

Rev. Cienc. Tecnol.
Año 9 / Nº 9 / 2007 / 44-50

RELACIONES DE CONVERSIÓN ENTRE DENSIDAD BÁSICA Y DENSIDAD SECA DE MADERA

Carlos Eduardo Núñez

PROCYP, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones. Félix de Azara 1552, (3300), Posadas, Provincia de Misiones, Argentina. Fax 52 03752 422198. (c_e_nunez@fceqyn.unam.edu.ar).

CONVERSION RELATIOSHIPS BETWEEN BASIC DENSITY AND OVEN DRIED DENSITY OF WOOD

ABSTRACT

The density of wood is a parameter widely employed because it is a good parameter to compare quality and simple to calculate. Basic and dry densities were employed, considering the former is used in the forestry environment and the latter in the wood beach of the pulp mills. Due to the fact that there is no way to relate both of them, a study to find a relationship between them was performed. Besides, the verification of a predictive model for the wood to water ratio, employed before by Smith in 1954, was intended. Fifty-five samples of softwoods and hardwoods were employed. Two correlation equations with values of R^2 greater than 0.93 were found; the one whose relation was given by the following linear equation: Basic density=0.7022 x (Dry density) + 0.0678 was chosen. An optimum performance was found for this model. As a conclusion, the use of this expression to transform basic densities into dry densities is suggested.

KEYWORDS: wood density, wood properties, specific gravity, density, physical properties, wood structure, wood measurement, wood structure, fiber dimensions. (IPST Thesaurus 1960).

RESUMEN

La densidad de madera es un parámetro muy usado por su sencillez y por ser un buen indicador de calidad. Se trabajó con la densidad básica y la densidad seca, atendiendo a que la primera se utiliza en los ambientes forestales y la segunda en las playas de madera para pulpa. Dado que no existe una forma de conversión entre ambas, se realizó un trabajo al respecto. Se trató también de comprobar un modelo predictivo para las relaciones madera - agua utilizado por Smith en 1954. El trabajo experimental sumó 55 muestras de coníferas y latifoliadas. Se obtuvieron dos ecuaciones de correlación con R^2 mayores a 0,93, eligiéndose entre ellas la que corresponde a la ecuación lineal: Densidad básica=0,7022 x (Densidad seca) + 0,0678. El comportamiento del modelo fue óptimo. Como conclusión se sugiere la utilización de esta expresión para convertir densidades básicas a densidades secas.

PALABRAS CLAVE: densidad de madera, densidad básica, densidad seca, correlaciones, absorción de agua, propiedades de la madera, estructura de la madera, conversión.

INTRODUCCIÓN

La densidad de la madera es uno de los parámetros de más frecuente utilización en la cuantificación de las plantaciones y la caracterización de sus propiedades. Se utiliza tanto en ambientes madereros como en la industria de la pulpa y papel. Su versatilidad se debe a que reúne las características de ser un buen indicador de calidad y de que su determinación es sencilla y económica.

Existen cuatro maneras principales de definirla: densidad verde, densidad básica, densidad seca al aire y densidad seca. Densidad verde es la que posee la madera en la planta viva, que se puede considerar que se halla con su máximo volumen. Esta forma se utiliza principalmente para los cálculos de transporte de troncos hasta los sitios de elaboración.

La densidad básica es la relación entre el peso mínimo del material, es decir seco en estufa a 105-110°C, y su volumen verde, como se halla en el apeo del árbol. Es la más utilizada en la industria forestal y se usa para conocer la cantidad de masa seca del volumen verde medido en una plantación. Su uso se ha extendido a la industria de la pulpa y el papel. Por densidad seca al aire se entiende la relación natural entre el peso de una madera estacionada que se halla en equilibrio con la atmósfera, y el volumen correspondiente a esas condiciones. En general se toma que su humedad es del 12%, valor más frecuentemente encontrado en estas condiciones. La densidad seca se define como la relación entre el peso y el volumen del material exento de agua, es decir secado a 105-110°C.

La utilización de las densidades verde y seca al aire es evidente en el sentido de que son parámetros de condiciones que se dan de forma natural en el árbol verde y en la madera estacionada. Merece más explicación la utilización de la densidad básica y la densidad seca, puesto que ambos son valores artificiales.

En principio se puede decir que poseen parámetros mejor definidos que los otros dos, puesto que la densidad verde depende de las condiciones fisiológicas del árbol de acuerdo al estado fenológico en el que se encuentra, y en el caso de la densidad seca al aire sucede lo mismo, puesto que su valor dependerá del estado de la atmósfera. Tanto la densidad básica como la seca, utilizan valores extremos: la primera el peso mínimo y el volumen máximo y la segunda el peso y el volumen libre de agua.

La razón del uso de la densidad básica en ámbitos forestales es claro, porque define la relación que hay entre material seco de madera y su volumen, que es lo que se mide cuando la plantación está aún de pie. De esa manera, midiendo el volumen de madera y sabiendo su densidad básica, se conoce a cuanta madera seca co-

rresponde. Más allá de estos usos silvícola la densidad básica no genera información real sobre el material, sino de manera indirecta y por comparación. Una vez que los árboles se cortan y se estacionan, en mayor o menor medida, la humedad baja del punto de saturación de fibra y el volumen disminuye. En este estado se suele encontrar en las playas de madera de todas las industrias de elaboración. Sería lógico suponer que desde este momento se utilice la densidad seca, pues si se quiere determinar la densidad básica de madera estacionada, será necesario impregnar el material por un largo tiempo, del orden de la semana. Por lo antedicho sería sugerible la utilización de la densidad seca en el sector de elaboración de la madera, tanto aserraderos, como fábricas de pulpa. El trabajo es el mismo, porque en ambos casos se requiere secar la madera en estufa, y posee la ventaja adicional de que no hace falta mantener las muestras guardadas herméticamente hasta la determinación.

Determinación de la densidad básica a partir de muestras secas

Dado que la densidad básica es la de referencia, con frecuencia hace falta determinarla a partir de la madera estacionada. Entre los años 1985 y 2003 se realizaron en diversas oportunidades la medición de la densidad básica a partir de madera seca al aire de playas de madera. Parte de estos resultados se publicaron en la revista ATIPCA [1] [2]. Es de destacar que la medición de la densidad básica de forma directa por impregnación, es decir, midiendo peso seco y volumen verde da resultados poco confiables. Ello se debe posiblemente a la irreversibilidad de las propiedades del material en su relación con el contenido de agua.

Como en algunos casos se impregnó la madera no solamente hasta su volumen máximo, sino hasta la saturación, se cuenta con una serie de datos de peso y volumen seco y peso y volumen saturado, con los que se puede relacionar la densidad seca con la densidad básica por medio de un modelo de comportamiento de la madera del que se hablará a continuación. A partir de esos datos se tratará de definir una conversión, de tal manera de poder pasar de densidad seca a densidad básica, sin necesidad de determinar esta última.

Modelo para la determinación indirecta de la densidad de madera

Existe un modelo de funcionamiento de las relaciones entre peso, volumen y humedad de la madera, que sirve para predecir su comportamiento en general y en particular para determinar densidades sin medir volúmenes. Se utiliza con frecuencia cuando se poseen muestras de

pequeño tamaño, como los tarugos que se extraen del barrero al muestrear madera sin apearse el árbol, o en el caso de querer medir densidades de anillos de crecimiento individuales. En estos casos la medición de volumen por los métodos convencionales no da resultados confiables.

Aparece en la bibliografía a partir del método de Smith de 1954 [3] para medir densidad a partir de muestras reducidas. Se puede hallar referencias en [4] [5]. Parte de las siguientes premisas:

1) La madera está compuesta de células huecas (a los huecos de los lúmenes se los denomina macrocapilares). 2) La densidad de la pared celular como tal es constante. 3) La pared celular posee una higroscopicidad constante (denominada humedad de saturación de fibras). 4) La pared celular posee microcapilares. 5) Hay dos formas de que el agua se ubique en la madera; adsorbiéndose en los microcapilares de la pared celular o llenando los macrocapilares de los lúmenes. 6) El hinchamiento de la madera por el agua se debe a su ingreso en la pared celular hasta que se llega a la humedad de saturación de fibras. Por lo tanto, numéricamente el volumen de saturación de fibras es igual al peso de saturación de fibras. 7) Mayor cantidad de agua que ingrese va a llenar los macrocapilares aumentando el peso pero no el volumen. De las premisas antedichas se desprenden las siguientes expresiones:

$$PM = P_m + P_{sf} + P_c \quad (1)$$

Donde PM es el peso de la madera saturada o peso máximo, P_m es el peso seco o peso mínimo, P_{sf} el peso del agua para saturar las fibras, y P_c el peso del agua que llena los macrocapilares. De ella se puede calcular la diferencia de peso entre madera seca y saturada.

$$PM - P_m = \Delta P = P_{sf} + P_c \quad (2)$$

o numéricamente igual:

$$\Delta P = V_{sf} + V_c \quad (3)$$

operando se llega a las expresiones siguientes que permiten determinar los volúmenes sin medirlos experimentalmente:

$$VM = \frac{P_m}{D_p} + \Delta P - H_{sf} \times P_m \quad (4)$$

Donde D_p es la densidad de pared constante (se toma entre 1,48 y 1,53 g/cm³ según los autores), y H_{sf} es la humedad de saturación de fibras también constante (se

toma entre 0,27 y 0,35 es decir 27 a 31% base seca).

$$VM = \frac{P_m}{D_p} + \Delta P \quad (5)$$

Donde VM es el volumen saturado, es decir el volumen máximo.

De las definiciones de las densidades y operando, se puede llegar a diversas expresiones que relacionan las incógnitas con los datos que se posean en cada caso. Para las densidades básica (D_b) y seca (D_s) se obtienen las siguientes fórmulas. Se requieren conocer cuatro valores: el peso y el volumen de la muestra en condiciones de saturación y totalmente seca.

$$D_b = \frac{P_m}{\frac{P_m}{D_p} + \Delta P} = \frac{1}{\frac{1}{D_p} + \frac{\Delta P}{P_m}} \quad (6)$$

$$D_s = \frac{P_m \times D_p}{P_m + D_p (\Delta P - P_m \times H_{sf})} \quad (7)$$

y la relación entre ellas

$$D_b = \frac{D_s}{1 + (D_s \times H_{sf})} \quad (8)$$

De conocerse los dos volúmenes, máximo y mínimo, se puede utilizar la fórmula de conversión siguiente:

$$D_b = D_s \times \frac{V_m}{VM} \quad (9)$$

Es oportuno destacar que en este estudio se realizaron todas las determinaciones llevando las muestras de madera desde su estado seco al aire hasta el de máximo volumen. Necesariamente deberá ser completado oportunamente con las determinaciones de relación de los dos tipos de densidades desde el volumen verde original hasta el estado seco.

MATERIALES Y MÉTODOS

Utilizando las expresiones anteriores se calcularon las densidades secas y básicas para cada muestra y se relacionaron. De las cerca ciento cincuenta determinaciones efectuadas en el período, antedicho, se van a utilizar solamente las series que se realizaron a temperatura no mayor de 60°C y a presión atmosférica. En condiciones más drásticas, aunque la impregnación máxima se consi-

guió en poco tiempo, se observó considerable disolución de componentes de la pared celular, particularmente del complejo hemicelulosa–lignina. Hay indicios, además, de que en estas condiciones se modifica la estructura interna del material, y por ende no mantienen necesariamente el comportamiento del modelo. Recientemente *Trugilho et al.* hallaron la misma problemática al tratar de impregnar madera en condiciones drásticas para determinar densidad básica, y obtuvieron valores menores por este camino. [6]

La mayoría de las determinaciones se realizaron sobre especies del género *Eucalyptus* provenientes de la provincia de Misiones y norte de Corrientes. La especie más abundante fue *E. grandis*, aunque hay también *E. camaldulensis*. Muchas de las muestras, especialmente de las plantaciones más antiguas, cuyas semillas provenían de Río Claro Brasil, son de plantaciones de híbridos naturales de padres indeterminados.

En una última serie, realizada ex profeso para este trabajo, se seleccionaron maderas de la dendrooteca del PRO-CYP realizando la selección con el criterio de abarcar un amplio espectro de densidades. Las especies utilizadas en este caso fueron principalmente de latifoliadas de la Selva Paranaense, agregándose *E. grandis* de la provincia de Entre Ríos y *E. globulus* del sudeste de la provincia de Buenos Aires, y *Pinus ellioti* de Misiones. La lista de las especies utilizadas se describen en la Tabla N° 1.

TABLA N° 1. Lista de especies utilizadas.

Nombre	Procedencia	N° de especímenes
<i>Araucaria angustifolia</i>	Prov. de Misiones	2
<i>Cecropia adenopus</i>	Prov. de Misiones	1
<i>Didimopanax morototoni</i>	Prov. de Misiones	1
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Prov. de Corrientes	4
<i>Eucalyptus cinerea</i>	Prov. de Bs. As.	1
<i>Eucalyptus dunnii</i>	Prov. de Bs. As.	2
<i>Eucalyptus globulus</i>	Prov. de Bs. As.	2
<i>Eucalyptus grandis</i>	Prov. Mis., Corr. y E.R.	12
<i>Eucalyptus</i> sp.	Prov. Mis., Corr. y E.R.	20
<i>Eucalyptus viminalis</i>	Prov. de Bs. As.	2
<i>Gleditzia triacanthos</i>	Prov. de Bs. As.	1
<i>Ocotea suaveolens</i>	Prov. de Misiones	1
<i>Pinus ellioti</i>	Prov. de Misiones	2
<i>Salix</i> sp.	Delta del Paraná	1
<i>Schinopsis</i> sp.	Prov. de Sgo. del Estero	1
<i>Solanum leprosum</i>	Prov. de Misiones	1
<i>Trema micrantha</i>	Prov. de Misiones	1

Se utilizaron dos métodos para la medición de volúmenes de acuerdo al equipamiento del sitio de realización. El primero es el de desplazamiento. Se llena hasta

el rebalse un recipiente espacialmente preparado y se coloca encima de un embudo que lo excede en su diámetro. Se toma una rodaja de madera exenta de humedad y se la pesa. A continuación se introduce en el recipiente con agua, se junta el volumen rebalsado que se mide en una probeta, y se vuelve a pesar. Se calcula el volumen sumando el peso del líquido desplazado más la diferencia de peso de la rodaja antes y después de la inmersión.

Es de destacar que la norma TAPPI correspondiente T 258-om 94, cubre las rodajas secas con parafina para evitar la absorción de agua. Se ha comprobado que, en las condiciones utilizadas, ello no es necesario si se realiza la corrección de peso (1) (2). Comparando las densidades obtenidas en cuerpos geométricos de madera de volumen conocido, los resultados son iguales hasta la centésima de g/cm^3 .

El segundo método utiliza el principio de Arquímedes: Se coloca encima de la balanza un recipiente con agua en el que se puedan sumergir las rodajas y se lleva la tara a cero. Se clava en la rodaja, pesada en estado seco, un tridente para sujetarla y se introduce en el líquido midiendo el peso en la balanza. Se considera como volumen la diferencia entre el peso en el aire y el peso en el agua. El tridente consiste en una varilla rígida que termina en un extremo en tres puntas dirigidas hacia abajo formando un triángulo equilátero. Las puntas se clavan en el corte transversal de la rodaja.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla N° 2, dividida en dos partes y ubicada en el anexo al fin del trabajo, se enumeran los datos experimentales de densidades, como así también los valores correspondientes de las distintas expresiones utilizadas para relacionarlos.

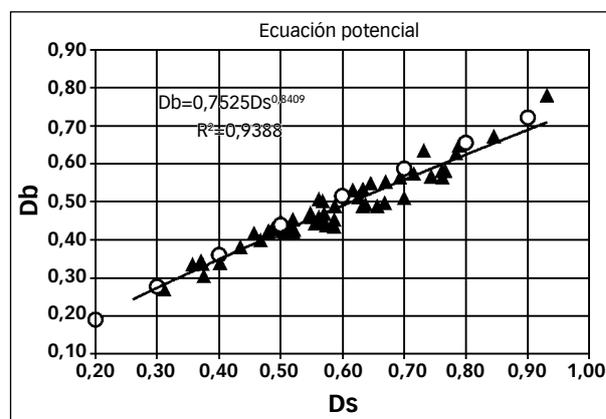


FIGURA 1. Relación entre densidad básica y densidad seca de las muestras estudiadas (triángulos rellenos), y la curva correspondiente (línea negra) cuya ecuación figura en el ángulo superior derecho. Los puntos blancos corresponden a la curva teórica del modelo, ecuación [7].

En el gráfico de la Figura N° 1 se muestra la relación entre densidad básica y densidad seca de todas las muestras consideradas en este análisis.

Se puede observar que los 55 puntos se distribuyen de manera que pueden ser representados por la ecuación (10) que es de tipo potencial, con un coeficiente de correlación de 0,9388. Se ve también que el alejamiento de la curva de la ecuación empírica del comportamiento teórico, representada por los puntos blancos, tiende a aumentar con la densidad. Esta diferencia comienza con 0,01 g/cm³ y llega a densidad seca de 0,90 a 0,03 g/cm³.

$$Db = 0,7525.Ds^{0,8409} \quad R^2 = 0,9388 \quad (10)$$

Se puede utilizar una ecuación lineal para representar los valores empíricos hallados, que da un coeficiente de correlación algo menor, 0,9333 pero, como se ve en la Figura N° 2, representa mejor la ubicación de los pares de valores de densidades altas. Al margen de que la ecuación teórica del modelo utilizada, es decir la (8) no es lineal, las diferencias están en el orden de una o dos centésimas, por lo que resulta conveniente su utilización para la conversión de densidades. La ecuación lineal aludida es la (11), que se representa por círculos blancos en el gráfico de la Figura N° 2.

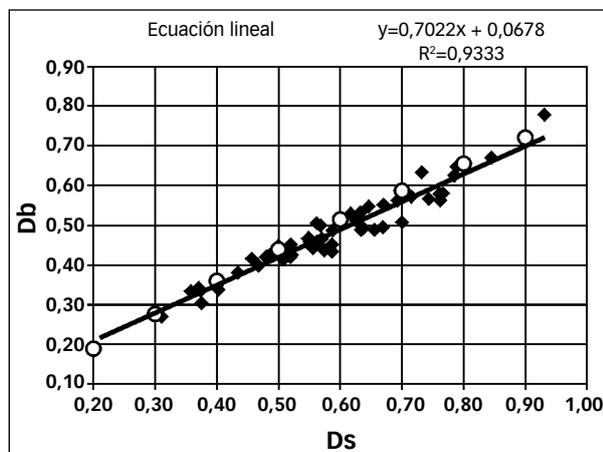


FIGURA 2. Relación entre densidad básica y densidad seca de las muestras estudiadas (triángulos rellenos), y la curva correspondiente (línea negra) cuya ecuación figura en el ángulo superior derecho. Los puntos blancos corresponden a la curva teórica del modelo, ecuación [7].

$$Db = 0,7022 \times Ds + 0,0678 \quad R^2 = 0,9333 \quad (11)$$

En primera instancia se puede decir que los pares de valores de los dos tipos de densidades, se correlacionan siguiendo una función que se puede representar de forma ajustada a través de expresiones tanto potencial como lineal.

Con respecto al modelo de comportamiento de la ma-

dera, es notorio que se aproxima de manera apreciable al real, como se puede observar comparando las dos últimas columnas de la derecha de la Tabla N° 1. Las diferencias se pueden modificar variando el valor de la constante de humedad de saturación de fibras de la ecuación teórica, que para estos cálculos se tomó como 29,0%.

Cuando se utilizan valores diferentes, por ejemplo 27% que es el valor que se puede obtener utilizando los datos reales, u otros mayores como 33%, las diferencias de la última columna se modifican según el tipo de las ecuaciones, aumentando en un rango y disminuyendo en otro, siendo dichas variaciones del orden de 1 a 3 centésimas de g/cm³.

Puesto que las determinaciones de densidad se pueden considerar como destructivas, en el sentido que la misma muestra no puede medirse más de una vez, no es fácil determinar la reproductibilidad de los métodos utilizados. Sin embargo la determinación de densidades en rodajas sucesivas, que se han realizado en el desarrollo del trabajo en madera de *Eucalyptus grandis*, dan diferencias del orden de 1 a 1,5 centésimas de g/cm³, es decir del orden de más de la mitad de la diferencias observadas entre el comportamiento real y el teórico.

Analizando la importancia de las diferencia implicadas, es decir 1 a 3 centésimas de g/cm³, en el control y utilización de la madera en los procesos de elaboración, se entiende que no son de significancia, y por lo tanto la expresión de conversión empírica entre densidad seca y densidad básica se puede tomar como una herramienta válida para transformar una en otra.

Es importante destacar que la similitud entre el comportamiento real y el del modelo de comportamiento de las maderas estudiadas, da fundamento a la validez de la ecuación empírica.

Con respecto al desvío mayor de los datos de densidades más altas, se podría justificar atendiendo a la dificultad de impregnar la maderas muy densas. Para el caso de la industria papelera ello no posee relevancia, puesto que no utilizan maderas de tan altas densidades.

Por lo tanto el presente trabajo propone utilizar la Tabla N° 3 para la conversión de densidades secas a densidades básicas, a partir de la determinación de la densidad seca.

CONCLUSIONES

La determinación de densidades secas y básicas de 55 muestras de madera de diversas densidades, se pudieron relacionar con expresiones potenciales y lineales con coeficientes de correlación mayores a 0,93.

Se propone elegir para la conversión de una forma de

TABLA N° 3. Tabla propuesta para la conversión de densidades secas a densidades básicas.

Ds	Db	Ds	Db	Ds	Db
0,20	0,20	0,46	0,40	0,72	0,57
0,22	0,22	0,48	0,41	0,74	0,58
0,24	0,24	0,50	0,43	0,76	0,59
0,26	0,25	0,52	0,44	0,78	0,61
0,28	0,27	0,54	0,45	0,80	0,62
0,30	0,28	0,56	0,47	0,82	0,63
0,32	0,30	0,58	0,48	0,84	0,64
0,34	0,31	0,60	0,49	0,86	0,66
0,36	0,33	0,62	0,50	0,88	0,67
0,38	0,34	0,64	0,52	0,90	0,68
0,40	0,36	0,66	0,53	0,92	0,69
0,42	0,37	0,68	0,54	0,94	0,70
0,44	0,38	0,70	0,56	0,96	0,72

densidad a otra la expresión lineal, que se acerca algo más a los valores reales en el rango de las altas densidades.

Se propone esta expresión para su uso en los ámbitos que la requieran, como los sectores de materia prima de los empresas de elaboración de la madera.

Se hallaron valores similares de conversión utilizando el modelo de comportamiento de la madera con el agua, existiendo, en el rango de densidades papeleras, diferencias entre la expresión empírica y la teórica de entre 0 y 3 centésimas de g/cm³. Estas diferencias reducidas entre el comportamiento real y teórico corroboran la validez de la expresión hallada.

La fórmula propuesta de conversión es la siguiente:

$$Db = 0,7525.Ds^{0,8409} \quad R^2 = 0,9388$$

REFERENCIAS

1. Núñez, Carlos Eduardo; Ely, Rubén

“Medición de Densidades de Madera de Eucalyptus Utilizada para Pasta, Provenientes de Misiones y Norte de Corrientes I. Métodos”. ATIPCA, Año 27, N° 3 - Págs. 28 a 34. 1988.

2. Núñez, Carlos Eduardo; Ely, Rubén; Pascutti, Roberto

“Medición de Densidades de Madera de Eucalyptus Utilizada para Pasta, Provenientes de Misiones y Norte de Corrientes. II Valores, Variabilidad y Tipos”. ATIPCA. Año 28, N° 3. 1989.

3. Smith, D. M.

1954. “Maximun moisture content method for determining specific gravity of small wood samples”. Forest Products Laboratory. Forest Service. Wisconsin, USA.

4. Jugo Ilic; Boland, Doug; McDonald, Maurice; Downes, Geoff; Blakemore, Philip

“Woody Density”. Technical Report N° 18. 1999. The Australian Greenhouse Office. National Carbon Account-

ing System. www.greenhouse.gov.au/ncas.

5. Schmidt, Ron E.

“A Method for Determining the Moisture Content and Specific Gravity of Wood Chips in a Pressured Water System”. TAPPI 51 N° 4, p.164. 1968.

6. Trugilho, P. F.; Lima, J. T.; Regazzi, A. J.; Moreira da Silva, J. R.

“Efeito da Agua Quente e Pressão na Determinação da Densidade Básica de Madeira”. Scientia Forestalis N° 62, ps. 40 a 47. Brasil. 2002.

Recibido: 07/12/06.

Aprobado: 27/09/07.

• Carlos Eduardo Núñez.

Técnico Químico (especializado en anatomía y química de la madera y en pulpados químicos.). Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Misiones, siendo cofundador del Programa de investigación de Celulosa y Papel, PROCYP, dependencia en la que sigue trabajando en la actualidad. Investigador Sin Categoría. Tiene realizados unos cuarenta trabajos de investigación.

ANEXO

TABLA N° 2. Valores experimentales de densidades y de las expresiones que los relacionan.

Ds Exper. (1)	Db Exper (2).	Ec. empír. potenc. (3)	Diferen. (3) – (2)	Ec. empír. lineal (4)	Diferen. (4) – (2)	Ec. teórica (5)	Diferen. (5) – (4)
0,31	0,27	0,282	0,01	0,286	0,02	0,286	0,00
0,38	0,30	0,330	0,03	0,331	0,03	0,340	0,01
0,36	0,33	0,317	-0,02	0,319	-0,02	0,325	0,01
0,37	0,34	0,329	-0,01	0,330	-0,01	0,338	0,01
0,40	0,34	0,350	0,01	0,350	0,01	0,362	0,01
0,37	0,34	0,327	-0,02	0,328	-0,01	0,336	0,01
0,43	0,38	0,373	-0,01	0,373	-0,01	0,387	0,01
0,47	0,40	0,397	0,00	0,396	0,00	0,414	0,02
0,51	0,41	0,426	0,01	0,424	0,01	0,445	0,02
0,46	0,42	0,389	-0,03	0,389	-0,03	0,405	0,02
0,51	0,42	0,425	0,01	0,424	0,01	0,445	0,02
0,52	0,42	0,434	0,01	0,433	0,01	0,454	0,02
0,48	0,42	0,405	-0,01	0,404	-0,02	0,423	0,02
0,50	0,42	0,422	0,00	0,421	0,00	0,442	0,02
0,48	0,42	0,407	-0,01	0,406	-0,02	0,424	0,02
0,51	0,42	0,428	0,00	0,427	0,00	0,448	0,02
0,52	0,43	0,435	0,01	0,434	0,01	0,455	0,02
0,49	0,43	0,411	-0,02	0,410	-0,02	0,429	0,02
0,59	0,43	0,480	0,05	0,480	0,05	0,505	0,03
0,52	0,44	0,431	0,00	0,430	-0,01	0,451	0,02
0,57	0,44	0,472	0,03	0,471	0,03	0,496	0,02
0,56	0,44	0,459	0,02	0,458	0,02	0,482	0,02
0,57	0,45	0,467	0,02	0,466	0,02	0,491	0,02
0,50	0,45	0,420	-0,03	0,419	-0,03	0,439	0,02
0,59	0,45	0,481	0,03	0,480	0,03	0,505	0,03
0,52	0,45	0,434	-0,02	0,433	-0,02	0,454	0,02
0,55	0,46	0,455	0,00	0,454	0,00	0,478	0,02
0,56	0,46	0,464	0,00	0,462	0,00	0,487	0,02
0,57	0,47	0,469	0,00	0,468	0,00	0,493	0,02
0,55	0,47	0,454	-0,01	0,452	0,01	0,476	0,02
0,55	0,47	0,454	-0,01	0,453	0,02	0,476	0,02
0,59	0,49	0,481	-0,01	0,481	0,01	0,506	0,03
0,63	0,49	0,512	0,02	0,512	0,02	0,539	0,03
0,66	0,49	0,528	0,04	0,529	0,04	0,556	0,03
0,64	0,49	0,515	0,02	0,515	0,02	0,542	0,03
0,67	0,50	0,536	0,04	0,537	0,04	0,565	0,03
0,57	0,50	0,468	-0,03	0,467	0,03	0,491	0,02
0,56	0,51	0,463	-0,04	0,462	0,04	0,487	0,02
0,70	0,51	0,558	0,05	0,559	0,05	0,587	0,03
0,63	0,51	0,507	0,00	0,507	0,00	0,534	0,03
0,62	0,53	0,501	-0,03	0,501	0,03	0,528	0,03
0,63	0,53	0,512	-0,02	0,512	0,02	0,539	0,03
0,65	0,55	0,521	-0,03	0,521	0,03	0,548	0,03
0,67	0,55	0,537	-0,01	0,538	0,01	0,566	0,03
0,76	0,56	0,599	0,04	0,603	0,04	0,630	0,03
0,69	0,56	0,553	-0,01	0,554	0,01	0,582	0,03
0,74	0,57	0,587	0,02	0,590	0,02	0,618	0,03
0,72	0,57	0,568	0,00	0,570	0,00	0,598	0,03
0,76	0,58	0,598	0,02	0,602	0,02	0,629	0,03
0,77	0,58	0,601	0,02	0,606	0,03	0,633	0,03
0,78	0,63	0,614	-0,01	0,619	0,01	0,645	0,03
0,73	0,63	0,579	-0,05	0,582	0,05	0,609	0,03
0,79	0,65	0,616	-0,03	0,621	0,03	0,648	0,03
0,85	0,67	0,653	-0,02	0,661	0,01	0,685	0,02
0,93	0,78	0,709	-0,07	0,722	0,06	0,740	0,02

Referencias: La primera columna representa los valores experimentales de densidad seca (Ds), y la segunda a las densidades básicas (Db) experimentales correspondientes. La tercer columna da los valores de la ecuación empírica potencial que correlaciona los pares de valores experimentales. La cuarta columna da las diferencias entre los valores de la ecuación potencial y los correspondientes experimentales. En la quinta columna se muestran los valores que da la ecuación empírica lineal y en la siguiente las diferencias entre éstos y los valores experimentales. En la ante última columna se listan los valores que resultan de utilizar la ecuación (8) del modelo de comportamiento agua-madera, y en la última las diferencias para las distintas densidades entre la ecuación teórica y la empírica lineal.