedad de equilibrio en otras especies, se hace necesario determinar el peso específico de la pared celular en estado anhidro de su madera. Sería conveniente realizar estas mediciones en otras especies, para así ajustar el modelo, ya sea por especie o por rangos de peso específico de la pared celular.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmet, K.; Dai, G.; Jazayeri, S.; Tomlin, R.; Kaczmar, P.; Riddiough, S. 1999. Experimental procedures for determining the equilibrium moisture content for twenty timber species. *Forest Products Journal* 49 (1): 88-93.

Alvarez, H.; Fernández-Golfin, J. 1996. Humedad de la madera en la construcción: valores recomendados y riesgo de cambio dimensional, en España. Centro de investigación forestal. CIFOR-INIA. *AITIM* 182: 65-71.

ASTM, American society for testing and material. 1998. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. ASTM D-2395. Annual Book of ASTM Standards. Section 4, Construction vol 0410 Wood. American society for testing and materials. Easton. 666 p.

Avramidis, St. 1989. Evaluation of “three-variable” models for the prediction of equilibrium moisture content in wood. *Wood Science and Technology* 23:251-258.

Ball, R. D.; Simpson, I. G.; Pang, S. 2001. Measurement, modelling and prediction of equilibrium moisture content in *Pinus radiata* heartwood and sapwood. *Holz als Roh* 59:457-462.

Baraúna, E.; de Oliveira, V. 2009. Umidade de equilíbrio da madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz&Pav.) e tauari vermelho (*Carinianamicrantha* Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. *Acta Amazónica* 39 (1):91-96.

Bluhm, E.; Rosende, R.; Kauman, W. G. 1965. Determinación de la humedad de equilibrio de la madera en todas las zonas climáticas de Chile, en “Actas de la reunión sobre productos forestales”. Instituto Forestal. Santiago, Chile. Informe Técnico 21: 136-143.

Chen, Z.; Mougél, E.; Perré, P.; Youngs, R. 2009. Equilibrium moisture content of Norway spruce at low temperature. *Wood and Fiber Science* 41(3):325-328.

Díaz-vaz, J. E.; Knigge, W.; Echols, R. 1975. Comparación de variaciones de densidad de madera medida radiográficamente y fluctuaciones de la estructura anatómica dentro del incremento anual. *Bosque* 1(1): 33-42

Galvão, A. P. M. 1975. Estimativas da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil. *IPEF* 11: 53-65.

Jankowsky, I.P. 1985. Variação sazonal da umidade de equilíbrio para madeira de *Pinus*. *IPEF*, Piracicaba. 31: 41-46.

Kollman, F.; Côté, W. 1968. Principles of wood science and technology. *I Solid wood*. Springer-Verlag, New York. USA. 592 p.

Peck, E. C. 1965. Moisture content of wood in use. Madison, USDA. Forest Products Laboratory. 10 p.

Plötze, M.; Niemz, P. 2010. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. *European Journal of Wood and Wood Products*. DOI 10.1007/s00107-010-0504-0.

Rosende, R. 1969. Contenido de humedad de equilibrio de algunas maderas chilenas. Actas de la reunión sobre investigación en productos forestales. Instituto Forestal Santiago, Chile. Informe Técnico 36:135-144.

Siau, J. 1984. *Transport processes in wood*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, New York. USA. 245 p.

Simpson, W. T. 1971. Equilibrium moisture content prediction for wood. *Forest Products Journal* 21 (5): 48-49.

Simpson, W. T. 1973. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and Fiber* 5 (1): 41-49.

Simpson, W. T. 1993. Specific gravity, moisture content, and density relationship for wood. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-76. Madison, USA. USDA. Forest Products Laboratory.

Simpson, W. T. 1998. Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the United States and Worldwide. Res. Note. FPL-RN-268. Madison, USA. USDA. Forest Products Laboratory.

Skaar, C. 1972. Water in wood. Syracuse University Press, Syracuse, New York. USA. 218 p.

Skaar, C. 1988. Wood-water relations. Springer-Verlag. Berlín Heidelberg. New York. USA. 283 p.

Smith, D. 1954. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. Rept. N° 2014, Madison, USA. USDA, Forest Products Laboratory.

Trugilho, P. F.; Lima, J. T.; Mori, F. A.; Silva, J. R.; Mendes, L. M.; Pinto, L. V. 2000. Umidade de equilíbrio em madeira para diferentes condições de temperatura e umidade relativa em câmara de climatização. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (VII EBRAMEM), São Carlos, Brasil.

Valenzuela, L.; Ramírez, M.; Levancini, C.; Arévalo, A. 2004. Investigación exploratoria, variación radial de la densidad de la pared celular en la madera de *Pinus radiata* D. Don de 29 años de edad. II Congreso Chileno de Ciencias Forestales, 10-12 Noviembre 2004. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile, p 117, (Resumen).

Vergara, N.; González, V. 1993. Humedad de equilibrio para *Eucalyptus globulus* en distintas zonas climático-habitacionales de Chile. Actas Simposio Los eucaliptos en el desarrollo forestal de Chile, Instituto Forestal, Pucón-Chile, 585-599pp.

Wangaard, F.; Granados, L. 1967. The effect of extractives on water-vapor sorption by wood. *Wood Science and Technology* 1: 253-277.