

Morfologia das fibras do lenho de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes topografias e altitudesMorphology of wood fiber of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* clones in different topographies and altitudesRenata Mauri¹, Joyce de Almeida Alves², José Tarcísio da Silva Oliveira³,
José Tarcísio Lima⁴, Mário Tomazello Filho⁵ e Natalino Calegario⁶**Resumo**

A qualidade da madeira depende, dentre outros fatores, de suas características anatômicas. Entender como as variações ambientais afetam a anatomia da madeira contribui para a escolha adequada de seu uso final. Neste trabalho, objetivou-se avaliar a influência da topografia e da altitude nas dimensões e morfologia das fibras de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, com 5 repetições, em esquema fatorial 2 x 4 x 3, sendo dois clones, 4 condições de crescimento (altitude/topografia) e 3 posições radiais. As condições de crescimento foram: baixa/inclinada, baixa/plana, alta/inclinada e alta/plana. Amostras de madeira foram extraídas em três posições radiais equidistantes na altura de 1,30 metros do solo (DAP). As variáveis analisadas foram o comprimento, a largura, a espessura da parede, o coeficiente de rigidez, o coeficiente de flexibilidade e o Índice de Runkel das fibras. Os resultados mostraram que o efeito da condição de crescimento sobre essas variáveis depende do clone e/ou posição radial. Fibras com menores comprimentos e maiores espessuras foram observadas na topografia inclinada da região baixa e na topografia plana da região alta. Menores larguras de fibra foram encontradas na madeira produzida na topografia inclinada, independente da altitude. De maneira geral, valores menores do coeficiente de rigidez foram observados na topografia plana. As condições de crescimento influenciaram apenas o coeficiente de flexibilidade do clone 2 nas posições radiais mais externas. Observou-se maiores índices de Runkel na topografia plana da região alta e na topografia inclinada da região baixa. Esses resultados sugerem uma resposta adaptativa do xilema de *Eucalyptus* às condições de crescimento limitadas por água, ventos, gravidade e luminosidade.

Palavras-chave: Anatomia da madeira, variações ambientais, fisiologia da planta.

Abstract

The quality of the wood depends on its anatomical characteristics, among other factors. Understanding the effects of environmental changes in the anatomy of wood contributes to the appropriate choice of its final use. This work aims to study the influences of topography and altitude on the size and morphology of the fibers in the stem of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. The experimental design was completely randomized, with five replications and three factors: Clone (2 levels), Growth conditions (4 levels) and Radial position (3 levels). The growth conditions were: low/sloping, low/flat, high/sloping and high/flat. Wood samples were obtained in three equidistant radial positions and taken at the height of 1.30 meters above the ground (DBH). The variables studied in the fibers were: length, width, cell wall thickness, rigidity coefficient, flexibility coefficient and Runkel ratio. The effect of the growth condition depends on clone and/or radial position. The sloping topography of the low region and the flat topography of the high region resulted in smaller fiber length and higher fiber cell wall thickness. The wood produced in the sloping topography had lower fiber width, regardless of altitude. In general, smaller values of rigidity coefficient were observed

¹Doutoranda em Ciência e Tecnologia da Madeira. UFLA – Universidade Federal de Lavras / Departamento de Ciências Florestais. Caixa Postal 3037 – 32.700-000 – Lavras, MG, Brasil. E-mail: renatamauri@yahoo.com.br

²Doutoranda em Engenharia Florestal. UFLA – Universidade Federal de Lavras / Departamento de Ciências Florestais. Caixa Postal 3037 – 32.700-000 – Lavras, MG, Brasil. E-mail: joyce_a.alves@yahoo.com.br

³Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. UFES – Universidade Federal do Espírito Santo. Av. Carlos Lindemberg, s/n – NEDTEC – Centro - 29550000 - Jerônimo Monteiro, ES, Brasil. E-mail: jtsilva@npd.ufes.br

⁴Professor do Departamento de Ciências Florestais. UFLA – Universidade Federal de Lavras / Departamento de Ciências Florestais. Caixa Postal 3037 – 32.700-000 – Lavras, MG, Brasil. E-mail: jtlima@dcf.ufla.br

⁵Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. USP - Universidade de São Paulo /ESALQ - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Avenida Páduas Dias, 11 – Caixa Postal 09 - 13418900 - Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: mtomazel@usp.br

⁶Professor Adjunto do Departamento de Ciências Florestais. UFLA – Universidade Federal de Lavras / Departamento de Ciências Florestais. Caixa Postal 3037 – 32.700-000 – Lavras, MG, Brasil. E-mail: calegari@dcf.ufla.br

in flat topography. The flexibility coefficients of clone 2, for intermediate and external radial positions, were affected by growth conditions. The flat topography of the high region and the sloping topography of the low region showed the highest Runkel ratios. These results suggest an adaptive response of the xylem of *Eucalyptus* to the growth conditions limited by water, wind, gravity and lightness.

Keywords: Wood anatomy, environmental variations, plant physiology.

INTRODUÇÃO

A caracterização anatômica da madeira permite direcionar de forma mais segura e adequada a sua utilização para os diversos fins. Estudar a anatomia é, em última análise, compreender o processo de formação da madeira pelo câmbio vascular. Essa formação acontece, em sucessão, pelos processos de divisão celular, crescimento e diferenciação, que envolvem o alargamento das células, o espessamento e a lignificação da parede celular (WARDROP, 1965).

Os processos de divisão e destino celular são os mais fortemente controlados por hormônios (SAVIDGE; WAREING, 1981). A temperatura também atua como fator limitante durante a divisão celular (TRAPY; GUERN, 1980). Além disso, algumas pesquisas com coníferas têm mostrado que esse processo é interrompido pelo déficit hídrico (DÜNISCH; BAUCH, 1994; LARSON, 1963). Trabalhos similares para folhosas são escassos, mas acredita-se que seu comportamento seja análogo.

O potencial de água, ou seja, o status hídrico no xilema é o determinante mais importante do crescimento celular potencial na zona cambial e na zona de células em alargamento (KOZLOWSKI; PALLARDY, 1996; KRAMER, 1987). Por esse motivo, a restrição à água dificulta a expansão das células do xilema. A intensidade do estresse hídrico e a velocidade de reação da árvore contra esse estresse serão maiores em solos arenosos do que em solos argilosos (AUSSÉNAC, 1993), logo, a qualidade da madeira também dependerá da textura do solo (POLGE, 1973). Por fim, a parede secundária será formada após a interrupção do aumento celular em volume e após a reorganização da estrutura da parede com microfibrilas (ESAU, 1974). Esta reorganização necessita de Ca^{2+} e de fotoassimilados, que são os fatores mais limitantes (KELLER, 1978; LARSON, 1963; RICHARDSON, 1964).

Diversos estudos com o intuito de relacionar um conjunto de características ambientais sob as variações anatômicas da madeira têm sido realizados. Geralmente, comparam-se as características dos elementos celulares de espécies com ampla distribuição geográfica, ocorrendo desde ambientes méxicos até ambientes xéricos (ALVES; ANGYALOSSY-ALFONSO, 2000; LUCHI et al., 2005; MARCATI et al., 2001; MATTOS FILHO, 1989). Há ainda pesquisas sobre as tendências latitudinais e altitudinais em várias características anatômicas da madeira (NOSHIRO; BAAS, 1998; OLIVEIRA et al., 2012).

Poucos trabalhos, no entanto, se preocupam com as pequenas variações ambientais, que também podem afetar a formação da madeira a ponto de modificar sua qualidade como matéria prima. Por exemplo, Barij et al. (2007) estudando *Quercus pubescens* em encostas com pequenas variações na disponibilidade de água e na altitude, mostraram haver relação negativa entre a área do lume de vasos e a altitude, e positiva com a disponibilidade de água no solo. Segundo os mesmos autores, estudos similares a esse são inexistentes para o gênero *Eucalyptus*.

Diante do exposto, se as respostas de crescimento das plantas às condições locais, por exemplo, variações de inclinação ou altitude, forem melhores compreendidas, não só seria possível otimizar o planejamento florestal, mas também forneceria uma base para determinar as melhores espécies a serem plantadas em locais particulares para fins específicos. Assim, este estudo tem como objetivo avaliar a influência da topografia e da altitude do terreno nas dimensões e morfologia das fibras no tronco de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

MATERIAL E MÉTODOS

A madeira avaliada neste estudo é proveniente de povoamentos de dois híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (Clone 1 e Clone 2), com aproximadamente 6 anos de idade, pertencentes à empresa Celulose Nipo-Brasileira S. A. (CENIBRA). Em todos os plantios teve-se a mesma face norte de exposição ao sol e o mesmo espaçamento (2,8 m x 3,0 m).

Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 4 x 3, com 5 repetições, sendo 2 clones, 4 condições de crescimento (combinações de altitude/topografia) e 3 posições radiais, totalizando 24 tratamentos.

As condições de crescimento foram: baixa/inclinada, baixa/plana, alta/inclinada e alta/plana. As áreas com até 281,3 metros de altitude, denominadas de região baixa, estão localizadas em Belo Oriente – MG (19°13'13.46"S e 42°28'59.06"O) e as áreas com mais de 812,5 metros de altitude representaram a região alta e estão localizadas em Antônio Dias – MG (19°39'13.09"S e 42°52'20.42"O). Em cada região considerou-se terrenos com topografia plana e inclinada (Figura 1).

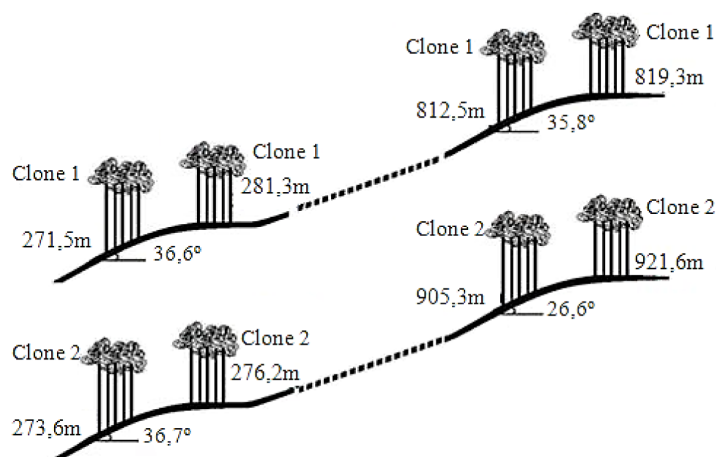


Figura 1. Condições de crescimento (baixa/inclinada; baixa/plana; alta/inclinada; alta/plana) para os clones 1 e 2.
Figure 1. Growth conditions (low/sloping; low/flat; high/sloping; high/flat) for the clones 1 and 2.

O clima em ambos os municípios é, segundo classificação de Köppen, do tipo Aw tropical quente semiúmido, apresentando estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro, tendo julho como o mês mais seco. Por meio das informações climáticas médias de 2003-2009 (anos de plantio até o corte da floresta) e do tipo de solo, verifica-se que os municípios apresentam nuances entre si (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização climática e edáfica das plantações amostradas.

Table 1. Characterization of climate and soil for the crops sampled.

Cond. ¹	Temperatura (°C)			Precipitação (mm)	Déficit hídrico ² (mm)	RFA ³ (mmol/m ² /s)	Velocidade do vento (m/s)	Tipo de solo
	Mínima	Máxima	Média					
B/I	18,9	31,0	24,5	1229,80	299,0	33442,0	0,9	CXbd1 ⁴
B/P	18,9	31,0	24,5	1229,80	299,0	33442,0	0,9	CXbd3 ⁵
A/I	15,0	24,3	20,2	1280,30	96,0	29671,0	4,2	CXbd1
A/P	15,0	24,3	20,2	1280,30	96,0	29671,0	4,2	CXbd1

¹Cond. = Condições de crescimento que correspondem às combinações de Altitude/Topografia. Região baixa (B): altitude ≤ 281,3 m; Região alta (A): altitude ≥ 812,5 m; Topografia plana (P): 0° e topografia de inclinada (I): ≥ 26,6°. ²Para o cálculo do déficit hídrico não se considerou a inclinação do terreno. ³RFA = Radiação fotossinteticamente ativa. Para o cálculo da RFA não se considerou a inclinação do terreno. ⁴CXbd1 = Cambissolo háplico, distrófico típico, textura argilosa, epiutrófico, fase campo subtropical. ⁵CXbd3 = Cambissolo háplico, distrófico típico, textura média, fase campo subtropical úmido (BHERING et al., 2008).

Discos de madeira de cada clone, em cada condição de crescimento, foram extraídos no DAP (diâmetro a altura de 1,30 metros do solo). Cortes histológicos provenientes dessas amostras foram submetidos à clarificação com hipoclorito de sódio (50%) e corados utilizando a técnica de dupla coloração (MAÁ CZ; VÁ GÁS, 1961), indicando ausência de lenho de tração. Também foram obtidos três corpos de provas de 1,5 cm x 2,0 cm de seção transversal e 2,0 cm de direção longitudinal, retirados em posições equidistantes no sentido radial (medula, intermediária e externa).

A maceração foi realizada segundo método preconizado por Dadswell (1972). Fotomicrografias das lâminas contendo material macerado foram obtidas com o uso de câmera digital acoplada ao microscópio de luz da marca Zeiss. O comprimento e a largura das fibras foram medidos diretamente, considerando-se 20 repetições, com o auxílio do *software* analisador de imagens Axiovision 4.5. A espessura da parede foi determinada indiretamente pela diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume, dividida por dois.

Para a caracterização morfológica das fibras foram calculados: a) o Coeficiente de rigidez (CR) - determinado pela relação entre o diâmetro do lume e a largura da fibra, b) o Coeficiente de flexibilidade (CF) - determinado pela razão entre o comprimento e a largura da fibra (BURGER; RICHTER, 1991) e c) o Índice de Runkel (IR) - determinado pela razão entre duas vezes a espessura da parede e o diâmetro do lume da fibra (RUNKEL, 1952).

Na análise estatística utilizou-se o pacote *ExpDes* (FERREIRA et al., 2013) do programa R versão 3.3.0 (R CORE TEAM, 2016). A análise de variância foi realizada e, uma vez significativa, aplicou-se o teste de comparação múltipla de Tukey a 5% de significância. As pressuposições de homogeneidade da variância e normalidade dos resíduos para as características estudadas foram verificadas pelos testes de Levene e de Shapiro-Wilk, a 5% de significância, respectivamente. Não houve violação dessas pressuposições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com as análises de variância (Tabela 2), pode-se afirmar que as condições de crescimento têm influência sobre todas as variáveis estudadas. Entretanto, a presença de interação significativa mostra que essa influência depende do clone e/ou posição radial. Assim, deve-se analisar o efeito simultâneo dos fatores sobre as características das fibras.

Tabela 2. Resumo das análises de variância para comprimento (Comp.), largura (Larg.), espessura da parede (Esp.), coeficiente de flexibilidade (CF), coeficiente de rigidez (CR) e índice de Runkel (IR).

Table 2. Summary of variance analysis for length (Comp.), width (Larg.), wall thickness (Esp.), flexibility coefficient (CF), rigidity coefficient (CR) and Runkel ratio (IR).

FV	GL	Quadrado Médio					
		Comp. (mm)	Larg. (µm)	Esp. (µm)	CR (%)	CF (adimensional)	IR (adimensional)
Clone (C)	1	0,098*	1044,2*	0,002 ^{ns}	12,16 ^{ns}	5,24 ^{ns}	0,017 ^{ns}
Cond. ¹ (Cc)	3	0,047*	106,6*	0,487*	90,68*	66,63*	0,108*
Posição (P)	2	1,564*	33,0*	21,605*	938,36*	1183,69*	0,345*
C x Cc	3	0,006*	52,0*	0,425*	61,79*	78,90*	0,054*
C x P	2	0,002 ^{ns}	12,9*	0,084 ^{ns}	16,46 ^{ns}	122,14*	0,226*
Cc x P	6	0,002 ^{ns}	2,4*	0,043 ^{ns}	30,38*	15,52 ^{ns}	0,022*
C x Cc x P	6	0,007*	1,7*	0,09 ^{ns}	8,48 ^{ns}	42,26*	0,017 ^{ns}
Resíduo	96	0,002	0,6	0,080	7,17	12,66	0,008
Total	119	0,031	14,4	0,459	27,74	38,79	0,022

¹Cond. = Condição de crescimento. FV = Fonte de variação; GL = grau de liberdade; *significativo a 5% e ^{ns} não significativo, pelo teste F.

Cabe ressaltar que, com exceção apenas para a largura das fibras, os maiores valores de quadrado médio foram observados para a posição radial, indicando que esse fator foi o que mais contribuiu com a variação dos dados.

Comprimento das fibras

Comparando-se os clones dentro de cada combinação dos outros fatores, observou-se a tendência de fibras mais longas para o clone 1, aproximadamente 7%, diferindo significativamente do clone 2 em todas as posições radiais na condição de crescimento alta/inclinada e nas posições mais distantes da medula na maioria das demais condições (Tabela 3).

Nos plantios da região baixa (B/I e B/P), ambos os clones mostraram a tendência de produzir fibras menores na topografia inclinada (B/I). Essas fibras foram aproximadamente 5% mais curtas que as da topografia plana (B/P). No entanto, essa diferença não foi suficientemente grande para apresentar significância estatística em todas as posições radiais.

O menor comprimento de fibra observado nas árvores que cresceram na região baixa e topografia inclinada deve-se à menor capacidade de retenção de água pelos terrenos inclinados, aliado ao pronunciado déficit hídrico dessa região (Tabela 1). É provável que tenha acontecido uma maior perda de turgor no câmbio dessas árvores, acarretando assim, na inibição da expansão das iniciais do xilema (KOZLOWSKI et al., 1991). Resultados semelhantes foram encontrados por Noshiro e Baas (2000), Luchi (2004) e Denardi e Marchiori (2005) que constataram a ocorrência de fibras

mais curtas em ambiente com menor precipitação. Já Ribeiro e Barros (2006) observaram fibras mais longas em *Pseudopiptadenia contorta* no local com menor precipitação.

Tabela 3. Valores médios de comprimento de fibras (mm) da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para diferentes posições radiais no caule e condições de crescimento.

Table 3. Mean values of wood fiber length (mm) of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* clones for different radial positions and growth conditions.

Cond. ¹	Posição radial					
	Medula		Intermediária		Externa	
	Clone 1	Clone 2	Clone 1	Clone 2	Clone 1	Clone 2
B/I	0,79 Ab ² 0,11 ³	0,78 Aa 0,08	1,03 Ab 0,15	1,00 Aa 0,11	1,20 Ab 0,15	1,09 Bb 0,12
B/P	0,82 Ab 0,11	0,78 Aa 0,12	1,09 Aab 0,14	1,01 Ba 0,14	1,21 Ab 0,14	1,24 Aa 0,12
A/I	0,90 Aa 0,12	0,81 Ba 0,12	1,14 Aa 0,13	1,07 Ba 0,12	1,32 Aa 0,12	1,22 Ba 0,12
A/P	0,82 Ab 0,12	0,78 Aa 0,13	1,07 Aab 0,14	1,01 Ba 0,12	1,24 Aab 0,15	1,11 Bb 0,13

¹Cond. = Condições de crescimento baixa/inclinada (B/I), baixa/plana (B/P), alta/inclinada (A/I) e alta/plana (A/P). ²Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Letra maiúscula na linha = Diferença entre clones dentro de uma mesma posição radial e condição de crescimento. Letra minúscula na coluna = Diferença entre condições de crescimento dentro de um mesmo clone e posição radial. ³Desvio padrão (mm).

Na região alta (A/I e A/P), os dois clones produziram os menores comprimentos de fibra em topografia plana (A/P), que foram em média 7% mais curtas que as fibras da topografia inclinada (A/I). Porém, essas diferenças também não foram significativas em todas as posições.

O esperado efeito da topografia na perda de turgor no câmbio vascular não foi observado na região alta, provavelmente devido aos menores déficit hídricos (Tabela 1). Assim, o comportamento observado para o comprimento das fibras na região alta pode ser parcialmente explicado pela produção de etileno induzida por estresse mecânico. O hormônio etileno, quando em baixas concentrações, é capaz de promover o aumento da sensibilidade da planta à giberelina (TAIZ; ZEIGER, 2009) e esta estimula o alongamento celular (DAVIES, 2004). O estresse mecânico foi promovido pela velocidade dos ventos superior da região alta (Tabela 1), além disso, as árvores em terreno inclinado são mais susceptíveis à carga de vento dinâmica, portanto, estariam mais propensas à produção de etileno.

Em coníferas, o comprimento dos traqueídeos é inversamente correlacionado com o ângulo de microfibrilas, que é fator chave na resistência da madeira (MARTÍNS et al., 2010). De fato, longos traqueídeos têm sido muitas vezes associados a uma maior resistência mecânica para suportar a gravidade, vento ou carga de neve (MENCUCCINI et al., 1997; EZQUERRA; GIL, 2001). Mesmo em folhosas, como o eucalipto, ainda pode-se supor que os maiores valores de comprimento de fibra das madeiras provenientes da condição de crescimento alta/inclinada atuariam como uma forma de suportar o vento e a gravidade. Essa ideia é apoiada pelos resultados obtidos por Ceccantini (1996), que demonstrou uma correlação negativa entre o diâmetro e o comprimento de fibras, indicando que, dependendo do ecossistema, o crescimento da fibra pode ser direcionado para o comprimento ou para o diâmetro.

Largura das fibras

Os clones foram significativamente diferentes em todas as combinações dos níveis dos fatores condição de crescimento e posição radial. O clone 1 apresentou em média fibras 46% mais largas (Tabela 4).

Observa-se que de maneira geral, independente do clone, região (baixa ou alta) ou posição radial, na topografia inclinada a madeira produzida apresentou menores valores de largura de fibra, aproximadamente 12%, em relação a topografia plana. Entretanto, essa diferença nem sempre foi significativa.

A expansão celular é dirigida pelo turgor, que é diretamente relacionado com o potencial de água no xilema (KOZLOWSKI; PALLARDY, 1996; KRAMER, 1987). Portanto, a formação de fibras com menores larguras na topografia inclinada, em ambas as regiões, pode estar relacionada à menor

capacidade de retenção de água pelos terrenos inclinados. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Longui et al. (2009), Luchi (2004), e Melo Júnior et al. (2011), que observaram o efeito limitante da deficiência hídrica sobre a largura das fibras do xilema secundário de espécies florestais nativas do Brasil.

Tabela 4. Valores médios da largura das fibras (μm) da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para diferentes posições radiais no caule e condições de crescimento.

Table 4. Mean values of wood fiber (μm) width of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* clones for different radial positions and growth conditions.

Condições de crescimento ¹	Posição radial					
	Medula		Intermediária		Externa	
	Clone 1	Clone 2	Clone 1	Clone 2	Clone 1	Clone 2
B/I	16,71 Aa ² 2,10 ³	10,73 Bb 2,05	18,84 Aa 2,64	11,24 Bc 2,41	19,02 Ab 2,27	9,98 Bc 2,26
B/P	17,08 Aa 1,88	11,26 Bb 2,14	19,53 Aa 2,89	12,57 Bb 2,35	20,04 Aab 2,52	10,58 Bbc 2,03
A/I	17,19 Aa 2,54	11,37 Bb 2,31	18,73 Aa 2,58	12,61 Bb 2,25	19,61 Aab 2,63	11,61 Bb 2,39
A/P	18,04 Aa 2,61	16,06 Ba 2,78	19,95 Aa 2,61	17,95 Ba 2,28	20,89 Aa 2,47	18,88 Ba 2,55

¹baixa/inclinada (B/I), baixa/plana (B/P), alta/inclinada (A/I) e alta/plana (A/P). ²Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Letra maiúscula na linha = Diferença entre clones dentro de uma mesma posição radial e condição de crescimento. Letra minúscula na coluna = Diferença entre condições de crescimento dentro de um mesmo clone e posição radial. ³Desvio padrão (μm).

Espessura da parede das fibras

O teste F para a interação clone x condição de crescimento foi significativo ($p < 0,05$), indicando existir uma dependência entre os efeitos desses fatores na espessura da parede das fibras (Tabela 2). Os clones apresentaram diferenças entre si para espessura da parede nas condições baixa/plana e alta/plana. Na primeira, o clone 1 produziu fibras mais espessas e na segunda, o clone 2 (Tabela 5).

Tabela 5. Valores médios da espessura da parede celular das fibras (μm) da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para diferentes condições de crescimento.

Table 5. Mean values of cell wall thickness of fibers (μm) of wood of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* clones under different growth conditions.

Condições de Crescimento ¹	Clone	
	Clone 1	Clone 2
B/I	3,88 A ² a ³ 0,92 ⁴	3,72 Aab 0,91
B/P	3,71 Aab 0,86	3,48 Bb 0,83
A/I	3,47 Ab 0,89	3,66 Aab 1,02
A/P	3,68 Bab 0,94	3,91 Aa 0,96

¹baixa/inclinada (B/I), baixa/plana (B/P), alta/inclinada (A/I) e alta/plana (A/P). ²Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. ³Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. ⁴Desvio padrão (μm).

As fibras da madeira produzida pelo clone 1 na condição de crescimento baixa/inclinada apresentaram paredes mais espessas do que as produzidas pelo mesmo na condição alta/inclinada. Já para o clone 2, as diferenças na espessura da parede foram significativas entre as áreas alta/plana e baixa/plana, indicando que nessa topografia as condições edafoclimáticas da região alta estimularam o espessamento da parede celular.

Na região alta, observou-se uma tendência de valores de espessura de parede um pouco maiores na topografia plana (A/P), para ambos os clones. Em termos relativos, a espessura da parede das fibras nessa condição (A/P) foi aproximadamente 6% maior do que na topografia inclinada da mesma região (A/I).

Esse comportamento observado na condição de crescimento alta/inclinada pode ser explicado pelo fato da inclinação do terreno reduzir o período diário de incidência direta dos raios solares (PEREIRA et al., 2002), e conseqüentemente reduzir a produção de fotoassimilados. Desta forma, considerando-se uma visão parcimoniosa do espessamento da parede celular, o qual ocorra apenas em função da disponibilidade de fotoassimilados (DELEUZE; HOULLIER, 1998; DREW et al., 2010), o ângulo de incidência dos raios solares afetará diretamente a espessura da parede celular das fibras. O fotoperíodo, além de influenciar o espessamento da parede, controla a cessação da produção dos elementos fibrosos (BÖHLENIUS et al., 2006).

Na região baixa, a tendência foi de maiores valores de espessura de parede na madeira produzida na topografia inclinada (B/I), sendo aproximadamente 6% maior que na topografia plana da mesma região (B/P). Esse resultado foi inverso ao observado na região alta, mas isso não invalida as discussões já realizadas.

O comportamento observado na região baixa deve-se, provavelmente, às melhores aptidões do solo do terreno inclinado em comparação ao solo do terreno plano (Tabela 1). Supõe-se que essa característica se contraponha à redução do período diário de incidência direta dos raios solares, causado pela inclinação do terreno. Além disso, alguns estudos relatam a ocorrência de maiores valores de espessura de parede em árvores que cresceram em solos com menor disponibilidade hídrica (COSMO, 2008; LUCHI, 2004), característica essa presente nas áreas da região baixa (Tabela 1) e mais acentuada na topografia inclinada.

Coefficiente de Rigidez, coeficiente de flexibilidade e Índice de Runkel

Os coeficientes de rigidez médios para a interação clone x condição de crescimento estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores médios do coeficiente de rigidez (%) da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para as interações "Clone x Condição de crescimento".

Table 6. Mean values of wood rigidity coefficient (%) of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* clones for the interactions "Clone x Growth condition".

Condições de crescimento ¹	Clone	
	Clone 1	Clone 2
B/I	58 B* c** 0,09 ²	61 A ab 0,07
B/P	60 A b 0,08	60 A ab 0,07
A/I	65 A a 0,07	61 B a 0,07
A/P	60 A bc 0,09	58 A b 0,09

¹baixa/inclinada (B/I), baixa/plana (B/P), alta/inclinada (A/I) e alta/plana (A/P). *Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha para o fator clone ou para o fator posição radial não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. **Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. ²Desvio padrão (adimensional).

A diferença entre clones para esse coeficiente somente foi significativa na topografia inclinada de ambas as regiões. Na região alta, o clone 1 apresentou valores aproximadamente 5% maiores, enquanto que na região baixa, o clone 2 apresentou valores aproximadamente 2,5% maiores.

Com exceção ao comportamento do clone 1 na região baixa, valores de coeficiente de rigidez aproximadamente 4,8% menores foram observados na topografia plana. Para a produção de papéis absorventes ("tissue"), deseja-se menores valores desse coeficiente, pois dessa forma tem-se um menor achatamento e amoldamento das fibras, conferindo ao papel uma estrutura mais aberta ("fofa") (BURGER; RICHTER, 1991). Portanto, para a produção desses papéis, a topografia plana seria a mais indicada.

A diferença entre clones para o coeficiente de flexibilidade foi significativa em poucas combinações dos níveis dos fatores posição radial e condição de crescimento (Tabela 7).

Tabela 7. Valores médios do coeficiente de flexibilidade (adimensional) da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para a interação "Clone x Condição de crescimento x Posição Radial".

Table 7. Mean values of wood flexibility coefficient (dimensionless) of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* clones for the interaction "Clone x Growth condition x Position Radial".

Condições de Crescimento ¹	Posição radial					
	Medula		Intermediária		Externa	
	Clone 1	Clone 2	Clone 1	Clone 2	Clone 1	Clone 2
B/I	48 Ba ²	53 Aa	54 Aa	55 Ab	64 Aa	53 Bb
	9,51 ³	6,61	12,75	3,29	10,38	5,46
B/P	49 Aa	53 Aa	59 Aa	62 Aa	60 Ba	67 Aa
	8,81	10,34	11,68	7,20	9,76	10,34
A/I	51 Aa	51 Aa	58 Aa	55 Ab	64 Aa	58 Bb
	9,41	8,41	9,31	8,25	10,11	9,54
A/P	49 Aa	51 Aa	58 Aa	57 Aab	64 Aa	58 Bb
	10,83	7,76	11,43	7,78	12,00	8,30

¹baixa/inclinada (B/I), baixa/plana (B/P), alta/inclinada (A/I) e alta/plana (A/P). ²Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Letra maiúscula na linha = Diferença entre clones dentro de uma mesma posição radial e condição de crescimento. Letra minúscula na coluna = Diferença entre condições de crescimento dentro de um mesmo clone e posição radial. ³Desvio padrão (adimensional).

Na condição de crescimento baixa/inclinada e posição de amostragem próxima à medula, o clone 2 apresentou o maior coeficiente de flexibilidade, enquanto que nessa mesma condição e posição radial externa, o clone 1 apresentou o maior valor. Ainda houve diferença significativa entre os clones nas demais condições e posição radial externa. Na região baixa e topografia plana (B/P), o clone 2 apresentou o maior coeficiente, enquanto que na região alta para ambas as topografias, o clone 1 apresentou os maiores valores.

Nas posições radiais mais externas (intermediária e externa) da madeira do clone 2 houve a tendência de coeficientes de flexibilidade maiores na condição baixa/plana. Quanto maior o valor do coeficiente de flexibilidade, mais flexível será a fibra, ocorrendo maiores possibilidades de ligações entre as mesmas, o que tende a aumentar as resistências à tração e ao estouro (SHIMOYAMA; WIECHETECK, 1993). Assim, quando a madeira for destinada a produção de papéis para imprimir e escrever em que a resistência à tração e ao arrebentamento é desejável, deve-se optar por aqueles materiais e condições de crescimento que conferem à madeira maior valor de coeficiente de flexibilidade. Portanto, de uma forma geral, para esse tipo de papel o clone 2 na região baixa seria a melhor opção, pois o mesmo apresenta coeficiente de flexibilidade aproximadamente 3% maiores. Enquanto que na região alta, o clone 1 com valores aproximadamente 4% superiores ao clone 2, seria o mais adequado. Em relação à topografia, independente do clone, na região baixa a topografia plana é mais indicada, enquanto na região alta a topografia do terreno foi indiferente.

As médias de Índice de Runkel foram significativamente diferentes entre os clones na condição baixa/inclinada, com o clone 1 apresentando valores 12,9% maiores. Na região alta houve diferença significativa entre clones para ambas as topografias, com o clone 2 apresentando valores 14% maiores (Tabela 8).

Tabela 8. Valores médios do Índice de Runkel (adimensional) da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para a interação "Clone x Condição de crescimento".

Table 8. Mean values of wood Runkel ratio (dimensionless) of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* clones for the interaction "Clone x Growth condition".

Condições de crescimento ¹	Clone	
	Clone 1	Clone 2
B/I	0,79 A*a**	0,70 Bab
	0,32 ²	0,12
B/P	0,69 Ab	0,69 Ab
	0,25	0,14
A/I	0,57 Bc	0,67 Ab
	0,20	0,13
A/P	0,70 Bb	0,78 Aa
	0,27	0,12

¹baixa/inclinada (B/I), baixa/plana (B/P), alta/inclinada (A/I) e alta/plana (A/P). *Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha para o fator clone ou para o fator posição radial não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. **Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. ²Desvio padrão (adimensional).

Observou-se que independente do clone considerado, na região baixa a topografia inclinada tendeu a apresentar maiores valores de Índice de Runkel, aproximadamente 8%. Enquanto que na região alta a topografia plana apresentou valores aproximadamente 19% maiores. Sabe-se que quanto maior o valor do índice Runkel maior é a quantidade de parede celular e conseqüentemente mais líquido pode ser absorvido (BURGER; RICHTER, 1991). Assim, para a produção de papéis absorventes na região alta, a topografia plana seria a mais indicada. Já na região baixa, a topografia inclinada seria mais adequada.

As diferenças nos resultados morfológicos das fibras entre condições de crescimento deste estudo evidenciam a importância dos fatores ambientais sobre os índices morfológicos da fibra.

CONCLUSÕES

Neste estudo, o desenvolvimento das fibras de clones de *Eucalyptus* foi afetado pela condições de crescimento, resultando em mudanças em suas dimensões e propriedades anatômicas. A formação de fibras com menores larguras na topografia inclinada sugere uma resposta adaptativa do xilema de *Eucalyptus* às condições de crescimento limitadas por água. Já a formação de fibras mais longas na topografia inclinada da região alta sugere uma resposta às condições de crescimento em que a resistência mecânica para suporte de vento e gravidade é requerida. A redução do período diário de incidência direta de raios solares afetou negativamente o espessamento da parede celular secundária das fibras de *Eucalyptus*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, E.S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood anatomy of some Brazilian species. I: Growth rings and vessels. *IAWA Journal*, Leiden, v. 21, n. 1, p. 3-30, 2000.
- AUSSENAC, G. Déficits hydriques et croissance des arbres forestiers. *Forêt Entreprise*, n. 89, p. 40-47, 1993.
- BARIJ, N.; STOKES, A.; BOGAARD, T.; VAN BEEK, R. Does growing on a slope affect tree xylem structure and water relations? *Tree Physiology*, Victoria, v.27, n. 5, p. 757-764, 2007.
- BHERING, S. B.; SANTOS, H. G.; BOGNOLA, I. A.; CURCIO, G. R.; MANZATTO, C. V.; CARVALHO JÚNIOR, W.; CHAGAS, C. S.; ÁGLIO, L. D.; SOUZA, J. S. de *Mapa de solos do Estado do Paraná: legenda atualizada*. Rio de Janeiro: EMBRAPA Florestas- EMBRAPA Solos - IAPAR, 2008. 74 p.
- BÖHLENIUS, H.; HUANG, T.; CHARBONNEL-CAMPAA, L.; BRUNNER, A.M.; JANSSON, S.; STRAUSS, S.H.; NILSSON, O. CO/FT regulatory module controls timing of flowering and seasonal growth cessation in trees. *Science*, Washington, v. 312, n. 5576, p. 1040–1043, 2006.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. *Anatomia da madeira*. São Paulo: Nobel, 1991. 154p.
- CECCANTINI, G. *Anatomia ecológica do lenho de espécies de cerrado e mata: Casearia sylvestris Sw. e Machaerium villosum Vog.* 1996. 117 p. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- COSMO, N. L. *Anatomia ecológica e crescimento do lenho de Sebastiania commersoniana (Baillon) Smith & Downs, em diferentes condições geomorfológicas e pedológicas da planície do Rio Iguaçu-PR.* 2008. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- DADSWELL, H. E. *The anatomy of eucalypt woods*. Melbourne: Division of Applied Chemistry Technological, 1972. 34 p. (Division of Forest Products Technical Paper, 66).
- DAVIES, P. J. *Plant hormones: biosynthesis, signal transduction, action!* 3 ed. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2004. 776 p.

- DELEUZE, C.; HOULLIER, F. A simple process-based xylem growth model for describing wood microdensitometric profiles. **Journal of Theoretical Biology**, London, v. 193, n. 1, p. 99-113, 1998.
- DENARDI, L.; MARCHIORI, J. N. C. Anatomia ecológica da madeira de *Blepharocalyx salicifolius* (H.B.K.) Berg. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.15, n. 12, p.119-127, 2005.
- DREW, D. M.; DOWNES, G. M.; BATTAGLIA, M. CAMBIUM, a process-based model of daily xylem development in *Eucalyptus*. **Journal of Theoretical Biology**, London, v. 264, n. 2, p. 395-406, 2010.
- DÜNISCH, O.; BAUCH, J. Influence of soil substrate and drought on wood formation of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) under controlled conditions. **Holzforchung**, v.48, n. 6, p. 447- 457, 1994.
- ESAU, K. **Anatomia das Plantas com sementes**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 293 p.
- EZQUERRA, F. J.; GIL, L. A. Wood anatomy and stress distribution in the stem of *Pinus pinaster* Ait. **Investigación Agraria: Sistemas Recursos Forestales**, Barcelona, v. 10, n. 1, p.165–177, 2001.
- FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes: Experimental Designs** package. R package version 1.1.2. Brasília: R package, 2013
- KELLER, R. Influence de la photoperiode sur l'épaisseur des membranes et le diametre des lumens des tracheides de quatre essences resineuses. **Annales des Sciences Forestières**, Paris, v. 35, n. 3, p. 175-185, 1978.
- KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiology of Woody Plants**. 2 ed. San Diego: Academic Press, 1996. 411 p.
- KOZLOWSKI, T. T.; KRAMER, P. J.; PALLARDY, S. G. **The physiological ecology of wood plants**. San Diego: Academic Press, 1991. 657 p.
- KRAMER, P.J. The role of water stress in tree growth. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 13, n. 2, p. 33-38, 1987.
- LARSON, P. R. The indirect effect of drought on tracheid diameter in Red pine. **Forest Science**, Bethesda, v.9, n. 1, p. 52-62, 1963.
- LONGUI, E. L.; BUFOLO, A.; AGUIAR, O. T.; LIMA, I. L.; FLORSHEIM, S. M. B. Anatomia comparada do lenho de *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J. F. Macbr. em dois tipos de vegetação. **Hoehnea**, São Paulo, v. 36, n.4, p. 715-724, 2009.
- LUCHI, A. E. Anatomia do lenho de *Croton urucurana* Baill. (Euphorbiaceae) de solos com diferentes níveis de umidade. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 271-280, 2004.
- LUCHI, A. E.; PEREIRA SILVA, L. C.; MORAES, M. A. Anatomia comparada do lenho de *Xylopia aromatica* (Lam.) Mart. em áreas de cerrado e de plantação de *Pinus elliottii* Engelm. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v.28, n.4, p.809-820, 2005.
- MAÁ CZ, G. J.; VÁ GÁS, E. A new method for staining of cellulose and lignified cell-walls. **Mikroskopie**, Oppenau, v. 16, p. 40-43, 1961.
- MARCATI, C. R.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V.; BENETATI, L. Anatomia comparada do lenho de *Copaifera langsdorffii* Desf. (Leguminosae-Caesalpinoideae) de floresta e cerrado. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 311-320, 2001.
- MARTÍNS, J. A.; ESTEBAN, L. G.; PALACIOS, P.; GARCÍA FERNÁNDEZ, F. Variation in wood anatomical traits of *Pinus sylvestris* L. between Spanish regions of provenance. **Trees**, Danvers, v. 24, n. 6, p.1017–1028, 2010.

MATTOS FILHO, A. Estudo morfológico da madeira do par de espécies vicariantes de *Pithecellobium anajuliae* Riz. e *Pithecellobium tortum* Mart. (Leguminosae-Mimosoideae). **Revista Brasileira de Biologia**, Rio de Janeiro, v. 48, n. 1, p. 143-154, 1989.

MELO JÚNIOR, J. C. F.; CECCANTINI, G.; BONA, C. Anatomia ecológica do lenho de *Copaifera langsdorffii* Desf. (Leguminosae) distribuída em diferentes condições edáficas do cerrado sul-brasileiro. **IHERINGIA Sér. Bot.**, Porto Alegre, v. 66, n.2, p. 189-200, 2011.

MENCUCCINI, M.; GRACE, J.; FIORAVANTI, M. Biomechanical and hydraulic determinants of tree structure in Scots pine: anatomical characteristics. **Tree Physiology**, Oxford, v. 17, n. 2, p.105–113, 1997.

NOSHIRO, S.; BAAS, P. Latitudinal trends in wood anatomy within species and genera: case study in *Cornus* s.l. (Cornaceae). **American Journal of Botany**, Columbus, v. 87, n. 10, p.1495-1506, 2000.

NOSHIRO, S.; BAAS, P. Systematic wood anatomy of Cornaceae and Allies. **IAWA Journal**, Leiden, v. 19, n. 1, p. 43–97, 1998.

OLIVEIRA, J. G. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; ABAD, A. J. I. M.; SILVA, A. G.; FIEDLER, N. C.; VIDAURE, G. B. Parâmetros quantitativos da anatomia da madeira de eucalipto que cresceu em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, 559-567, 2012.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamento e aplicações práticas**. Porto Alegre: Agropecuária, 2002.478 p.

POLGE, H. Facteurs écologiques et qualité du bois. **Annales des Sciences Forestières**, Paris, v.30, n. 3, p. 307-328, 1973.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016.

RIBEIRO, M. L. R. C.; BARROS, C. F. Variação intraespecífica do lenho de *Pseudopiptadenia contorta* (DC.) G.P. Lewis & M.P. Lima (Leguminosae - Mimosoideae) de populações ocorrentes em dois remanescentes de Floresta Atlântica. **Acta Botanica Brasilica**, Belo Horizonte, v. 20, n. 4, p.839-844, 2006.

RICHARDSON, S. D. The external environment and tracheid size in conifers. In: ZIMMERMAN, M. H. (Ed.). **The Formation of Wood in Forest Trees**. New York: Academic Press, 1964. p. 367-388.

RUNKEL, R.O.H. Pulp from tropical wood. **TAAP**, v.35, n. 4, p.174-178, 1952.

SAVIDGE, R. A.; WAREING P. F. A tracheid-differentiation factor from pine needles. **Planta**, v. 153, n. 5, p. 395-404, 1981.

SHIMOYAMA, V. R. S.; WIECHETECK, M. S. S. Características da madeira e da pasta termomecânica de *Pinus patula* var. *tecunumanii* para produção de papel imprensa. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 9, n. 27, p. 63-80, 1993.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 820 p.

TRAPY, F.; GUERN, J. Sensibilité à la température de la réponse à l'auxine des cellules d'*Acer pseudoplatanus* cultivées in vitro. **Physiologie Végétale**, Paris, v. 18, p. 649-653, 1980.

WARDROP, A. B. Cellular differentiation in xylem. In: CÔTÉ, W. A. (Ed). **Cellular ultrastructure of woody plants**. New York: Syracuse University Press, 1965. p. 61–97.

Recebido em 21/03/2016

Aceito para publicação em 20/07/2016