

Estimativa da umidade de equilíbrio da madeira de *Hymenolobium heterocarpum* Ducke para o Sul de Tocantins

Marcelle Teodoro Lima^{*1}, Edy Eime Pereira Baráuna², Duam Matosinhos de Carvalho³, Thiago Campos Monteiro²

Resumo

O objetivo deste estudo foi determinar a umidade de equilíbrio da madeira de *Hymenolobium heterocarpum* e compará-la com a estimada pela equação de Enderby-King, visando determinar se tal equação estima com precisão a umidade de equilíbrio dessa espécie para a região Sul do estado de Tocantins. Para determinar a umidade de equilíbrio da madeira foram utilizadas vinte e quatro amostras, sendo doze secas ao ar livre e doze secas em estufa; tais amostras foram expostas durante o período de um ano em ambiente interno e externo, sendo obtido o valor médio de 10,59%. Quanto à estimativa da umidade de equilíbrio da madeira foram empregados os valores de temperatura e umidades relativas por meio dos dados climáticos da região sul de Tocantins e do Município de Gurupi – TO, obtendo-se 13,64%. Os resultados permitiram concluir que a madeira de *Hymenolobium heterocarpum* tende a atingir valores semelhantes de umidade de equilíbrio tanto quanto seca artificialmente ou ar livre e exposta às diferentes condições. As médias de umidade de equilíbrio apresentadas pela equação foram superiores à umidade de equilíbrio real da madeira. Portanto, conclui-se que a equação estudada superestima a umidade de equilíbrio da madeira de *Hymenolobium heterocarpum* armazenadas no sul do estado de Tocantins, tanto quanto a secagem das amostras ao ar livre e em estufa quanto à exposição das amostras em ambiente interno e externo, não fornecendo referenciais consistentes para utilização de tal equação para região e espécie apresentada.

Palavras-chaves: Água e madeira. Equação. Higroscopicidade.

Estimate of the equilibrium moisture of wood *Hymenolobium heterocarpum* Ducke for the south Tocantins

Abstract

The objective of this study was to determine the equilibrium moisture content of *Hymenolobium heterocarpum* and to compare it with that estimated by the Enderby-King equation, in order to determine if this equation accurately estimates the equilibrium moisture of this species for the southern region of the state of Tocantins. Twenty-four samples were used to determine the equilibrium moisture content of the wood.

¹Mestre em Sustentabilidade na Gestão Ambiental pela Universidade Federal de São Carlos (UFCar).

^{*}Autor para correspondência: marcelleteodoro@yahoo.com.br

²Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira, professor do curso de engenharia florestal da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

³Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Tocantins (UFT)

Recebido para publicação em 25 de janeiro de 2017

Aceito para publicação em 02 de outubro de 2017

Twelve were dried in the open air and twelve were dried in an oven, so the samples were exposed during one year in an internal and external environment. 10.59%. Regarding the estimation of the equilibrium moisture of the wood, the values of temperature and relative humidity were used by means of climatic data of the southern region of Tocantins and of the Municipality of Gurupi - TO, obtaining 13.64%. The results allowed to conclude that *Hymenolobium heterocarpum* wood tends to reach similar values of equilibrium moisture as much as it dries artificially or outdoors and exposed to different conditions. The means of equilibrium moisture presented by the equation was higher than the real equilibrium moisture content of the wood. Therefore, it is concluded that the studied equation overestimates the equilibrium moisture content of *Hymenolobium heterocarpum* wood stored in the southern state of Tocantins, as well as the drying of the samples in the open air and in the greenhouse, as well as the exposure of the samples in internal and external environment, not providing consistent references for the use of such equation for region and species presented.

Keywords: Water and wood. Equation. Hygroscopicity.

Introdução

A relação água e madeira tem sido estudada cientificamente há pelo menos um século (ENGELUND *et al.*, 2013). A madeira serrada possui um determinado conteúdo de água e, sendo constituída por células porosas, sua evaporação acontecerá até que seja atingido um equilíbrio entre a atmosfera envolvente e a madeira em serviço. Nessa situação, define-se a Umidade de Equilíbrio da Madeira - UEM (WENGER, 2005).

O teor de umidade da madeira quando em serviço sofre variações em função da umidade relativa e da temperatura ambiental em que se encontra a peça (SKAAR, 1988). A madeira quando em uso está sujeita a ocorrência de alterações dimensionais e deformações decorrentes das interações com a atmosfera (KILIC; NIEMZ, 2012). Por ser um material higroscópico, a UEM sofre variações conforme a variação da umidade relativa do ar e temperatura, resultando em encolhimentos e expansões na madeira.

É imprescindível ter a umidade da madeira perto da umidade de equilíbrio do ar. Se não estiverem próximos, ocorrerão significativos efeitos de contração e inchamentos à medida que a madeira ganha ou perde umidade para ficar em equilíbrio com o ambiente (BODIGN; JAYNE, 1993). O conhecimento da variação da umidade é importante, como por exemplo, para a construção de móveis quando a madeira deve ter um adequado teor de umidade, pois, de outra forma, as juntas e encaixes se abrem, as gavetas afrouxam e os painéis empenam (MARTINS, 1988). Ainda, segundo Galvão (1975), também se pode observar os tacos de assoalho que empenam e se soltam, portas que não fecham, gavetas emperradas, partes de móveis que se deslocam e rachaduras na madeira em geral, dentre outros problemas.

A umidade da madeira deve estar em equilíbrio com as condições atmosféricas da região em que a mesma será utilizada. De acordo com Baraúna e Oliveira (2009), a determinação da umidade de equilíbrio da madeira deve ser feita para o local onde a mesma será empregada. Este parâmetro pode ser conseguido com o uso de amostras de madeira expostas às condições ambientais de temperatura e umidade relativa, sendo obtida através de ensaios de campo, secador artificial, câmara de climatização ou estimativas por meio de equações.

Atualmente existem equações que estimam a UEM que consideram as variações de temperatura e umidade relativa aos processos de absorção, adsorção e dessorção, independentemente da espécie (BARONAS *et al.* 2001; MENDES; ARCE 2003; CHEN *et al.* 2009) e diversos autores vêm empregando-as em várias cidades brasileiras, entretanto, podem haver eventuais diferenças entre valores de umidade de equilíbrio estimados por equações e os valores reais devido a isso; há uma necessidade de analisar se tais equações de predição superestimam ou subestimam o valor real de UEM.

A maioria dos modelos de estimativa da UEM emprega a teoria de sorção da água na madeira proposta por Hailwood e Harrobin considerando um ou dois hidratos (MARTINS *et al.*, 2003; BARAÚNA; OLIVEIRA, 2009; PÉREZ-PEÑA *et al.*, 2011). No entanto, existem outras equações que podem ser aplicadas nas diferentes condições climáticas brasileiras, em função das parametrizações de coeficientes numéricos vinculados a temperatura do ar.

O objetivo com esse estudo foi determinar a umidade de equilíbrio para a madeira

de *Hymenolobium heterocarpum* Ducke (angelim-pedra) e compará-la com a estimada pela equação de Enderby-King, visando determinar se tal equação estima com precisão a umidade de equilíbrio dessa espécie para a região sul do estado de Tocantins.

Material e métodos

Para realização desta pesquisa, o Instituto Natureza do Tocantins – NATURATINS e Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA autorizaram a retirada de três árvores de angelim-pedra de uma floresta natural localizada no município de Gurupi – TO. As árvores possuíam em média 6,3661 de diâmetro e 4 metros de altura. A madeira de angelim-pedra é largamente comerciável em Tocantins, sendo com frequência utilizada para a fabricação de portas e janelas.

O município de Gurupi, situado no sul do Estado, é um local de clima tropical megatérmico. Quente e úmido durante todo o ano, com período chuvoso entre os meses de outubro e abril e estiagem entre os meses de maio a setembro.

As amostras foram confeccionadas com oito repetições por árvore, resultando em vinte e quatro amostras de dimensões de 2,5 x 5,0 x 2,5, sendo doze dessas secas ao ar livre e doze secas em estufa. As peças de madeira para a secagem artificial permaneceram numa estufa com circulação de ar por um período de três dias a uma temperatura de 60°C. Transcorrido esse tempo, as mesmas tiveram seu teor de umidade determinado por pesagem, obtendo-se a média de 10% de umidade.

Após a secagem, as amostras tanto da secagem natural ao ar livre e secagem em estufa foram acondicionadas, até massa constante, numa caixa de aclimatização com circulação de ar interno. As amostras permaneceram na caixa por um período de quinze dias, até as amostras de ambas as secagens obterem uma umidade de equilíbrio de 12% ($\pm 1\%$), pois se utilizou a metodologia descrita por Perman (1958), com modificações; para isso foi adaptada uma caixa

acrílica, onde no seu interior foi adicionado Nitrato de Amônia (NH_4NO_3) e água (H_2O), quando estes, submetidos a uma temperatura de 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), tendem a manter no interior da caixa uma umidade de 60% ($\pm 5\%$). Logo, doze foram expostas em um local fechado (ambiente interno) e as outras doze amostras foram expostas em local aberto, porém, abrigadas da chuva e da radiação solar direta (ambiente externo). Das 12 amostras colocadas em cada um dos ambientes, seis foram secas ao ar e seis submetidas a secagem artificial.

Durante o período em que as amostras estiveram em ambiente interno e externo, as mesmas foram pesadas periodicamente em balança eletrônica digital para determinação da massa úmida (m_u) por um período de 12 meses e, enquanto ocorria o procedimento de pesagem, as amostras eram acondicionadas para evitar trocas de umidade com o ambiente. Nesta condição, a amostra teve sua massa de equilíbrio registrado e dava-se sequência a próxima pesagem. Transcorrido este tempo, as amostras foram levadas para a secagem em estufa a 105 (± 2)°C obtendo-se a massa seca (m_s), quando a massa ficou constante. A UEM com o ambiente foi obtida pela relação entre a massa de água contida no interior do corpo-de-prova e a massa do corpo-de-prova seco.

Para a estimativa da umidade de equilíbrio, foram empregados os valores de temperaturas e umidades relativas por meio dos dados climáticos de 1961 a 1990 da região sul do Tocantins, obtidos através das Normais Climatológicas Brasileiras contida no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 1992), e os dados climáticos de 2006 a 2012 para o Município de Gurupi - TO, obtidos por meio da estação Agrometeorológica da UFT, *Campus* de Gurupi.

A cidade localiza-se no sul do estado de Tocantins, apresenta uma latitude de 11°43'45" e longitude 49°04'07" W com altitude média de 278 m. A temperatura média anual do município é de 25,65°C com precipitação média anual de 188,4 mm.

Foi empregada a equação de Enderby-King para estimar a UEM, sendo apresentada a seguir.

$$M = m_0 + \left\{ \left[\frac{a * K_1 * K_2 * h}{1 * K_1 * K_2 * h} \right] + \left[\frac{b * K_2 * h}{1 - K_2 * h} \right] \right\}$$

Em que:

M= umidade de equilíbrio da madeira

$$a = 1,039 + 0,0212 C$$

$$b = 0,587 - 0,000609 C$$

$$K_1 = 2,71 + 0,00915 C - 0,000423 C$$

$$K_2 = 0,827 + 0,000607 C$$

$$m = 7,75 - 0,0234 C - 0,000234 C$$

C= temperatura em graus Celsius

h= pressão relativa de vapor d'água (U/100).

Os resultados obtidos foram submetidos à ANOVA, e, caso o teste ter sido significativo, foi realizado posteriormente o Teste de média de Tukey, para indicar a diferença entre as áreas.

Resultados e discussão

A variação média mensal da umidade de equilíbrio para a madeira de angelim-pedra com diferentes tipos de secagem e exposta em ambiente interno e externo abrigadas da chuva e da radiação solar direta, assim como a estimativa da UEM por meio da equação de Enderby-King, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Umidade de equilíbrio (%) para a madeira de angelim-pedra com diferentes tipos de secagem exposta em dois ambientes e UEM estimada pela equação de Enderby-King.

Meses	Ambiente Interno S-AL	Ambiente Interno S-EX	Ambiente Externo S-AL	Ambiente Externo S-EX	Enderby-King
Jan	13,58	12,45	12,33	11,82	15,93
Fev	13,22	11,99	11,75	11,24	16,5
Mar	13,06	11,91	11,51	11,06	16,79
Abr	12,35	11,09	10,74	10,36	15,79
Mai	11,8	10,77	10,56	10,14	13,92
Jun	10,66	9,93	9,68	9,35	12,15
Jul	9,39	8,81	8,81	8,53	10,81
Ago	8,52	8,02	8,15	7,93	9,48
Set	7,18	6,15	7,13	6,47	9,54
Out	10,68	9,33	11,04	10,07	12,23
Nov	11,89	10,67	11,83	11,14	14,69
Dez	12,5	11,38	11,11	10,56	15,83
Média	11,24a	10,21a	10,39a	9,89a	13,64b
Mínimo	7,18	6,15	7,13	6,47	9,48
Máximo	13,58	12,45	12,33	11,82	16,79
Desvio Padrão	2,0	1,85	1,61	1,56	2,7
CV (%)	17,84	18,17	15,55	15,82	19,81

S - AL = secas ao ar livre, S - E = secas em estufa, CV = coeficiente de variação em porcentagem. Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2017

Analisando os resultados na Tabela 1, foi observado que os valores médios da UEM para as amostras secas em estufa, no ambiente interno e externo, foram de 10,21% e de 9,89% respectivamente. Já as amostras secas ao ar livre, nos mesmos ambientes, apresentaram UEM de 11,24% no ambiente interno e de 10,39% para o ambiente externo. Os resultados permitem concluir que a madeira de angelim-pedra tende a atingir valores semelhantes de umidade de equilíbrio tanto quanto seca artificialmente ou ar livre e exposta às diferentes condições. A média geral de UEM foi de 10,43%, portanto, realizando a secagem da madeira de angelim-pedra na região sul de Tocantins até teores em torno de 10% de umidade sua utilização será otimizada. Nestas condições, a madeira não sofrera contrações, sofrendo apenas expansão que será reduzida devido ao efeito da sua histerese.

Ainda que não tenha diferenciado estatisticamente, foi observada uma variação entre os diferentes tipos de secagem da madeira, porque provavelmente, a secagem artificial interferiu na redução da capacidade da madeira em ganhar ou perder água para o ambiente. Em observações experimentais de secagem da madeira há dificuldade de alcançar, manter e estimar a UEM. Landry (2005), relata que as rampas de temperatura usadas em estufas e em outros métodos são de grande importância e os usos de taxas elevadas de resfriamento ou aquecimento podem dar resultados duvidosos quanto a UEM.

Galvão e Jankowsky (1985) relataram que se elevando a temperatura da madeira ocorrem dois efeitos na isoterma da sorção. O primeiro efeito é a imediata redução da UEM a uma umidade relativa dada, sendo, então, um efeito provisório, reversível. O segundo efeito é uma redução permanente na higroscopicidade depois que a madeira retorna às temperaturas normais, ou seja, depende da temperatura e da duração da exposição a esta temperatura. Segundo Jankowsky (1985), em um de seus experimentos que utilizou madeira de *Pinus* para avaliar a variação sazonal da umidade de equilíbrio o longo do ano, observou que a madeira submetida a secagem artificial apresentou menor higroscopicidade do

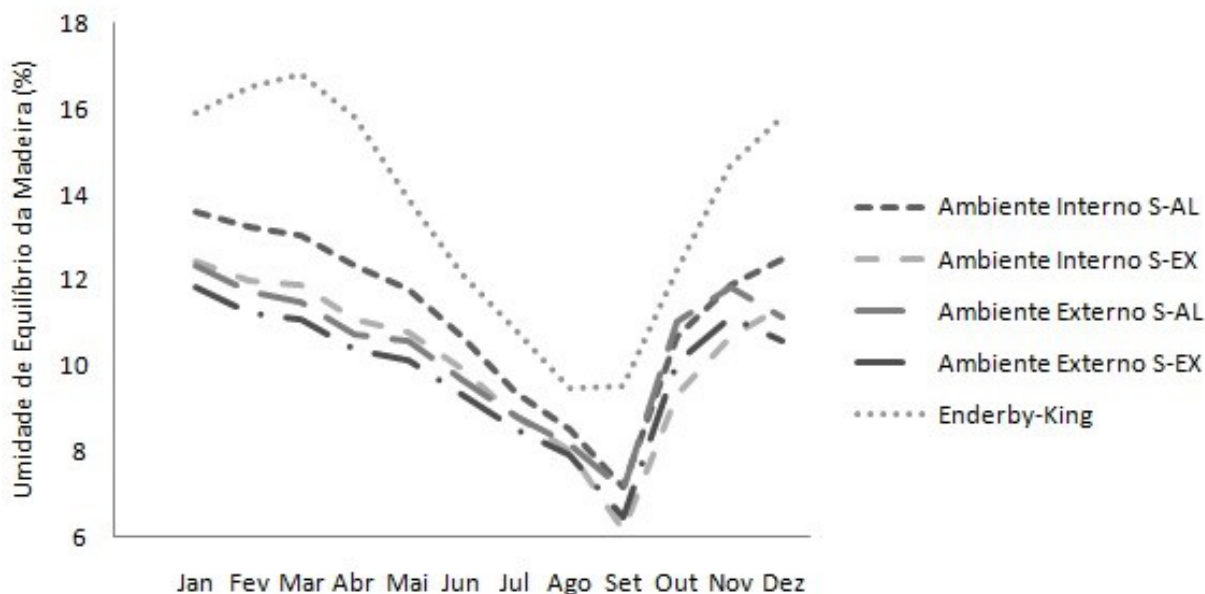
que a madeira seca ao ar quando exposta ao ambiente.

Conforme as condições de secagem, determinados constituintes químicos da madeira podem sofrer degradação ou mesmo volatilizarem. Geralmente, os compostos higroscópicos como as hemiceluloses são os primeiros a serem degradados. Skaar (1988), relata que a diminuição da higroscopicidade encontra-se associada a uma decomposição parcial da estrutura química da madeira devido à degeneração térmica das hemiceluloses, que é um dos constituintes principais da parede celular.

Percebe-se também, quanto ao tipo de ambiente em que as amostras foram expostas, que os valores de UEM obtidos foram menores para o ambiente externo quando comparados aos valores obtidos no ambiente interno (TABELA 1). Devido à higroscopicidade a madeira trocará constantemente de umidade com o ar ambiente. A maior circulação de ar no ambiente externo bem como a maior exposição a maiores temperaturas resultam em menor umidade de equilíbrio. Engelund *et al.* (2013) relatam que é duvidoso o equilíbrio da umidade da madeira em condições reais de uso, pois o equilíbrio demora um longo tempo para ser alcançado e a natureza das condições circundantes do ambiente como a umidade do ar são tipicamente variáveis.

Observa-se na Tabela 1 que a média anual de UEM para o município de Gurupi - TO estimada pela equação de Enderby-King foi igual a 13,64%, sendo que a mínima (9,48%) ocorreu em agosto e a máxima ocorreu no mês de março (16,79%). A equação descrita por Enderby-King (GRÁFICO 1) superestimou em média 22,28% para a madeira exposta em ambiente interno com secagem ao ar livre e, para secagem em estufa, superestimou em média 34,84%. No ambiente externo com secagem ao ar livre, a equação superestimou em média 31,84% e, com secagem em estufa 38,55%. Os resultados da estimativa de Enderby-King se diferenciaram estatisticamente dos encontrados em ensaio, tanto nos diferentes tipos de secagem como na exposição da madeira em ambiente interno e externo.

GRÁFICO 1 - Variação média da UEM de angelim-pedra com diferentes tipos de secagem e exposição e UEM estimada pela equação de Enderby-King.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017.

O município de Gurupi – TO possui condições climáticas particulares, com elevadas temperaturas e índice de precipitação. Sabe-se que a equação de Enderby-King foi desenvolvida para países temperados, com condições climáticas diferentes de Tocantins, além disso, foram utilizados nos experimentos espécies de coníferas. No entanto, Engelund *et al.* (2013) relatam que uma equação pode ser aplicada considerando uma única célula ou a própria parede celular. Outros trabalhos desenvolvidos no Brasil também encontraram o mesmo comportamento das equações quando comparadas com a UEM determinada.

Galvão (1975) quando em sua pesquisa estimou a UEM em doze cidades do Brasil, sendo Goiânia a cidade mais próxima do estado de Tocantins. Por meio da equação de Simpson, a média estimada de UEM para Goiânia foi 13,2%. Apesar de não ser usada neste trabalho a equação de Simpson, observa-se que o valor estimado também superestimou o valor real para a região sul do estado de Tocantins. Mendes e Arce (2003) quando realizaram uma análise comparativa das principais equações empregadas para estimar a UEM de vinte e seis estados brasileiros, empregando a equação de Enderby-king para o Tocantins a estimativa foi em média 13,70%, um valor próximo ao determinado pela mesma equação nesta pesquisa, que foi de 13,64%.

Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que, ainda que a equação de Enderby-King seja empregada para estimar a umidade de equilíbrio, é preciso ter precaução quanto sua utilização, podendo assim subestimar ou superestimar o valor real da UEM.

Conclusão

Com base nos resultados encontrados no presente trabalho conclui-se que a madeira de angelim-pedra a ser utilizada na região sul do estado de Tocantins deve ser seca para teores em torno de 10 % de umidade.

A madeira de angelim-pedra tende a atingir valores semelhantes de umidade de equilíbrio tanto quanto seca artificialmente ou ar livre e exposta às diferentes condições.

A equação de Enderby-King superestimou a umidade de equilíbrio real da madeira de angelim-pedra para a região sul do Tocantins não fornecendo estimativa consistente para a secagem da madeira para a região sul do Tocantins. Para uma maior precisão da estimativa, sugere-se elaborar um ajuste nas equações para estimar a umidade da madeira quando colocada em serviço no sul do estado de Tocantins.

Referências

- BARAÚNA, E. E. P.; OLIVEIRA, V. S. Umidade de equilíbrio da madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz; Pav.) e tauari vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 1, p. 91-96, 2009.
- BARONAS, R. *et al.* Modelling of moisture movement in wood during outdoor storage. **Nonlinear analysis: Modeling and Control**, v. 6, n. 2, p. 3-14, 2001.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. 712p.
- CHEN, Z. *et al.* Equilibrium moisture content of Norway spruce at low temperature. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 41, n. 3, p. 325-328, 2009.
- ENGELUND, E. T. *et al.* A critical discussion of the physics of wood-water interactions. **Wood Science and Technology**, New York, v. 47, p. 141-161, 2013.
- GALVÃO, A. P. M., 1975. Estimativas da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 11, p. 53-65, 1975.
- GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem reacional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais Climatológicas (1961-1990)**. Brasília, DF, INMET, 1992.
- JANKOWSKY, I. P. Variação sazonal da umidade de equilíbrio para madeira de Pinus. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, v. 3, n. 31, p. 41-46, 1985.
- KILIC, A.; NIEMZ, P. Extractives in some tropical woods. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, n. 1, p. 79-83, 2012.
- LANDRY, M. R. Thermoporometry by differential scanning calorimetry: experimental considerations and applications. **Thermochim Acta**, v. 433, p. 27-50, 2005.
- MARTINS, V. A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília, DF: Laboratório de Produtos Florestais, 1988.
- MARTINS, V. A. *et al.* Umidade de equilíbrio e risco de apodrecimento da madeira em condições de serviço no Brasil. **Brasil Florestal**, Brasília, DF, v. 76, n. 1, p. 29-34, 2003.
- MENDES, L. M.; ARCE, J. Análise comparativa das equações utilizadas para estimar a umidade de equilíbrio da madeira - Parte I. **Revista Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 141-152, 2003.
- PÉREZ-PEÑA, N. *et al.* Predicción del contenido de humedad de equilibrio de la madera en función del peso específico de la pared celular y variables ambientales. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 13, n. 3, p. 253-266, 2011.
- PERMAN, H. L. **Humidity**. London, Chapman and Hall, 1958.
- SKAAR, C. **Wood: water relations**. New York: Springer, 1988.
- WENGERT, G. **Measuring moisture content**. Cabinet Maker, v. 19, n. 2, p. 26-27, 2005.