Efeito dos elementos anatômicos da madeira
na secagem das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*Effect of wood anatomical elements
in log drying of *Eucalyptus* and *Corymbia*Thiago Campos Monteiro¹, José Tarcísio Lima², Paulo Ricardo Gherardi Hein³,
José Reinaldo Moreira da Silva⁴, Paulo Fernando Trugilho² e Helder Bolognani Andrade⁵

Resumo

Apesar de sua importância em várias atividades industriais, a secagem de madeira roliça não tem recebido muita atenção nas pesquisas. Assim, o objetivo deste estudo foi determinar em que extensão as características anatômicas da madeira afetam o fluxo da água em toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. Madeira dos clones de *E. urophylla* e *C. citriodora*, aos sete anos de idade, foi usada para realizar o estudo da correlação entre a estrutura anatômica dos vasos, raios, fibras, parede celular e pontuações com os parâmetros de movimentação de líquidos: taxa de fluxo da água livre, de adsorção e total. O fluxo da água livre foi favorecido com o aumento do comprimento do elemento vascular e das dimensões das fibras. A movimentação da água adsorvida foi favorecida com a maior frequência de poros. Maiores comprimentos dos raios e das dimensões das fibras favoreceram a secagem total da madeira. O aumento da espessura da parede celular interferiu no fluxo da água livre e na secagem total. Um mesmo elemento anatômico pode auxiliar no fluxo da água livre e interferir no fluxo da água adsorvida, como, por exemplo, o diâmetro da pontuação raio-vascular. Os resultados demonstraram a importância da separação do fluxo da água livre e da água adsorvida para avaliar a influência da anatomia da madeira na secagem.

Palavras-chave: Água livre, água adsorvida, elemento vascular, pontuação, fibra, raio.

Abstract

Despite its importance in several industrial activities, the drying of roundwood has not received much attention in research. Therefore, the objective of this study was to determine how anatomical characteristics affect water flow in *Eucalyptus* and *Corymbia* logs. Wood from *E. urophylla* and *C. citriodora* clones were used to study the correlation between vessels, rays, fibers and pits anatomical structure and fluid movement parameters on: free water flow, adsorbed water flow and total water flow. Free water flow was favored when the vascular elements length and the fiber dimensions were higher. Adsorbed water flow movement was favored with higher pores frequency. Higher ray length and fiber dimensions favor total wood drying. The increase of cell wall thickness interfered in free water flow and in total drying. Vessel-ray pit diameter can improve the free water flow and decrease the adsorbed water flow. The results showed the importance to separate water flow above and below fiber saturation point to evaluate the effect of wood anatomy on drying.

Keywords: Free water, adsorbed water, vascular element, pit, fiber, ray.

INTRODUÇÃO

A relação água e madeira tem sido estudada, cientificamente, há, pelo menos, um século. De acordo com a revisão de literatura sobre esse tema, apresentada por ENGELUND et al. (2013), os estudos referentes às interações da água com a madeira foram realizados, principalmente, com espécies de coníferas. Nos últimos anos, principalmente, no Brasil, a interação água-madeira em

¹Professor Adjunto. UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias. Av. Universitária, 1000 - 39404547 - Montes Claros, MG, Brasil. E-mail: tcmforest@gmail.com

²Professor Titular no Departamento de Ciências Florestais. UFPA - Universidade Federal de Lavras / Campus Universitário. Caixa Postal: 37 - 37200-000 - Lavras, MG, Brasil. E-mail: jtlima@dcf.ufpa.br; trugilho@dcf.ufpa.br

³Professor Adjunto no Departamento de Ciências Florestais. UFPA - Universidade Federal de Lavras / Campus Universitário. Caixa Postal: 37 - 37200-000 - Lavras, MG, Brasil E-mail: paulo.hein@dcf.ufpa.br

⁴Professor Associado no Departamento de Ciências Florestais. UFPA - Universidade Federal de Lavras / Campus Universitário. Caixa Postal: 37 - 37200-000 - Lavras, MG, Brasil. E-mail: jreinaldoms@gmail.com

⁵Pesquisador Doutor. Vallourec Florestal. Rua Honduras, 78 - Bairro Léo Batista - 35790-000 - Curvelo, MG, Brasil. E-mail: helder.andrade@vallourec.com

folhosas, incluindo o gênero *Eucalyptus* (BARBOSA et al., 2005; KLITZKE; BATISTA, 2010), passou a ser mais estudada, em razão do interesse econômico por essas espécies.

Verifica-se que as fibras, os elementos de vasos, as células de parênquima radial e axial tornam a madeira um material poroso. A passagem dos fluidos por essas estruturas é complexa, porque ocorre com a água, tanto na fase líquida quanto na gasosa (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968) e depende da umidade da madeira. A água movimentava-se, no caule das folhosas, principalmente, por meio dos vasos e dos pares de pontuações (SIAU, 1971).

Os vasos constituem o caminho longitudinal de menor resistência para o fluxo da água. Quando os elementos vasculares apresentam placa de perfuração simples a circulação dos líquidos ocorre com maior intensidade através destes (LEPAGE, 1986). Outros tipos de abertura podem facilitar a deposição de substâncias incrustantes que podem bloquear ou dificultar a passagem dos líquidos através dos vasos, consequentemente reduzindo a permeabilidade da madeira (MILOTA et al., 1995). Além disso, o fluxo de água também pode ser interrompido devido à formação de tiloses que podem obstruir parcial ou totalmente os vasos, diminuindo gradualmente a permeabilidade da madeira (SILVA et al., 2010).

Os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* são importantes fornecedores de matéria-prima para o setor florestal brasileiro. Neste contexto, as pesquisas sobre o processo de secagem dessas toras, realizadas pela indústria de carvão vegetal e instituições de pesquisa, visam secar as madeiras antes de convertê-las em carvão. Essas pesquisas fornecem informações técnicas sobre o efeito da posição da pilha de secagem, da presença da casca (VITAL et al., 1985), do diâmetro da tora (REZENDE et al., 2010), do gradiente de umidade, ao longo do fuste, durante a secagem (ZANUNCIO et al., 2013a) e do efeito da umidade no poder calorífico da madeira (ZANUNCIO et al., 2013b). No entanto a relação entre o fluxo de líquidos e as características anatômicas das toras, ainda, são desconhecidas.

O conhecimento a respeito da influência da variação, na biometria dos elementos anatômicos na eficiência da condução de líquidos pelo caule, poderia ser aplicado à redução de rachaduras, empenamentos, fendilhamentos, colapso entre outros defeitos de secagem. Além disso, o estabelecimento da correlação entre as características anatômicas, na taxa de secagem, poderia ser usado, na seleção de material genético com maior permeabilidade, pois essas árvores secariam mais rapidamente, reduzindo seu tempo de armazenamento. A madeira de árvores, com essas características, em termos de secagem, também, apresentaria vantagens no forno de carbonização, uma vez que perderiam, com maior facilidade, água e gases, resultando em carvão vegetal com características físico-mecânicas adequadas à siderurgia.

Assim, para compreender melhor a relação entre a variação, na biometria das características anatômicas da madeira e a movimentação da água nas toras, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da dimensão das estruturas anatômicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora* no fluxo da água.

MATERIAL E MÉTODOS

Material e amostragem

Materiais genéticos com variação nas dimensões dos caracteres anatômicos foram obtidos em empresas florestais de Minas Gerais. As árvores apresentavam baixo percentual de cerne e não foram observadas obstruções por tiloses. Foram utilizadas três árvores do clone VM04, três do MN463 (ambas de *Eucalyptus urophylla*) e três da espécie *Corymbia citriodora*, totalizando uma amostragem de nove árvores. Todos os indivíduos foram plantados com espaçamento de 3 × 3 m e cortados aos sete anos de idade.

Um disco foi retirado de cada árvore a 1,3 metros do solo, para os estudos anatômicos e três toretes de 45 cm de comprimento foram retirados acima do disco, para a avaliação da secagem da madeira roliça em cada árvore. Entre os toretes, foram retirados discos com 5 cm de espessura, para a determinação da densidade básica média e umidade inicial.

Avaliação da secagem

A massa dos toretes livres de casca foi determinada, imediatamente, após o abate das árvores. A seção transversal dos toretes foi impermeabilizada com emulsão asfáltica a fim de diminuir a saí-

da de água por esta seção. Em seguida, os toretes foram empilhados, para secagem, ao ar livre, em temperatura ambiente, em local coberto e sem paredes laterais, para favorecer a circulação do ar, conforme metodologia adotada por Rezende et al. (2010) e Zanuncio et al. (2013a).

A perda de massa dos toretes foi monitorada, durante 170 dias, para avaliação da secagem. As medições ocorreram, entre setembro de 2012 e março de 2013, na cidade de Lavras – MG. No primeiro mês, a massa das toras foi monitorada, em dias alternados e, no período restante, a medição foi realizada, duas vezes por semana, até a estabilização das massas. Após esse período, os toretes foram secos em estufa, com circulação de ar forçada, com temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, até massa constante e, em seguida, foram retiradas as amostras, para determinação da massa seca, em uma balança eletrônica de precisão.

A primeira massa medida foi considerada para a umidade inicial. O ponto de saturação das fibras (PSF) foi considerado igual a 30%, valor médio relatado por Skaar (1972). A massa dos toretes, quando a umidade ficou próxima de 30%, foi considerada para o PSF. Ao final da secagem, quando a massa ficou constante, foi considerada a umidade de equilíbrio, que ocorreu próxima a 14%, coerente com o relatado por Lima e Mendes (1995), para a região do estudo. Após a secagem, a taxa de fluxo da água livre, da água adsorvida e da água total foram calculadas, conforme as Equações 1, 2 e 3.

$$\text{TXAT} = \frac{M_i - M_{eq}}{T_1 \times A} \quad (\text{Equação 1})$$

em que TXAT = taxa de fluxo da água total ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); M_i = massa inicial do torete (g); M_{eq} = massa do torete na umidade de equilíbrio (g); T_1 = tempo de saída da água total (hora); A = área de saída da água no torete (cm^2).

$$\text{TXAL} = \frac{M_i - M_{psf}}{T_2 \times A} \quad (\text{Equação 2})$$

em que TXAL = taxa de fluxo da água livre ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); M_i = massa inicial do torete (g); M_{psf} = massa do torete na umidade do ponto de saturação das fibras (g); T_2 = tempo de saída da água livre (hora); A = área de saída da água no torete (cm^2).

$$\text{TXAA} = \frac{M_{psf} - M_{eq}}{T_3 \times A} \quad (\text{Equação 3})$$

em que TXAA = taxa de fluxo da água de adsorção ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); M_{psf} = massa do torete na umidade do ponto de saturação das fibras (g); M_{eq} = massa do torete na umidade de equilíbrio (g); T_3 = tempo de saída da água de adsorção (hora); A = área de saída da água no torete (cm^2).

Caracterização anatômica

O estudo das características anatômicas foi realizado nas amostras retiradas do disco retirado a 1,3 metros a partir do solo. Foram retirados quatro corpos de prova, sendo dois da posição interna, próximos à medula e outros dois da região externa, próximos à casca. As análises anatômicas foram realizadas, no Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras e a medição do diâmetro das pontoações, no Laboratório de Microscopia Eletrônica da mesma Universidade. Também foi determinada a porcentagem de cerne, presente nos toretes, conforme a técnica da diferença por coloração descrita por Githiomi e Dougal (2012).

A descrição microscópica da anatomia da madeira foi realizada com base na metodologia descrita na *International Association of Wood Anatomists* – IAWA (1989). Na coloração e na montagem das lâminas histológicas, foi utilizada a técnica de Johansen (1940) e, para o preparo do material macerado, foi utilizado o método descrito por Franklin (1945), modificado por Berlyn e Miksche (1976).

Nos cortes histológicos, os elementos de vasos foram avaliados quanto à frequência dos poros (número. mm^{-2}) e diâmetro (μm); os raios quanto à frequência (número. mm^{-1}), altura (μm) e largura (μm). No material macerado, o comprimento dos elementos de vaso (μm), o comprimento, largura total e diâmetro do lume das fibras (μm) foram medidos. Para cada característica anatômica, foram realizadas 30 medições. Com base nesses dados, a espessura da parede da fibra e a fração de parede foram calculadas, conforme as Equações 4 e 5, respectivamente:

$$EPF = \frac{LF - DLF}{2} \quad (\text{Equação 4})$$

$$FPF = \frac{2 EPF}{LF} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Em que EPF: espessura da parede da fibra (μm); DLF: diâmetro do lume da fibra (μm); LF: largura da fibra (μm); FPF: fração parede da fibra (%).

A estimativa da porção de parede da fibra disponível por mm^2 foi realizada, por meio da Equação 6, conforme Melo et al. (2015). A porção de células parenquimáticas do lenho foi desconsiderada.

$$FPT = \left[1 - \left(FP \times \frac{\pi DV^2}{4} \right) \right] \times FPF \quad (\text{Equação 6})$$

Em que FPT: fração parede total (%); FP: número de poros por mm^2 ; DV: diâmetro médio dos elementos de vaso (mm); FPF: fração parede das fibras (%).

Os diâmetros das pontoações raio-vasculares e intervaseculares foram medidos, por meio da microscopia eletrônica de varredura, nos mesmos blocos de madeira, utilizados para os demais estudos das características anatômicas. O preparo das amostras e as medições foram realizados conforme metodologia descrita por Alves (2004).

A avaliação das características anatômicas dos materiais genéticos foi calculada, para os toretes, em que foram determinados os valores de frequência de poros, diâmetro e comprimento do elemento de vaso; frequência, altura e largura do raio; comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura de parede da fibra; fração de parede da fibra e fração de parede total; diâmetro da pontoação raio-vascular e da pontoação intervaseicular. Os valores das características anatômicas dos toretes foram calculados com base na média ponderada pela área da seção transversal do torete (Equação 7). Inicialmente, foi calculada a área da seção transversal de cada torete, em seguida, utilizando o valor da metade do raio do torete, foi calculada a área interna da seção transversal da tora. A diferença entre a área total e a área interna gerou a sua área externa.

$$CA = \left[\frac{(CA_{\text{int.}} \times A_{\text{int.}}) + (CA_{\text{ext.}} \times A_{\text{ext.}})}{A_{\text{int.}} + A_{\text{ext.}}} \right] \quad (\text{Equação 7})$$

Em que CA: valor da média ponderada da característica anatômica das amostras; $CA_{\text{int.}}$: valor médio da característica anatômica da amostra da posição interna do disco; $CA_{\text{ext.}}$: valor médio da característica anatômica da amostra da posição externa do disco; $A_{\text{int.}}$: área interna da seção transversal do torete; $A_{\text{ext.}}$: área externa da seção transversal do torete.

A densidade básica foi calculada, nas cunhas opostas, retiradas dos discos removidos entre os toretes, conforme a NBR 11941 (ABNT, 2003).

Análise dos resultados

Valores médios e coeficiente de variação das características da madeira, para cada material genético, foram avaliados. Os valores máximos e mínimos dos caracteres anatômicos, também, foram calculados.

Um banco de dados com as informações dos três materiais genéticos juntos foi desenvolvido. Correlações (Person) das características anatômicas com as taxas de secagem foram calculadas, com base no test t student, a 95% de significância, por meio de planilha eletrônica digital. Para as correlações significativas, diferentes modelos de regressão foram ajustados, sendo os melhores selecionados com base no coeficiente de determinação (R^2) e o desvio padrão residuais (S_{xy}).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* desempenha um importante papel sobre a movimentação da água livre e da água adsorvida na madeira. A Tabela 1 apresenta os valores das dimensões dos caracteres anatômicos, da densidade básica e da umidade inicial dos toretes.

Tabela 1. Medidas dos caracteres anatômicos e físicos da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia*.**Table 1.** Measures for *Eucalyptus* and *Corymbia* wood physical and anatomical characteristics

Propriedades	<i>Corymbia citriodora</i>	Clone MN463 (<i>E. urophylla</i>)	Clone VM04 (<i>E. urophylla</i>)
	Min. - Md - Max (CV%)	Min. - Md - Max (CV%)	Min. - Md - Max (CV%)
Poros/Elemento de vaso			
Frequência (n°.mm ⁻²)	14 - 18 - 27 (26%)	13 - 16 - 20 (14%)	10 - 13 - 15 (15%)
Diâmetro (µm)	83 - 96 - 110 (11%)	78 - 104 - 122 (12%)	100 - 125 - 147 (14%)
Comprimento (µm)	205 - 249 - 296 (10%)	218 - 300 - 413 (22%)	250 - 326 - 393 (16%)
Raios			
Frequência (n°.mm ⁻¹)	12 - 14 - 17 (10%)	12 - 13 - 14 (8%)	10 - 12 - 14 (9%)
Altura (µm)	145 - 177 - 241 (16%)	150 - 220 - 279 (16%)	170 - 211 - 265 (16%)
Largura (µm)	8 - 12 - 17 (23%)	8 - 12 - 17 (21%)	9 - 12 - 14 (17%)
Fibras			
Comprimento (µm)	665 - 824 - 962 (13%)	766 - 917 - 1063 (11%)	837 - 989 - 1082 (8%)
Largura (µm)	9 - 14 - 18 (23%)	14 - 18 - 23 (14%)	12 - 14 - 17 (10%)
Diâmetro do lume (µm)	4 - 7 - 11 (41%)	8 - 11 - 16 (21%)	7 - 8 - 9 (10%)
Espessura da parede (µm)	2,7 - 3,5 - 4,2 (15%)	2,9 - 3,4 - 4,1 (9%)	2,7 - 3,3 - 3,7 (9%)
Fração de parede (%)	39 - 53 - 70 (20%)	30 - 39 - 45 (12%)	45 - 46 - 48 (2%)
Fração de parede total (%)	36 - 45 - 62 (19%)	26 - 34 - 39 (12%)	37 - 39 - 42 (5%)
Pont. raio-vascular (µm)	4,5 - 4,7 - 5,0 (6%)	6,2 - 7,2 - 7,8 (12,3%)	7,7 - 8,5 - 9,5 (10,9%)
Pont. intervacular (µm)	0,9 - 1,4 - 1,8 (30,6%)	0,9 - 1,6 - 2,3 (60,9%)	1,2 - 2,1 - 2,9 (40%)
Densidade básica (g.cm ⁻³)	0,610 (10,8)	0,498 (4,0)	0,523 (2,2)
Umidade inicial (%)	70,3	102,2	88,0

Min – valor mínimo; Md – valor médio; Max – valor máximo; (CV%) – coeficiente de variação em porcentagem.

A madeira do *Corymbia citriodora* apresentou os maiores valores de frequência de poros e raios, fração parede celular, fração parede total e densidade básica. Os toretes do clone VM04 apresentaram valores superiores, para o comprimento do elemento de vaso e da fibra, diâmetro dos poros, pontuação raio-vascular e intravascular. Por fim, o lenho do clone MN463 apresentou maior altura dos raios, largura das fibras e diâmetro do lume da fibra (Tabela 1). A largura do raio e a espessura da parede celular apresentaram valores próximos nos três materiais genéticos. Os valores encontrados, para as características anatômicas e físicas das madeiras, são coerentes com os relatados na literatura (EVANGELISTA et al., 2010; GARCÍA ESTEBAN et al., 2003; LEMOS et al., 2012; MELO et al., 2015; ZANUNCIO et al., 2013a).

As correlações entre as características anatômicas da madeira e suas taxas de fluxo da água estão apresentadas na Tabela 2.

Nenhuma característica anatômica interferiu nas três taxas de fluxo das águas (Tabela 2). A ausência de correlações significativas entre a porcentagem de cerne, a frequência e largura dos raios e as três taxas de saída da água (Tabela 2) pode ser explicada pela pequena variabilidade, observada entre os três materiais genéticos, avaliados para essas características. No caso da porcentagem de cerne, tanto a baixa idade das árvores quanto a altura da retirada dos toretes, não favorecem a ocorrência de cerne.

As características dos raios apresentaram valores próximos entre os três materiais genéticos, contudo, apenas a altura do raio apresentou correlação significativa com o fluxo da água total (Tabela 2), mesmo comportamento encontrado por Ahmed e Chun (2011), para a madeira de *Tectona grandis*. Por outro lado, Barnard et al. (2013) não encontraram correlação significativa entre a movimentação de corantes marcadores em células radiais de coníferas e concluíram que os raios podem não facilitar o transporte de água na direção radial em coníferas. A aplicação do conhecimento dos efeitos dos raios na secagem é importante, para o setor de carvão vegetal, que utiliza toras longas, em que o efeito dos raios fica mais evidente e, nesse caso, possivelmente, a seleção de materiais genéticos com maior comprimento dos raios terá secagem mais rápida.

O diâmetro e comprimento do elemento vascular, além do diâmetro da pontuação raio-vascular, foram diretamente proporcionais ao fluxo da água livre (TXAL) e inversamente proporcionais ao fluxo da água adsorvida (TXAA). A madeira com maior diâmetro e comprimento do elemento vascular apresentou maior fluxo da água livre (TXAL), tendendo a secar mais rapidamente até a umidade do PSF. Intervalo, quando é retirada a água livre, que se move no estado líquido por meio

das cavidades celulares, neste caso, os vasos, por meio de diferenças de tensão de capilaridade, com base na Lei de Hagen-Poiseuille (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). Tal lei descreve que quanto maior o diâmetro do elemento de vaso maior será a velocidade do fluxo no seu interior e menor será essa velocidade na região próxima à sua parede, pelo atrito entre as moléculas da água e a parede do vaso. Por outro lado, o aumento do diâmetro e do comprimento do elemento vascular diminuiu o fluxo da água adsorvida na madeira dos toretes.

Tabela 2. Correlações de Pearson entre as taxas de fluxo das águas dos toretes com as características anatômicas e significância das correlações.

Table 2. Pearson correlations between the logs water flow rates with the anatomical characteristics and significance of the correlations.

Característica	TXAL (g.cm ⁻² .h ⁻¹)	TXAA (g.cm ⁻² .h ⁻¹)	TXAT (g.cm ⁻² .h ⁻¹)
% Cerne	0,38ns	-0,39ns	0,42ns
DB (g.cm ⁻³)	-0,32ns	0,21ns	-0,63*
FP (n°.mm ⁻²)	-0,43ns	0,77*	0,05ns
DV (µm)	0,86*	-0,72*	-0,25ns
CEV (µm)	0,58*	-0,68*	0,07ns
FR (n°.mm ⁻¹)	-0,28ns	0,48ns	-0,24ns
AR (µm)	0,12ns	0,06ns	0,68*
LR (µm)	-0,1ns	0,04ns	0,11ns
CF (µm)	0,76*	-0,44ns	0,03ns
LF (µm)	-0,41ns	0,42ns	0,74*
DLF (µm)	-0,23ns	0,40ns	0,74*
EPF (µm)	-0,80*	0,12ns	0,06ns
FPF (%)	-0,08ns	-0,25ns	-0,64*
FPT (%)	-0,2ns	-0,22ns	-0,6*
PIV (µm)	0,31ns	-0,59*	-0,48ns
PRV (µm)	0,68*	-0,59*	0,13ns

TXAL = taxa de fluxo da água livre; TXAA = taxa de fluxo da água de adsorção; TXAT = taxa de fluxo da água total; % Cerne = porcentagem de cerne; DB = densidade básica; FP = frequência de poros; DV = diâmetro do elemento de vaso; CEV = comprimento do elemento de vaso; FR = frequência de raios; AR = altura do raio; LR = largura do raio; CF = comprimento da fibra; LF = largura da fibra; DLF = diâmetro do lume da fibra; EPF = espessura da parede da fibra; FPF = fração parede da fibra; FPT = fração parede total; PIV = diâmetro da pontuação intervacular; PRV = diâmetro da pontuação raio-vascular. * = influência significativa, com base no test t student, 95%; ns = não existiu influência significativa, com base no test t student, 95%.

Estes resultados são importantes, para a indústria de carvão vegetal, uma vez que a secagem ao ar livre é o principal método utilizado para secar a madeira destinada à produção de carvão no Brasil (ROSSO, 2006). O tempo gasto, nessa indústria, com a secagem, muitas vezes, não é suficiente para a umidade alcançar valores abaixo do PSF (REZENDE et al., 2010; ZANUNCIO et al., 2013a). Também pode ser um indicativo de quais características favorecem o escoamento dos gases, no interior da madeira, principalmente, no interior dos fornos de carbonização, em que as temperaturas elevadas retiram, rapidamente, a água adsorvida e podem, conseqüentemente, provocar redução no rendimento da produção de carvão (ROUSSET et al., 2011) e no poder calorífico líquido da madeira (ZANUNCIO et al., 2013b).

A largura e o diâmetro do lume da fibra, a altura do raio, a fração de parede da fibra, a fração de parede total e a densidade básica apresentaram correlação significativa com a TXAT (Tabela 2). No entanto essas características não apresentaram correlação significativa com a TXAL e TXAA. É importante notar que algumas dessas características, como a fração de parede da fibra e densidade básica, são dependentes. Ainda, na Tabela 2, observa-se que as características das fibras (CF, LF, DLF, EPF, FPF e FPT) não apresentaram correlação com a TXAA. Por outro lado, cada característica apresentou apenas uma correlação significativa com TXAL ou com TXAT. Esse comportamento não foi observado, para o diâmetro das pontuações intervculares, que apresentou apenas uma correlação significativa, inversamente proporcional à TXAA.

Diversos estudos relatam o efeito positivo das dimensões dos elementos de vasos no fluxo de líquidos (ENGELUND et al., 2013; KEDROV, 2012; SIAU, 1971; SPERRY et al., 2006). Porém esses estudos não separaram o fluxo das águas livre e de adsorção. Ahmed e Chun (2011) avaliaram o efeito da anatomia de *Tectona grandis*, no fluxo de solução de safranina e relatam que o aumento do diâmetro do elemento de vaso aumentou o fluxo longitudinal na madeira, enquanto o aumento do

comprimento do elemento vascular diminuiu esse fluxo. De forma geral, os resultados apresentados, na Tabela 3, sugerem que a avaliação da secagem deve ocorrer, de forma separada, para a água livre e para a água adsorvida, pois o fluxo de cada água varia, conforme a biometria dos elementos de vasos e fibras, afetando na secagem total.

Tabela 3. Estatística inerente aos ajustes entre as taxas de fluxo da água e as características anatômicas, juntamente com a sua análise residual.

Table 3. Statistical inherent in adjustments between water flow rates and anatomical characteristics, along with residual analysis.

Modelo	Coefficientes	R ²	Sxy (g.cm ⁻² .h ⁻¹)
TXAA= $\beta_0 + \beta_1 \cdot FP + \varepsilon$	β_0 -0,34893* β_1 9,05152*	0,59	0,00018
TXAL= $\beta_0 + \beta_1 \cdot DV + \varepsilon$	β_0 -0,0014* β_1 8,2873*	0,74	0,00069
TXAA= $\beta_0 + \beta_1 \cdot DV + \varepsilon$	β_0 0,0030* β_1 -0,1530*	0,52	0,00020
TXAL= $\beta_0 + \beta_1 \cdot CEV + \varepsilon$	β_0 -0,0001* β_1 2,6601*	0,34	0,00108
TXAA= $\beta_0 + \beta_1 \cdot CEV + \varepsilon$	β_0 0,0034* β_1 -0,0719*	0,46	0,00020
TXAT= $\beta_0 + \beta_1 \cdot AR + \varepsilon$	β_0 0,0014* β_1 1,1001*	0,46	0,00030
TXAL= $\beta_0 + \beta_1 \cdot CF + \varepsilon$	β_0 -0,0037* β_1 1,2428*	0,58	0,00084
TXAT= $\beta_0 + \beta_1 \cdot LF + \varepsilon$	β_0 0,00176* β_1 0,00012*	0,55	0,00030
TXAT= $\beta_0 + \beta_1 \cdot DLF + \varepsilon$	β_0 0,00255* β_1 0,00013*	0,55	0,00030
TXAL= $\beta_0 + \beta_1 \cdot EPF + \varepsilon$	β_0 0,01998* β_1 -0,00377*	0,64	0,00078
TXAT= $\beta_0 + \beta_1 \cdot FPF + \varepsilon$	β_0 0,00512* β_1 -0,32854*	0,41	0,00033
TXAT= $\beta_0 + \beta_1 \cdot FPT + \varepsilon$	β_0 0,00503* β_1 -0,35864*	0,36	0,00034
TXAL= $\beta_0 + \beta_1 \cdot PRV + \varepsilon$	β_0 0,00414* β_1 0,00047*	0,46	0,00097
TXAA= $\beta_0 + \beta_1 \cdot PRV + \varepsilon$	β_0 0,00204* β_1 -0,94011*	0,35	0,00022
TXAA= $\beta_0 + \beta_1 \cdot PIV + \varepsilon$	β_0 0,00166* β_1 -0,00017*	0,35	0,00024
TXAT= $\beta_0 + \beta_1 \cdot DB + \varepsilon$	β_0 0,005774* β_1 -0,004005*	0,4	0,00033

R²: Coeficiente de determinação; Sxy: Desvio padrão residual; β_0 : Coeficiente linear da equação; β_1 : coeficiente angular da equação; ε : erro do modelo. TXAL = taxa de fluxo da água livre; TXAA = taxa de fluxo da água de adsorção; TXAT = taxa de fluxo da água total; FP = frequência de poros; DV = diâmetro do elemento de vaso; CEV = comprimento do elemento de vaso; AR = altura do raio; CF = comprimento da fibra; LF = largura da fibra; DLF = diâmetro do lume da fibra; EPF = espessura da parede da fibra; FPF = fração parede da fibra; FPT = fração parede total; PIV = diâmetro da pontuação intervacular; PRV = diâmetro da pontuação raio-vascular; DB = densidade básica; * = influência significativa, com base no test t student, 95%.

Maiores dimensões (comprimento, largura e diâmetro do lume) das fibras, em geral, aumentaram o fluxo da água na madeira (Tabela 3). Ou seja, o aumento dessas dimensões tende a favorecer a secagem, principalmente, da saída da água líquida e gasosa até a umidade de equilíbrio da madeira. A movimentação dos fluidos pelas fibras é relatada por Siau (1971), que descreve a movimentação entre os pares de pontuações das fibras e conclui que seu efeito, na permeabilidade da madeira de folhosas, é insignificante, quando comparado ao efeito dos vasos. Com isso, a avaliação pontual do efeito das características das fibras na secagem é complexa e atenção deve ser tomada na metodologia empregada para sua avaliação.

Estudos podem divergir sobre o efeito de determinado parâmetro anatômico na permeabilidade do lenho. Baraúna et al. (2014) encontraram relação positiva entre o comprimento das fibras e a permeabilidade ao líquido na madeira de amapá. Diferentemente, Ahmed e Chun (2011) encontra-

ram que o aumento do comprimento das fibras reduziu o fluxo da solução de safranina na madeira de *Tectona grandis*. Baraúna (2010) avaliou duas espécies da Amazônia e encontrou que a largura da fibra foi diretamente proporcional à permeabilidade para a madeira de amapá e inversamente proporcional para a madeira de faveira (*Parkia gigantocarpa*).

O aumento das dimensões dos parâmetros relacionados à parede celular, bem como a densidade básica, reduzem a movimentação da água na madeira, diminuindo o fenômeno da difusão da água adsorvida e, principalmente, a capilaridade da água livre (Tabela 3). Os resultados foram coerentes com a literatura, uma vez que as características relacionadas à parede celular da fibra são inversamente proporcionais à porosidade da madeira, propriedade que apresenta relação direta com a permeabilidade, conforme relatado por Siau (1971). Além disso, os grupos hidroxílicos dos polímeros da madeira atraem as moléculas de água dificultando sua movimentação. Ligações de hidrogênio são formadas em áreas de sorção (SIMPSON, 1980) juntamente com outros grupos químicos polares que atraem água (BERTHOLD et al., 1996). Assim, quanto maior os valores relacionados às dimensões da parede celular menor será sua porosidade e, conseqüentemente, menor será o fluxo da água nessa madeira. Resultados coerentes com os apresentados por Zanuncio et al. (2015) que encontraram coeficiente de correlação igual a - 0,88 entre a densidade básica e a taxa de secagem das toras de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

A melhor eficiência, na movimentação da água livre com o aumento do diâmetro da pontoação raio-vascular, deve-se à movimentação da água, principalmente, no estado líquido, pelos pares de pontoações, por meio de diferenças de tensão de capilaridade (Tabela 3). O ajuste negativo da TXAA pode ser relacionado ao fato dessa água se mover, principalmente, por difusão na parede celular, sendo assim, as pontoações atuam como descontinuidades da parede e servem, dessa forma, principalmente, para a passagem da água, na forma líquida e a vapor, que se movem, principalmente, acima do PSF. A Figura 1 ilustra a pontoação raio-vascular da madeira de *Corymbia citriodora*.

Em que as setas indicam a direção longitudinal (L) e radial (R) da madeira.

Figura 1. Pontoação raio-vascular na madeira de *Corymbia citriodora*.

Figure 1. Vessel-ray pit in *Corymbia citriodora* wood.

Os resultados permitem inferir que quanto maior o diâmetro das pontoações maior será o fluxo de água livre e menor será o fluxo da água adsorvida. A importância das pontoações no fluxo da água na madeira é exposta em diversos trabalhos (SIAU, 1971; KEDROV, 2012). Choat et al. (2008) relataram que a condução dos fluidos na madeira é influenciada tanto pela estrutura das pontoações como pelo seu diâmetro.

Os melhores ajustes, para cada característica anatômica, estão apresentados na Figura 2.

Em que CEV = comprimento do elemento de vaso; FP = frequência de poros; DV = diâmetro do elemento de vaso; CF = comprimento da fibra; DLF = diâmetro do lume da fibra; LF = largura da fibra; EPF = espessura da parede da fibra; DB = densidade básica; FPF = fração parede da fibra; AR = altura do raio; PIV = diâmetro da pontuação intervascular; PRV = diâmetro da pontuação raio-vascular; TXAA = taxa de fluxo de água de adsorção; TXAL = taxa de fluxo de água livre; TXAT = taxa de fluxo de água total.

Figura 2. Relação entre a taxa de fluxo da água com as características anatômicas e a densidade básica dos toretes de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

Figure 2. Relation between water flow rate and anatomical characteristics and basic density of *Eucalyptus* and *Corymbia* logs.

Os resultados obtidos mais significativos apresentaram que a movimentação da água adsorvida (TXAA) foi diretamente proporcional à frequência dos poros (Figura 2B) e inversamente proporcional ao comprimento do elemento vascular (Figura 2A), mesmo comportamento do diâmetro do elemento vascular (Tabela 2). Os ajustes apresentados, para a TXAA, ou seja, para a saída da água, na forma gasosa e adsorvida na parede celular, presentes abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), tendem a sair de forma mais rápida nos materiais que apresentam maior frequência dos poros e menor diâmetro e comprimento do elemento vascular. Por outro lado, o diâmetro do elemento de vaso (Figura 2C) e o seu comprimento (Tabela 2) foram diretamente proporcionais ao fluxo da água livre TXAL. A Figura 3 apresenta um elemento de vaso (A) e um corte transversal com a frequência dos poros (B) da madeira do clone VM04.

Figura 3. Elemento de vaso (A) e frequência de poros (B) na madeira de *Eucalyptus urophylla* (Clone VM04).
Figure 3. Vascular element (A) and pores frequency (B) in *Eucalyptus urophylla* (Clone VM04) wood.

Dentre as características dos raios, apenas a altura foi diretamente proporcional à TXAT (Figura 2J). O comprimento da fibra foi diretamente proporcional à TXAL (Figura 2D). A largura (Figura 2F) e o diâmetro do lume da fibra (Figura 2E) foram diretamente proporcionais à TXAT, tendo as duas características o mesmo valor de R, igual a 0,74 (Tabela 2). A Figura 4 apresenta a parede celular com o lume de uma fibra da madeira do clone MN463.

Figura 4. Parede celular e lume da fibra da madeira de *Eucalyptus urophylla* (Clone MN463).
Figure 4. Cell wall and lumen of fiber in *Eucalyptus urophylla* (Clone MN463) wood.

Com tendência oposta às apresentadas pelas dimensões das fibras, as características relacionadas à parede celular, bem como a densidade básica foram, em geral, inversamente proporcionais à movimentação da água (Tabela 3). O aumento da espessura da parede da fibra reduziu a TXAL (Figura 2G) e o aumento das frações de parede da fibra e da fração de parede total, além da densidade básica, diminuiu a TXAT (Figura 2H e I). Por fim, o diâmetro da pontuação raio-vascular foi diretamente proporcional à TXAL (Figura 2L) e inversamente proporcional à TXAA (Tabela 2). Já o diâmetro da pontuação intervascular foi inversamente proporcional à TXAA (Figura 2K). Importante relatar que, além dos fatores anatômicos, as características químicas da madeira, também, influenciam a movimentação da água na madeira, conforme relatado em diversos trabalhos (ENGELUND et al.,

2013; SIAU, 1971). Componentes químicos como, por exemplo, os extrativos podem interferir na movimentação da água, quando obstruem as pontoações e se alojam no interior das células do parênquima radial e do elemento vascular.

Dessa forma, informações sobre o efeito da dimensão de determinada estrutura anatômica na dinâmica da saída de água, acima e abaixo do PSF dos toretes, podem auxiliar na seleção de materiais genéticos nas empresas. Por exemplo, os clones de *Eucalyptus urophylla* por possuírem maior abertura das pontoações raio-vasculares, maior comprimento e diâmetro do elemento vascular tendem a apresentar melhor fluxo da água livre e menor movimentação da água adsorvida, sendo materiais indicados para secarem mais rápido no campo. Por outro lado, a madeira do *Corymbia* apresenta maior frequência de poros e tende a adsorver melhor reagentes químicos e também gerar um carvão vegetal menos friável devido à facilidade da movimentação da água adsorvida. Importante ressaltar que estudos acrescentando os aspectos químicos da madeira podem contribuir para o melhor entendimento dos fatores que afetam o fluxo da água no lenho.

CONCLUSÕES

Os caracteres anatômicos que regem o fluxo da água na madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* foram medidos e a movimentação da água, acima e abaixo do ponto de saturação das fibras, foi avaliada usando as taxas de fluxo da água nestas fases. O efeito da densidade básica também foi avaliado. Diversos fatores influenciaram a secagem dos toretes, incluindo dimensão dos caracteres anatômicos, densidade e água adsorvida ou livre.

Os vasos afetaram o fluxo da água adsorvida e livre. Elemento vascular comprido e largo beneficiou o fluxo da água livre e reduziu a movimentação da água adsorvida. De outro modo, frequência de poros elevada favoreceu o fluxo da água adsorvida. Lenho com presença de raio alto seca mais rápido. Fibras longas, largas e com grande diâmetro do lume também beneficiaram a secagem. Por outro lado, as paredes celulares espessas dificultaram a movimentação da água. Pontuação intervascular e raio-vascular com maior abertura reduziram a passagem da água adsorvida. Em contrapartida, a abertura da pontoação raio-vascular favoreceu o fluxo da água livre.

AGRADECIMENTOS

À empresa *Vallourec Florestal Ltda* pelo apoio financeiro; à empresa *Cenibra S.A.* por fornecer a madeira de *Corymbia citriodora*; à equipe do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira– UFLA pelo auxílio técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- AHMED, S. A.; CHUN, S. K. Permeability of *Tectona grandis* L. as affected by wood structure. *Wood Science and Technology*, v. 45, p. 487-500, 2011.
- ALVES, E. *Introdução à microscopia eletrônica de varredura*. Lavras: FAEPE, 2004. 43 p.
- BARAÚNA, E. E. P. *Permeabilidade das madeiras de Amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e Faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke)*. 2010. 69 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- BARAÚNA, E. E. P.; LIMA, J. T.; VIEIRA, R. S.; SILVA, J. R. M.; MONTEIRO, T. C. Efeito da estrutura anatômica e química na permeabilidade da madeira de Amapá. *Cerne*, Lavras, v. 20, n. 4, p. 529 – 534, 2014.
- BARBOSA, C. G.; LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F. Elaboração de programa de secagem para madeiras de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. *Cerne*, Lavras, v. 11, n. 1, p. 40 - 48, 2005.

- BARNARD, D. M.; LACHENBRUCH, B.; MCCULLOH, K. A.; KITIN, P.; MEINZER, F. C. Do ray cells provide a pathway for radial water movement in the stems of conifer trees. **American Journal of Botany**, Columbus, v. 100, n. 2, p. 322 - 331, 2013.
- BERLYN, G. P.; MIKSCH, J. P. **Botanical microtechnique and cytochemistry**. The Iowa: Iowa State University Press, 1976. 326 p.
- BERTHOLD, J.; RINAUDO, M.; SALMEÁN, L. Association of water to polar groups-estimations by an adsorption model for ligno-cellulosic materials. **Colloid and Surfaces A**, v. 112, p. 117-129, 1996.
- CHOAT, B.; COBB, A. R.; JANSEN, S. Structure and function of bordered pits: new discoveries and impacts on whole-plant hydraulic function. **New Phytologist**, Oxford, v. 177, p. 608 - 626, 2008.
- ENGELUND, E. T.; THYGESEN, L. G.; SVENSSON, S.; HILL, C. A. S. A critical discussion of the physics of wood - water interactions. **Wood Science and Technology**, v. 47, p. 141-161, 2013.
- EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; VALLE, M. L. A.; XAVIER, B. A. Caracterização anatômica quantitativa da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. e *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 273-284, 2010.
- FRANKLIN, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resin and wood: resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, London, v. 155, n. 3924, p. 51, 1945.
- GARCÍA ESTEBAN, L.; GUINDEO CASASÚS, A.; PERAZA ORAMAS, C.; DE PALACIOS DE PALACIOS, P. **La madera y su anatomía**. Madri: Fundación Conde del Valle de Salazar / Ediciones Mundi-Prensa, 2003.
- GITHIOMI, J. K.; DOUGAL, E. Analysis of heartwood - sapwood demarcation methods and variation of sapwood and heartwood within and between 15 year old plantation grown *Eucalyptus regnans*. **International Journal of Applied Science and Technology**, v. 2, n. 8, p. 63 - 70, 2012.
- IAWA - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS COMMITTEE. List of microscope features for hardwood identification. **IAWA Bulletin New Series**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219 - 332, 1989.
- JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill, 1940. 523 p.
- KEDROV, G. B. Functioning wood. **Wulfenia**, Klagenfurt, v. 19, p. 57 - 95, 2012.
- KLITZKE, R. J.; BATISTA, D. C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 97-105, 2010.
- KOLLMANN, F. P.; COTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer - Verlag, 1968. v. 1, 592 p.
- LEMOS, A. L. F.; GARCIA, R. A.; LOPES, J. O.; CARVALHO, A. M.; LATORRACA, J. V. F. Madeira de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson sob aspectos físicos e anatômicos como fatores qualitativos. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 1, p. 1 - 8, 2012.
- LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1986. 708 p.
- LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Estimativa da umidade de equilíbrio para madeiras em trinta e duas cidades do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**. Viçosa, v. 19. n. 2. p. 272 - 276, 1995.

MELO, L. E. L.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; NASCIMENTO, D. F. R. Influence of anatomy and basic density on specific cutting force for wood from *Corymbia citriodora* Hill & Johnson. **Forest Systems**, Madri, v. 24, p. e36, 2015.

MILOTA, M. R.; TSCHERNITZ, J. L.; VERRIL, S. P.; MIANOWSKI, T. Gas permeability of plantation Loblolly pine. **Wood Fiber Science**, Monona, v. 27, n. 1, p. 34-40, 1995.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; PAULA, L. E. R.; FARIA, A. L. R. Secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 41-47, 2010.

ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de *Eucalyptus* resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional**. 2006. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

ROUSSET, P.; FIGUEIREDO, C.; SOUZA, M. D.; QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of *Eucalyptus* wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 3, p. 1890 - 1897, 2011.

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 131 p.

SILVA, M. R.; MACHADO, G. O.; DEINER, L. J.; CALIL JUNIOR, C. Permeability measurements of Brazilian *Eucalyptus*. **Materials Research**, São Carlos, v. 13, n. 3, p. 281-286, 2010.

SIMPSON, W. Sorption theories applied to wood. **Wood Fiber**, v.12, p. 183–195, 1980.

SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218 p.

SPERRY, J. S.; HACKE, U. G.; PITTERMANN, J. Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. **American Journal of Botany**, Columbus, v. 93, n. 10, p. 1490 - 1500, 2006.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; VALENTE, O. F. Estimativa do teor de umidade de lenha para carvão em função do tempo de secagem. **Revista Árvore**, Viçosa, v.9, n.1, p.10-27, 1985.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, L. E.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M. Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of *Eucalyptus* and *Corymbia* logs. **Maderas. Ciencia y tecnologia**, Concepcion, v. 17, n. 2, p. 335 - 344, 2015.

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; CARVALHO, A. G.; TRUGILHO, P. F. Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 353 - 360, 2013a.

ZANUNCIO, A. J. V.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; ANDRADE, H. B.; CARVALHO, A. G. Drying biomass for energy use of *Eucalyptus urophylla* and *Corymbia citriodora* logs. **Bioresources**. Raleigh, N.C. v. 8, n. 4, p. 5159 – 5168, 2013b.

Recebido em 02/02/2016

Aceito para publicação em 24/03/2017