

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Avaliação da estrutura anatômica e da densidade aparente do lenho
e do carvão de árvores de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp.**

Angel Thiane Boschiero Ferreira

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutora em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos
Florestais

**Piracicaba
2013**

Angel Thiane Boschiero Ferreira
Engenheira Florestal

**Avaliação da estrutura anatômica e da densidade aparente do lenho e do
carvão de árvores de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp.**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARIO TOMAZELLO FILHO**

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutora em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos
Florestais

Piracicaba
2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Ferreira, Angel Thiane Boschiero

Avaliação da estrutura anatômica e da densidade aparente do lenho e do carvão de árvores de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp. / Angel Thiane Boschiero Ferreira.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
131 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Anatomia 2. *Eucalyptus* 3. *Corymbia* 4. Carvão 5. Densitometria raios X I. Título

CDD 634.9734
F383a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

*Ao meu filho Matteo,
luz da minha vida,
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Ao meu esposo *André* pelo amor, compreensão e suporte nessa importante etapa da minha vida. E também pela imensurável ajuda na elaboração e confecção dos gráficos do Scilab;

A minha família, minha mãe *Célia*, meu pai *Gílio*, minhas irmãs *Clarissa* e *Daniela* pelo amor, inspiração, incentivo e suporte incondicional;

Ao orientador *Prof. Mário Tomazello Filho*, pela dedicação, competência e paciência na orientação deste trabalho;

Aos Professores *José Otávio Brito*, *Paulo Fernando Trugilho*, *José Tarcísio Lima*, *Gilles Chaix*, *Graciela Ines Bolzon de Muñiz*, *Tadeu dos Santos Dias*, pelo auxílio, sugestões e comentários que fizeram desta, uma melhor tese;

A *Priscila Garcia Geroto* pela inestimável ajuda durante a primeira fase do projeto e também pela amizade;

Aos amigos de laboratório, *Alejandro González*, *Alisson R. Albuquerque*, *Carlos Sette Jr*, *Claudio Anholetto*, *Claudio Lisi*, *Ivanka Oliveira*, *Jedi R. Alvarado*, *Marcos A. Almonacid*, *Marta Leite*, *Matheus Chagas*, *Mariana Franco*, *Mauro Soave Jr.*, *Samara Franzol*, *Tassio Trevizor*, *Ugo Belini*, *Victor Moutinho*, *Vinícius Castro*, pela ajuda contínua e amizade; e também as estagiárias, *Laura Azevedo*, *Laura Simões*, *Fabiana Bastos*, pelo imenso auxílio;

A *Aparecida Bermudez* pelo valioso trabalho na confecção das lâminas histológicas, além de todo o carinho, amizade e conselhos;

A empresa *Aperam Bioenergia* pelo suporte e material concedido;

Ao Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE), em especial a *Udemilson Ceribelli* pelas carbonizações; ao *Antonio Carlos Barbosa*, do IPT, pelo desenvolvimento da técnica de confecção das lâminas de carvão;

Ao *CNPq* bolsa concedida; ao *Departamento de Ciências Florestais* da gloriosa ESALQ;

A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho:

MUITO OBRIGADA !!!

*“The universe is full of magical things patiently
waiting for our wits to grow sharper”*

Eden Phillpotts

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos.....	22
1.1.1 Objetivo geral	22
1.1.2 Objetivos específicos.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 <i>Eucalyptus</i> sp. e <i>Corymbia</i> sp.....	23
2.1.1 <i>Corymbia citriodora</i>	24
2.1.2 <i>Corymbia torelliana</i>	24
2.1.3 <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	24
2.1.4 <i>Eucalyptus cloeziana</i>	25
2.1.5 <i>Eucalyptus grandis hill</i>	25
2.1.6 <i>Eucalyptus pellita</i>	25
2.1.7 <i>Eucalyptus urophylla</i>	26
2.2 Características intrínsecas da madeira.....	26
2.2.1 Anatomia	26
2.2.2 Densidade aparente	28
2.2.3 Lenho juvenil e adulto.....	30
2.3 Carvão	32
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1 Caracterização das áreas de plantações florestais.....	39
3.2 Clones de espécies e de híbridos de <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i>	39
3.3 Amostragem dos discos de madeira.....	42
3.4 Análise macroscópica da madeira	43
3.4.1 Avaliação dos vasos.....	44
3.5 Perfil radial da densidade aparente do lenho.....	45
3.6 Variação da densidade aparente do lenho no tronco das árvores	46
3.7 Determinação das dimensões das amostras do lenho	46
3.8 Carbonização das amostras do lenho.....	47

3.9	Análise microscópica do carvão	48
3.9.1	Confecção de lâminas histológicas do lenho do carvão.....	48
3.10	Perfil radial da densidade aparente do carvão	49
3.11	Variação da densidade aparente do carvão no tronco das árvores	49
3.12	Determinação das dimensões das amostras de carvão	49
3.13	Fluxograma da metodologia	50
3.14	Análise estatística dos resultados	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1	Análise macroscópica da madeira.....	51
4.2	Análise microscópica do carvão	62
4.3	Perfil radial da densidade aparente do lenho	69
4.3.1	Variação da densidade aparente do lenho e do carvão no tronco das árvores.....	86
4.4	Análise da redução das dimensões da madeira para o carvão	95
4.4.1	Imagens radiográficas digitais da madeira e do carvão	95
4.4.2	Redução da largura e do comprimento das amostras de madeira para o carvão (contração tangencial e radial).....	96
5	CONCLUSÕES	103
	REFERÊNCIAS	105
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	121
	ANEXOS.....	123

RESUMO

Avaliação da estrutura anatômica e da densidade aparente do lenho e do carvão de árvores de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp.

A madeira é considerada como estratégica como produto base para inúmeros setores e segmentos da economia mundial e nacional, para a produção de móveis, pisos, construção, celulose, papel e outros produtos e, ainda, no setor energético, para a produção de álcool, e, em especial no Brasil, para o carvão vegetal, em siderúrgicas. O carvão da madeira de florestas plantadas de eucaliptos traz um maior benefício ao país, pela redução da pressão da exploração da madeira das florestas nativas. A transformação da madeira em carvão ocorre através de tratamento térmico, compreendendo diversas fases de aquecimento, com consequente alteração da madeira, como a perda de água, contração, degradação e ruptura da parede celular dos seus elementos anatômicos. Neste aspecto, são incipientes os estudos das alterações da anatomia da madeira dos eucaliptos resultantes do processo de carbonização e sua aplicação na melhoria da estrutura e da qualidade do carvão. Pelo exposto, o presente trabalho tem como objetivo estudar as alterações da estrutura anatômica, densidade aparente e variação dimensional da madeira e do carvão de árvores de 19 clones/espécies/híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*, de plantações da Aperam Bioenergia Jequitinhonha, da região do Vale do Jequitinhonha/MG. Após a análise anatômica macroscópica e de densitometria de raios X, assim como as medições dimensionais de todas as amostras, a madeira das árvores de *Eucalyptus* e *Corymbia* foi submetida ao tratamento térmico de carbonização (450°C) e, na sequência, aplicados métodos de análise da anatomia microscópica, de densitometria de raios X e de avaliação da contração/redução dimensional. Os resultados das análises anatômicas mostraram que os vasos do lenho próximos da medula e da casca são de menor diâmetro-maior frequência e maior diâmetro-menor frequência, respectivamente, com os clones de maior densidade com menor dimensão-maior frequência dos vasos. A análise microscópica comparada da madeira e do carvão mostrou a alteração dos vasos de formato circular a ovalado-oblongo, redução do diâmetro tangencial e aumento da frequência. Da mesma forma, os resultados indicaram que a densidade aparente da madeira é, de modo geral, 50% maior do que a do carvão. Os clones de madeira e de carvão de maior densidade aparente foram os de *C. citriodora* e o de *C. torelliana* x *C. citriodora*; os de menor densidade aparente foram os de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) e de *E. urophylla*. Verificou-se, ainda, que a redução/contração da madeira na carbonização foi maior nos sentidos tangencial (26,06%) e radial (15,94%) e nos clones de maior densidade aparente.

Palavras-chave: Anatomia; *Eucalyptus*; *Corymbia*; Carvão; Densitometria raios X

ABSTRACT

Evaluation of the anatomical structure and apparent density of the wood and charcoal from *Eucalyptus* sp. and *Corymbia* sp. trees

Wood is considered as a strategic base product for numerous industries and sectors of the world and national economy, for the furniture production, flooring, construction, pulp, paper and other products, and also in the energy sector for the production of alcohol, and especially in Brazil, to produce charcoal for the steel manufacture. The charcoal from planted forests of eucalyptus brings a greater benefit to the country, by reducing the pressure of the logging of native forests. The transformation of wood charcoal occurs through heat treatment comprising various stages of heating, with consequent alteration of the wood, such as water loss, shrinkage, and degradation of the cell wall rupture of their anatomical elements. In this aspect, are incipient the studies of the wood anatomy changes of eucalypts resulting from the carbonization process and its application in improving the structure and quality of the charcoal. For these reasons, the present work aims to study the changes of anatomical structure, apparent density and dimensional change of the wood and the charcoal from trees of 19 clones/species/hybrids of *Eucalyptus* and *Corymbia* plantations from Aperam Bioenergy Jequitinhonha, coming from the region Jequitinhonha Valley/MG. After the anatomical analysis macroscopic and X-ray densitometry, as well the dimensional measurements of all the samples, the wood of *Eucalyptus* and *Corymbia* trees was subjected to the heat treatment of carbonization (450° C) and, subsequently, applied methods for the analysis of microscopic anatomy, X-ray densitometry and evaluation of contraction/dimensional reduction. The analysis results showed that the anatomical vessels near the spinal wood and bark are in smaller diameter, higher - frequency and larger-diameter lower frequency, respectively, and clones with higher density has higher frequency and smaller vessels. Microscopic analysis compared the wood and charcoal showed the change in vessels circular shape oblong-oval, reducing the diameter and increasing shear rate. Likewise, the results indicated that the apparent density of the wood is generally 50% greater than that of charcoal. The clones with the highest density were *C. citriodora* and *C. torelliana* x *C. citriodora*, the lower density were *E. urophylla* x (*E. grandis* x *camaldulensis*) and *E. urophylla*. It was also found that the reduction/shrinkage of the wood after carbonization was greater in the tangential directions (26.06 %) and radial (15.94 %) and in the clones of higher apparent density.

Keywords: Anatomy; *Eucalyptus*; *Corymbia*; Charcoal; X-ray densitometry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caracterização da estrutura anatômica microscópica da madeira juvenil, de transição e adulta de <i>Eucalyptus spp.</i> (TOMAZELLO FILHO, 2002).....	27
Figura 2 - Consumo nacional de carvão vegetal de florestas plantadas: 2005 - 12 (ABRAF, 2013).....	36
Figura 3 - Localização no estado de Minas Gerais das plantações de <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i> (BING, 2013; GOOGLE EARTH, 2013)	39
Figura 4 - Esquema do corte das árvores, discos e as amostras para a análise macroscópica e determinação do perfil radial de densidade aparente	43
Figura 5 - Análise macroscópica do lenho (A) seccionamento da seção transversal das amostras do lenho em navalha no micrótomo de deslize; (B) seção transversal com a demarcação das áreas do lenho; (C) imagem da seção transversal do lenho adquirida pelo microscópio estereoscópico para a análise dos vasos.....	44
Figura 6 - (A) Equipamento de dupla-serra circular paralela em corte de amostra; (B) Aparelho QTRS-01X para a determinação do perfil radial de densidade aparente da madeira; (C) Gráfico densidade aparente da madeira (g/cm ³).....	45
Figura 7 - Imagem digital das amostras do lenho. (A) imagem digital lenho aplicada na avaliação da sua largura/comprimento pelo programa AxioVision LE 4.8.; (B) imagem digital da madeira; (C) amostras do lenho na câmara de irradiação do equipamento.....	46
Figura 8 - Amostras de madeira para a carbonização (A) em forno mufla a 450°C (B).....	47
Figura 9 - Fluxograma Material e Métodos.....	50
Figura 10 - Estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do tronco das árvores do clone 13 de <i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>); clone 3 de <i>E. urophylla</i> ; clone 6 de <i>E. urophylla</i> ; clone 8 de <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> ; clone 11 de <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> (Barra: 200 µm)	52

- Figura 11 - Estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do tronco das árvores do clone 18 de *E. urophylla* Flores, clone 19 de *E. urophylla* Timor, clone 15 de *E. urophylla* x *E. pellita*, clone 5 de *E. urophylla*, clone 4 de *E. urophylla* (Barra: 200 μ m)..... 53
- Figura 12 - Estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do tronco das árvores do clone 7 de *E. urophylla*, clone 14 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), clone 9 de *E. camaldulensis* X *E. grandis*, clone 12 de (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*., clone 17 de *E. cloeziana* (Barra = 200 μ m) 54
- Figura 13 - Estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do tronco das árvores do clone 2 de *C. citriodora* x *C. torelliana*, clone 10 de *E. camaldulensis* X *E. grandis*, clone 1 de *C. citriodora* x *C. torelliana*, clone 16 de *C. citriodora* (Barra = 200 μ m) 55
- Figura 14 - Relação funcional entre a densidade e diâmetro e frequência dos vasos do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*..... 59
- Figura 15 - Valor médio do diâmetro e da frequência dos vasos nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* 61
- Figura 16 - Redução média (%) do diâmetro dos vasos nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do carvão do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* 65
- Figura 17 - Relação funcional entre a densidade (g/cm^3) e as características anatômicas tamanho de vaso (μm) e frequência de vasos ($\text{n}^\circ./\text{mm}^2$) para o carvão 65
- Figura 18 - Estrutura anatômica macroscópica comparada da seção transversal do lenho e do carvão do tronco das árvores de *E. urophylla* (clone 3), *E. urophylla* x *E. grandis* (clone 8), *E. urophylla* x *E. pellita* (clone 15), *C. citriodora* x *C. torelliana* (clone 2) e *E. camaldulensis* x *E. grandis* (clone 10) (aumento 200x, Barra = 200 μ m)..... 66

- Figura 19 - Valor médio do diâmetro e da frequência dos vasos nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do carvão do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*68
- Figura 20 - Variação radial da densidade aparente da madeira, com a distinção dos lenhos juvenil, de transição e adulto69
- Figura 21 - Densit. de raios X da madeira do clone 3 - traço azul - e a correlação com a anatomia em 3 pontos distintos (LM, LT e LC)70
- Figura 22 - Densit. de raios X da madeira e do carvão (clone 3) - traço azul/vermelho - e a correlação com a anatomia em 3 pontos distintos (LM, LT e LC)71
- Figura 23 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 1 do clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*)75
- Figura 24 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 3 do clone 3 de *E. urophylla*76
- Figura 25 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 1 do clone 7 de *E. urophylla*77
- Figura 26 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 1 do clone 1 de *C. torellina* x *C. citriodora*78
- Figura 27 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 1 do clone 16 de *C. citriodora*79
- Figura 28 - Densidade aparente média (g/cm^3) da madeira (linha azul - superior) e do carvão (linha vermelha - inferior) em 6 posições (0% a 100%) no sentido longitudinal do tronco das árvores das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*.81
- Figura 29 - Variação da densidade aparente média (g/cm^3) da madeira (superior) e carvão (inferior) no sentido longitudinal do tronco das árvores dos 19 clones de eucalipto/corymbia82

- Figura 30 - Densidade aparente média (g/cm^3) da madeira e do carvão do lenho do tronco das árvores de clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* 86
- Figura 31 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 1 do clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) 89
- Figura 32 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 3, do clone 3 de *E. urophylla* 90
- Figura 33 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 1 do clone 7 de *E. urophylla* 91
- Figura 34 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 1 do clone 1 de *C. torellina* x *C. citriodora* 92
- Figura 35 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 1 do clone 16 de *C. citriodora* 93
- Figura 36 - Relação funcional entre a densidade aparente da madeira e a densidade aparente do carvão de todos os dados (média 19 clones, 3 árvores, 6 posições) 94
- Figura 37 - Seção transversal do lenho (superior) e do carvão (inferior) do lenho do clone 3 de *E. urophylla*, clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), clone 7 de *E. urophylla*, clone 1 de *C. torellina* x *C. citriodora*, clone 16 de *C. citriodora* (Imagens de raios X digital: cor invertida - real) (ordem de menor para maior densidade) 95
- Figura 38 - Relação funcional entre a densidade aparente e contração tangencial e radial do lenho no processo de carbonização das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* 97
- Figura 39 - Valores de redução da largura (%) do lenho para o carvão das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* em 4 posições radiais (20, 40, 60 e 80%) (média de 3 árvores e 6 posições base - topo) 98

- Figura 40 - Valores de redução do comprimento (%) - contração radial - do lenho para o carvão das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*98
- Figura 41 - Contração/Redução tangencial (azul - direita) e radial (vermelha - esquerda) - eixo x - do lenho dos clones 1-10 de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*, no sentido longitudinal (base-topo) do tronco das árvores (eixo y) 100
- Figura 42 - Contração/Redução tangencial (azul - direita) e radial (vermelha - esquerda) - eixo x - do lenho dos clones 11-19 de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*, no sentido longitudinal (base-topo) do tronco das árvores (eixo y) (cont.)..... 101

1 INTRODUÇÃO

Das inúmeras e estratégicas utilizações da madeira de plantações de eucaliptos no Brasil, a produção de carvão vegetal ocupa uma posição relevante. O carvão vegetal tem destaque na economia brasileira e, principalmente, na do estado de Minas Gerais, com um consumo de 59,6 % do total de carvão utilizado no país. A maior demanda de carvão vegetal ocorre no setor siderúrgico, responsável por 1,2 milhão de ha de reflorestamento de eucaliptos, cuja madeira das florestas nativas produzem 26,22 milhões de m³ de carvão e contribuem para produção de 9,63 milhões de toneladas de ferro gusa (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS, 2008).

Apesar da redução do consumo de carvão vegetal, nos últimos anos, sua posição de destaque no setor siderúrgico é indiscutível, contribuindo para a produção de ferro-gusa, aço e ferro-liga. Além da indústria siderúrgica, o carvão vegetal participa, também, como substituto do óleo combustível nas caldeiras e nos fornos de combustão das indústrias de cimento e de materiais primários. No entanto, verifica-se que o carvão vegetal possui alta variabilidade em termos de qualidade, pela influência das características anatômicas, físicas, químicas, mecânicas da madeira e do sistema de produção. Esta variabilidade da qualidade do carvão vegetal pode resultar em perdas, dificultando a operação dos fornos siderúrgicos (TRUGILHO et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2006).

Na produção de carvão vegetal, o tratamento térmico (calor) altera significativamente as propriedades estruturais da madeira, nos processos de carbonização, gaseificação e de combustão (BRITO et. al., 2008). Usualmente, para a produção de energia, a madeira é submetida a faixas amplas de temperatura sendo a carbonização na faixa de 400^o-500^oC (SILVA; TRUGILHO, 2003). Duas estratégias podem ser empregadas quando o objetivo é produzir madeira de alta qualidade. A primeira, mais utilizada até hoje, consiste em melhorar geneticamente a qualidade da madeira das árvores das espécies mais plantadas, como as dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*. A segunda alternativa é a identificação de espécies produtoras de madeira de características adequadas para a aplicação desejada, com a posterior aplicação de programas destinados a aumentar a produtividade das árvores (PEREIRA et al., 2000).

No caso específico do carvão vegetal é preciso avaliar e conhecer as espécies que apresentem madeira de alto crescimento volumétrico e características tecnológicas apropriadas, como densidade e retratibilidade, que favoreçam a produção de carvão vegetal de qualidade. Na avaliação das propriedades tecnológicas da madeira e do carvão a inclusão da análise de parâmetros anatômicos e físicos – com a aplicação da densitometria de raios X para a determinação do perfil radial da densidade aparente do lenho – dentre outros, é fundamental.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a estrutura anatômica e a densidade aparente do lenho e do carvão de árvores de clones de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp., com o objetivo de selecionar clones potenciais para a produção de carvão vegetal de alta qualidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

Caracterização comparativa da estrutura anatômica do lenho e do carvão de árvores de espécies e de híbridos de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp.;

Avaliação comparativa da densidade aparente radial do lenho e do carvão de árvores de espécies e de híbridos de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp.;

Avaliação comparativa da densidade aparente do lenho e do carvão do tronco de árvores de espécies e de híbridos de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp. através da densitometria de raios X;

Avaliação da redução/contração do lenho e do carvão de árvores de espécies e híbridos de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp.;

Indicação de árvores de clones de espécies e de híbridos de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp. para a produção de carvão vegetal de qualidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp.

As árvores dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* são classificadas na família das Mirtáceas, ocorrentes principalmente da Austrália, e compreendem mais de 700 espécies, além de significativo número de variedades e híbridos. No Brasil, o cultivo das espécies dos dois gêneros, em escala econômica, iniciou-se em 1904, com Edmundo Navarro de Andrade, em atendimento às demandas de lenha para prover as locomotivas da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. No entanto, há registros de que árvores dos gêneros foram plantadas, no início do século anterior, em 1825, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro (GONZAGA, 1983; MARTINI, 2004).

As plantações de eucaliptos no Horto de Rio Claro, estado de São Paulo, constituíram a base genética para a sua expansão para outras regiões do país, principalmente, a partir de 1965, com a implementação da Lei dos Incentivos Fiscais ao reflorestamento, que vigorou até 1987 (GONZAGA, 1983; PEREIRA et al., 2000; MARTINI, 2004).

A madeira das árvores adultas das espécies dos dois gêneros é, geralmente, de média a alta densidade, resistente e de baixa estabilidade dimensional (RECORD; HESS, 1949). O gênero *Eucalyptus* é representado por espécies cujas árvores se caracterizam pela alta taxa de crescimento, plasticidade, fuste retilíneo, desrama natural e produzindo madeira de propriedades tecnológica variáveis, adaptando-se às variadas condições de clima e solo (OLIVEIRA et al., 1999).

As espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* (além das do gênero *Pinus*) são as prioritárias e importantes para o atendimento da demanda do setor florestal e industrial vinculado à madeira e seus produtos no Brasil. Inúmeros experimentos realizados com árvores de variadas espécies nativas e exóticas não apresentaram resultados tão interessantes como os obtidos com as árvores de eucalipto, pela qualidade da madeira para a aplicação industrial, alta taxa de crescimento, resistência às pragas e doenças, resposta ao manejo silvicultural e plasticidade genética, etc. Ao mesmo tempo, as restrições impostas à utilização de madeiras nativas de populações naturais, contribuíram para a escolha das espécies de *Eucalyptus* no País. Atualmente, as pesquisas são direcionadas para o aumento da produtividade e da qualidade da madeira das árvores das plantações florestais,

especificamente para a produção de celulose e papel, madeira sólida, painéis, carvão vegetal, dentre outras aplicações industriais (OLIVEIRA; HELLMEISTER, 1998; VALVERDE et al., 2004; TREVISAN et al., 2008).

2.1.1 *Corymbia citriodora*

As árvores de *Corymbia citriodora* têm dimensões de média a grande, atingindo 50 m de altura, 1,2 m de DAP, boa forma do tronco e copa com folhagem rala, ocorrendo na Austrália em Queensland, de Maryborough até Mackay. A madeira da espécie é caracterizada pela densidade básica de 0,7-1,0 g/cm³, alto valor de contração volumétrica e excelente fator anisotrópico. A madeira é utilizada para construção, estrutura, caixotaria, postes, dormentes, mourões, lenha e carvão. Em solos pobres ou com estresse hídrico as árvores podem apresentar o tronco com bifurcação pela deficiência de boro (ou outros minerais); regenera-se por brotações das cepas (OLIVEIRA; HELLMEISTER, 1998; PEREIRA et al., 2000; INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS - IPEF, 2011). As árvores de *C. citriodora* apresentam menor incremento volumétrico anual de madeira, em relação à das espécies tradicionalmente plantadas no Brasil, e podem alcançar, eventualmente, melhor preço de mercado pela sua qualidade para a produção de carvão, postes, serraria, moirões, etc. (VILLAS BÔAS, 2009).

2.1.2 *Corymbia torelliana*

As árvores de *C. torelliana* ocorrem na Austrália, na região de Atherton, Queensland, a 16-19º latitude sul e de 100-800 m de altitude, sendo uma das poucas espécies do gênero, associada às florestas tropicais. Para o seu normal crescimento exige solos férteis e de boa drenagem, produzindo madeira de características e propriedades similares à do *C. citriodora* (FERREIRA, 1979).

2.1.3 *Eucalyptus camaldulensis*

As árvores desta espécie ocorrem em quase todos os estados da Austrália, exceto na Tasmânia, caracterizando-se por se desenvolver em áreas margeando os rios e com a madeira utilizada para serraria, dormentes e carvão. As árvores da espécie são consideradas como adequadas para as zonas críticas de reflorestamento, com deficiência hídrica e restrições de solo, limitantes para árvores de outras espécies. As árvores são, em geral, mais tortuosas do que as de *E.*

grandis, *E. saligna* e *E. propínqua*, produz madeira mais densa, com cerne diferenciado e colorido em relação ao *E. grandis* e *E. saligna*. O resultado de estudos realizados no estado de São Paulo demonstrou que a madeira é recomendada para serraria, postes, dormentes, mourões, lenha e carvão, não sendo utilizada para celulose e papel (FERREIRA, 1979; GOLFARI, 1978), sendo a sua densidade variando de 0,6-0,7 g/cm³ (PEREIRA et al., 2000).

2.1.4 *Eucalyptus cloeziana*

As árvores de *E. cloeziana* são reportadas pela alta taxa de crescimento volumétrico na área de sua ocorrência natural, área de Gympie, no sul de Queensland, podendo atingir 55 m de altura e 2 m de DAP, com excelente forma do tronco. As árvores da espécie estão associadas às de *C. citriodora*, *E. crebra*, *E. acmenoides*, *E. resinifera*, *E. intermedia*, *E. grandis*, *Syncarpia glomulifera*, *Tristania conferta*, *Angophora costata* e *Casuarina tortuosa*. A sua madeira é caracterizada pela grã direita, textura lisa, alta densidade (0,82 g/cm³), durável e utilizada em serraria, postes, estruturas, dormentes, etc. (IPEF, 2011).

2.1.5 *Eucalyptus grandis* Hill

As árvores de *E. grandis* ocorrem no norte do estado de New South Wales, sul (região costeira e central) e norte de Queensland (300 a 900 m de altitude). A madeira é leve, fácil de ser trabalhada e utilizada na Austrália e na África do na construção quando oriunda de árvores adultas; e para caixotaria de árvores de ciclo curto, com problema de empenamento, contração e rachadura após o desdobro. Constituíam-se na principal fonte de matéria prima para a produção de celulose e papel do estado de São Paulo (FERREIRA, 1979), com densidade média de 0,50 g/cm³, propriedades mecânicas de fraco desempenho, baixa estabilidade dimensional e alta suscetibilidade aos cupins de madeira seca (OLIVEIRA; HELLMEISTER, 1998; PEREIRA et al., 2000).

2.1.6 *Eucalyptus pellita*

As árvores de *E. pellita* atingem até 40 m de altura e 1 m de DAP, com boa forma do fuste; em solos pobres alcança 15 a 20 m e em solos arenosos ao nível do mar atinge 5 a 10 m de altura. Ocorre em 2 áreas distintas, distribuindo-se no norte de New South Wales em floresta aberta alta, associando-se às espécies de *E.*

tereticornis, *E. tessellaris*, *E. intermedia* e *C. torelliana*. No sul de Queensland, associam-se ao *E. gummifera*, *E. paniculata*, *E. botryoides* e *E. saligna*. A madeira é de coloração vermelha-escura, de densidade 0,96 g/cm³, sendo utilizada para construções, serraria, estrutura, etc. (GOLFARI, 1978; IPEF, 2011).

2.1.7 *Eucalyptus urophylla*

As árvores de *E. urophylla* ocorrem nas ilhas de Timor e outras a leste do arquipélago indonésio, a 8-10° S latitude e 400-3.000 m de altitude, com a madeira utilizada em construções e estruturas que demandem a alta resistência e, no Brasil, a madeira tem utilização geral (FERREIRA, 1979). Pásztor (1990) indica que foi introduzida em 1919 por Edmundo Navarro de Andrade, em Rio Claro, São Paulo, identificado como *E. alba*. Busnardo (1978) relata que a alta capacidade de hibridação dificultou a precisão exata da espécie do material, sendo oficialmente descrita em 1977 com os estudos de S.T. Blakely. A madeira é de densidade média de 0,56 g/cm³ (PEREIRA et al., 2000), com baixo módulo de elasticidade, baixa resistência mecânica, com restrição à utilização estrutural (OLIVEIRA; HELLMEISTER, 1998).

2.2 Características intrínsecas da madeira

2.2.1 Anatomia

A madeira das angiospermas, como a das espécies de eucaliptos, é caracterizada por uma estrutura anatômica heterogênea constituída por diferentes tipos de células e de tecidos (DREW et al., 2010). Em relação à madeira das gimnospermas, a das folhosas é diferenciada pelos vasos e, geralmente, por uma estrutura anatômica mais complexa com diversos tipos de células, como vasos e diversos tipos de parênquima axial (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; GUERREIRO, 2003).

As características anatômicas da madeira variam entre gêneros, espécies do gênero, entre árvores de mesma espécie, nos sentidos longitudinal e radial do tronco, entre outras. Os vasos e demais elementos anatômicos da madeira apresentam características variadas, em relação à frequência, dimensões, etc., relacionadas com a utilização e características dos produtos à base da madeira,

como papéis, painéis e carvão bem como no processo de preservação e nas propriedades físico-mecânicas da madeira (FLORSHEIM et al., 2000).

A diferença da madeira juvenil em relação à adulta relaciona-se às modificações anatômico-química e física que ocorrem no sentido medula-casca do tronco das árvores adultas, como a evidenciada por inúmeros autores para a madeira de árvores de espécies de eucalipto (TOMAZELLO FILHO, 2002) (Figura 1).

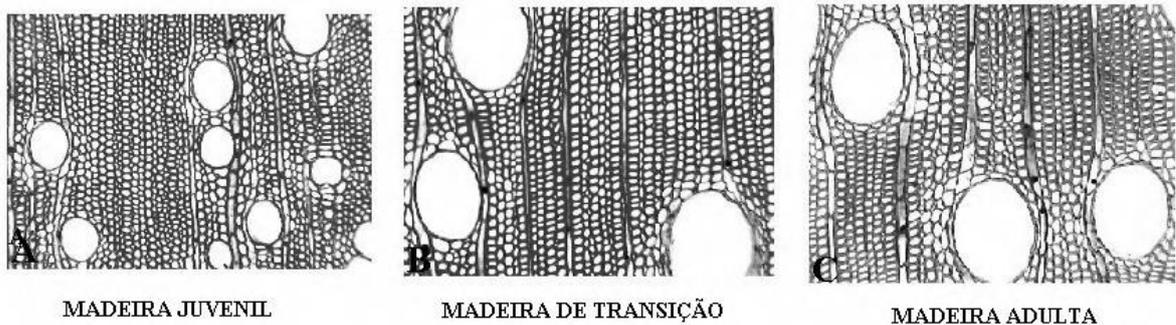


Figura 1 - Caracterização da estrutura anatômica microscópica da madeira juvenil, de transição e adulta de *Eucalyptus spp.* (TOMAZELLO FILHO, 2002)

Florsheim et al. (2000) estudando a variação radial e longitudinal da estrutura anatômica da madeira de árvores de *Eucalyptus saligna*, de 7 anos, constataram no sentido radial o aumento do comprimento, diâmetro e espessura da parede das fibras, com diminuição do seu diâmetro do lume; os vasos têm aumento no comprimento e no diâmetro tangencial e decrescente para a sua frequência.

O resultado da avaliação da madeira de árvores de *Eucalyptus sp.* em idade mais avançada indica melhoria da sua qualidade e maior densidade: a região central do lenho no tronco das árvores tem menor densidade básica, fibras mais curtas e maior quantidade de parênquima, vasos de menor diâmetro tangencial e uma maior frequência por mm² (ROCHA, F. et al., 2004; TOMAZELLO FILHO, 1985, 1987).

Inúmeros artigos científicos na literatura especializada relatam a tendência comum do aumento das dimensões das fibras e do diâmetro/redução da frequência dos vasos do lenho das árvores de espécies de *Eucalyptus sp.* no sentido medula-casca, como os indicados por Shimoyama (1990), Oliveira (1997), Moreira (1999), Lima et al. (2010), Silva (2002), Baptista et al. (2003, apud ROCHA, G. et al., 2004) e Sousa Jr. (2004).

A anatomia do lenho das árvores de *E. grandis* é constituída por células e tecidos com variação das dimensões, distribuição e arranjo estrutural e relaciona-se com as suas propriedades, como resistência físico-mecânica, trabalhabilidade, e

isolamento térmico-acústico (JESUS; VITAL, 1986; ROCHA, F. et al., 2004). Para a produção de carvão vegetal, Oliveira et al. (2006) relataram que a importância de madeira de maior densidade, com fibra de parede espessa/menor diâmetro do lume; menor porcentagem de parênquima e vasos (PAULA et al., 2000).

2.2.2 Densidade aparente

A densidade da madeira é um parâmetro amplamente utilizado para avaliar a qualidade da madeira pela sua correlação com propriedades anatômicas, físicas e tecnológicas (MIRANDA et al., 2001). A densidade da madeira é relacionada com os seus elementos anatômicos, como por exemplo, dimensão das células e espessura da parede celular, sendo que as variações refletem na qualidade e rendimento da polpa, produtos de papel e propriedades de produtos sólidos da madeira (NUGROHO et al., 2012).

A densidade da madeira representa a quantidade de parede celular – da substância madeira – em um dado volume de madeira, ou seja, a massa do material lenhoso por unidade de volume, estando relacionada com as suas propriedades físicas, como a sua dureza, resistência mecânica, etc. (AMARAL, 1994).

Assim como as características anatômicas, a densidade da madeira pode variar entre gêneros, espécies, entre árvores, partes das árvores e sentidos do tronco (SILVA, 2004). Nas árvores de eucalipto, a densidade da madeira varia com a idade, vigor, localidade, taxa de crescimento, entre outros (FERREIRA, 1972; SOUZA et al., 1979).

As variações da densidade de uma amostra de madeira são resultados da disposição e das dimensões dos seus elementos anatômicos. A análise microdensitométrica da madeira indica, desta forma, a cronologia da produção anual de massa lenhosa de uma árvore, importante informação e relacionada com a estrutura anatômica da amostra de madeira (MOTHE et al., 1998).

Os fundamentos metodológicos da microdensitometria de raios X em madeiras, para a observação dos anéis de crescimento das árvores, foram estabelecidos por Polge, na França, em 1963. Entre as diversas utilizações da densitometria de raios X, são citadas, a avaliação da qualidade da madeira, de madeira de reação, comparação de perfis densitométricos do lenho de procedências

de árvores de uma espécie, etc. Estabeleceu-se que a forma dos perfis densitométricos radiais de amostras do lenho das árvores é característica do ano de formação dos anéis de crescimento, com os valores de densidade (máxima, mínima e média) permitindo distinguir os anos e sua posição no lenho (POLGE, 1966).

A radiografia da madeira de *E. camaldulensis* analisada por Tazrout et al. (2012) indicou uma correspondência dos perfis de densidade aparente definindo o limite dos anéis de crescimento, caracterizado pela área dos vasos, faixa tangencial das fibras, que representam os picos de densidade.

Panshin e Zeeuw (1970) apresentaram 3 modelos de variação longitudinal para a densidade básica da madeira (i) decrescente com a altura, (ii) decrescente até certa altura e crescente até o topo da árvore e (iii) crescente da base para o topo, não obedecendo a um padrão uniforme de variação. Para as árvores do gênero *Eucalyptus* o 2º modelo é o mais comum, decrescente no DAP, crescente até determinada altura, decrescendo ou não até o ápice (BARRICHELO et al., 1983).

Para Tsoumis (1991) a idade do câmbio vascular é um dos fatores que ocasionam a variação das dimensões das células da madeira nos sentidos medula-casca e base-topo do tronco de uma árvore. Ainda, Tomazello Filho (2002) verificou que o perfil radial da densidade aparente da madeira de eucalipto se caracteriza pelo aumento do seu valor no sentido radial, evidenciando as madeiras juvenil, transição e adulta. A variação da densidade básica no sentido radial é, geralmente, crescente, aumentando do cerne para o alburno (FOELKEL et al., 1983).

Com análises da madeira e de carvão de *E. saligna*, de 9 anos, pela técnica de raios gama para a determinação da sua densidade, constatou-se a redução da densidade aparente no carvão vegetal com o aumento da temperatura, mantendo o modelo de variação radial: a densidade no cerne é menor e aumenta em direção à casca (FERRAZ; TOMAZELLO FILHO, 1978; COUTINHO; FERRAZ, 1988).

Silva et al. (2004) avaliaram a variação da densidade aparente da madeira de árvores de *E. grandis* de 10, 14, 20 e 25 anos e posições radiais por densitometria de raios X, verificando a tendência do aumento da densidade aparente com a idade e variação radial, com menor e maior valor de 0,46 de 0,63 g/cm³ de densidade média encontrados nas árvores de 10 e 20 anos, respectivamente.

A variação radial da densidade aparente da madeira para *E. grandis* x *E. urophylla*, de 7 anos, determinada por Chagas et al. (2005) por densitometria de raios X indicou aumento dos valores da medula para a casca de 0,51-0,71 e 0,63-0,82 g/cm³.

Tomazello Filho (2006) estudando a variação radial da densidade aparente do lenho de árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*, de 7 anos, por densitometria de raios X apresentou o modelo de variação com valores crescentes da medula para a casca, com uma densidade aparente média de 0,65 g/cm³. Sette Junior et al. (2009) avaliaram a densidade aparente do lenho de árvores de *E. grandis*, de 2 anos, mostrando um perfil característico da madeira juvenil, com o seu aumento no sentido medula-casca, similar ao observado para árvores de *E. grandis*, de 5 anos (SETTE JUNIOR, 2010).

2.2.3 Lenho juvenil e adulto

A maior variação na madeira ocorre no sentido radial. A extensão desta variação é, principalmente, determinada pela presença da madeira juvenil, sua proporção no tronco, suas características físico-químicas e anatômicas. Todavia a elevação do gradiente de variação dentro da zona juvenil diminui com o passar do tempo. As variações que ocorrem durante o período juvenil estão relacionadas principalmente com as dimensões celulares, a organização da parede celular e as características físico-químicas da madeira (TRUGILHO et al., 2005). Estas variações, segundo Kollmann e Cotê (1968) se devem às diferenças na estrutura anatômica da madeira e na quantidade de substâncias extrativas presentes por unidade de volume, sendo função, principalmente, da idade da árvore, genótipo, índice de sítio, clima, localização geográfica e tratos silviculturais.

Trugilho et al. (1996) observaram tendência da estabilização do teor de cinzas, extrativos totais, lignina e holocelulose com o aumento da idade das árvores de *E. saligna*. A característica química da madeira relaciona-se às variações da madeira juvenil, com valor mais estável na madeira adulta; os componentes químicos da madeira estão sujeitos às variações em período de tempo inferior ao das dimensões das fibras, com valor normal a partir do 36^o mês.

A madeira juvenil apresenta como características (i) mais xilanas e lignina; (ii) menos celulose e glucomananas; (iii) menor comprimento das fibras e vasos; (iv) menor diâmetro celular; (v) parede celular mais fina; (vi) menor densidade básica; (vii) maior ângulo fibrilar e maior proporção de fibras e menor proporção de vasos (KOGA, 1988).

A transformação do alburno em cerne, conhecido como cernificação é caracterizado pela morte do parênquima radial, consumo do amido, aumento do teor de extrativos e tiloses, consumo de oxigênio e liberação de CO₂; aumento do teor de extrativos – polifenóis – deve-se à alteração da atividade fisiológica (HIGUCHI, 1997).

O cerne possui diferença marcante em relação ao alburno sendo que as diferenças mais importantes são: (i) o cerne contém mais compostos fenólicos e ácidos e menos amido do que o alburno; (ii) a lignina do cerne apresenta um peso molecular mais elevado e é mais condensada; (iii) o cerne das coníferas contém mais extrativos e menos lignina e celulose e, nas folhosas essa diferença não é consistente (BROWNING, 1963); (iv) o cerne apresenta menor teor de umidade devido à redução da atividade fisiológica e (v) o cerne é menos permeável, menos denso que o alburno (BURGER; RICHTER, 1991).

A heterogeneidade das propriedades da madeira exige adaptações dos processos na indústria de transformação e processamento, com a sua variação química relacionada com estrutura anatômica da madeira, idade, manejo, entre outros. A madeira juvenil é formada no fuste nos primeiros anos de vida das árvores, sendo diferenciada da madeira adulta (SEVERO et al., 2006). A madeira juvenil ocorre na região central do tronco das árvores, como um cilindro de diâmetro uniforme da sua base até o topo (MEGRAW, 1985; SENFT et al., 1985; THOMAS, 1985; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; EVANS et al., 2000).

Segundo Tsoumis (1991) a idade da árvore não coincide com a idade do lenho em todas as regiões do seu tronco, com madeira de diferentes idades. Em uma árvore de 100 anos, o câmbio localizado na região da base do tronco próxima à casca possui 100 anos, produzindo madeira característica da idade; no ápice do tronco da árvore, o câmbio foi formado recentemente, produzindo madeira juvenil. Existe uma maior proporção de madeira juvenil no lenho do tronco do topo da árvore

e menor na sua base (ZOBEL; TALBERT, 1984). No topo de uma árvore adulta, o lenho de ramo de 10,2 cm é constituído de madeira juvenil (ZOBEL et al., 1972).

2.3 Carvão

O calor é um dos tratamentos mais importantes no processamento de madeira. Em alguns tratamentos (ex. secagem) o calor não altera significativamente a estrutura e as propriedades da madeira, enquanto que em outros tratamentos (tais como a carbonização da madeira, gaseificação e combustão) a degradação causada pelo calor é bastante intensa. A perda de massa da madeira tem sido utilizada como critério na classificação dos estágios de degradação, quando submetida ao tratamento de calor, sendo que na produção do carvão o estágio final ocorre acima de 350°C, com a degradação da lignina (BRITO et al., 2008).

O carvão vegetal é um produto florestal resultante da pirólise da madeira, também conhecida como carbonização ou destilação seca da madeira. No processo de carbonização a madeira é aquecida em ambiente fechado, na ausência ou presença de quantidades controladas de oxigênio, a temperaturas acima de 300°C, desprendendo vapores d'água líquidos orgânicos e gases não condensáveis. Da fração volátil obtêm-se o líquido pirolenhoso composto pelo ácido pirolenhoso e alcatrão insolúvel. O carvão depende da temperatura de carbonização, da espécie e idade da árvore. Com a evolução da silvicultura e da tecnologia siderúrgica foram selecionadas espécies de madeira adequada para a utilização em alto-forno, considerando o rendimento do carvão, teor de carbono, densidade, etc. (FERREIRA, 2000; CASTRO et al., 2007).

Nas carvoarias a madeira colhida é empilhada no pátio e transportada para os fornos e pelo carvoejamento ou pirólise obtêm-se o carvão, água, gás carbônico, líquido pirolenhoso (gases condensados) e outros subprodutos; sendo que geralmente com 1 tonelada de madeira pode-se gerar 250-400 kg de carvão, dependendo da tecnologia utilizada (VITAL; PINTO, 2009). Almeida e Rezende (1982) relataram que o objetivo da carbonização é aumentar o teor de carbono fixo na madeira pelo tratamento térmico sendo necessária a aplicação de vários processos físicos e químicos (OLIVEIRA et al., 1982).

As regiões do cerne e do alburno apresentam comportamento distinto no processo da degradação térmica pelas diferenças anatômico-física e químicas. A decomposição térmica de materiais celulósicos é um assunto bem estudado, porém, a avaliação da variação dimensional sofrida pela madeira em altas temperaturas ainda não é bem conhecida. É fato conhecido que a madeira, sob a ação do calor, sofre variação em suas dimensões, seja linear, superficial e volumétrica. Em temperatura elevada a madeira sofre transformações resultando na modificação dos seus componentes anatômicos como a redução da espessura da parede das células, deformação e ruptura de elementos celulares, além da perda de massa e sua contração (GOMES; OLIVEIRA, 1982; SILVA; TRUGILHO, 2003; SCHWEINGRUBER et al., 2006; KWON et al., 2009). Moutinho (2013) estudando a madeira de árvores de 10 clones de *Eucalyptus* com idades em torno de 6 anos constatou que a degradação linear e volumétrica, à exceção da linear longitudinal, é maior no sentido base-ápice do fuste e que a retratibilidade não tem correlação significativa com a sua densidade.

Na utilização energética da madeira para energia, destaca-se a produção do carvão vegetal em decorrência da demanda pelo setor siderúrgico. Neste aspecto, o Brasil é o maior produtor mundial de aço a partir do carvão vegetal (BRITO, 2007). Ainda, Vital e Pinto (2011) relatam que 86% do carvão produzido no país são utilizados para a obtenção do ferro gusa.

A indústria siderúrgica que utiliza o carvão vegetal como redutor apresenta vantagem em relação ao coque de carvão mineral, por ser uma fonte renovável, não gerar emissão de enxofre e possuir um balanço de CO₂ com saldo de absorção maior do que o da emissão (ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MINAS GERAIS - ALMG, 2004). Santos Junior (2011) relata que a relação da emissão e captura de CO₂ e de O₂/ton. de ferro-gusa apresenta significativa diferença entre a rota do carvão vegetal e do coque de carvão mineral. Relaciona-se a vantagem ambiental da rota tecnológica do carvão vegetal de florestas plantadas pela captura de CO₂/emissão de O₂ de 3.697 kg e 1.789 kg, por tonelada de ferro-gusa, respectivamente. Verifica-se o ganho ambiental de 3 ton. CO₂/ton. de ferro se comparada a rota do carvão vegetal com a do coque.

O carvão mineral é o combustível mais poluente utilizado em termos de emissão de gases de efeito estufa superando o petróleo e o gás natural, da mesma

forma, combustíveis fósseis. Em substituição ao coque de carvão mineral pode ser utilizado o carvão vegetal na produção do aço, sendo considerado o coque renovável. A matriz energética brasileira é reconhecidamente a mais limpa do mundo e é a única que produz ferro-gusa a partir de carvão vegetal (ROCHA, 2011; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013).

As empresas siderúrgicas podem utilizar a madeira para a produção de carvão oriundo de plantações florestais, como as dos eucaliptos, pela sua maior densidade, como a do *E. urophylla* e de *E. camaldulensis* (BACHA; BARROS, 2004).

A baixa densidade do carvão vegetal acarreta menor utilização do volume do alto-forno; como a densidade do carvão vegetal é cerca de um quarto da do coque, quanto mais denso o carvão vegetal para um mesmo teor de carbono fixo, maior será o tempo de residência da carga metálica na zona de reserva térmica do alto-forno e maior a carga do equipamento em termos de mais carbono carregado/volume (BRITO; BARRICHELO, 1980; PIMENTA; BARCELOS, 2000).

Madeiras de maior densidade apresentam maior poder calorífico/unidade volumétrica e madeiras mais leves possuem aproximadamente o mesmo poder calorífico/unidade de peso, porém menor poder calorífico/unidade de volume. O uso da madeira de maior densidade para fins energéticos apresenta as vantagens de: (a) menor área de estocagem e manuseio da madeira; (b) maior rendimento energético no transporte; (c) maior rendimento das caldeiras para queima direta da madeira; (d) maior rendimento dos gaseificadores da madeira para produção de gasogênio ou gás de síntese do metanol; (e) maior rendimento dos reatores para hidrólise ácida. Madeira de maior densidade produz carvão de densidade aparente maior, conferindo maior resistência mecânica ao carvão e maior capacidade calorífica/unidade de volume (PEREIRA et al., 2000).

As siderúrgicas preferem utilizar carvão de densidade acima de 240 kg/m³ considerando que sua maior resistência mecânica resulta em melhor o desempenho do alto-forno (GOMES, 2006). A quantidade de carbono/m³ é mais alto em madeira de alta densidade com reflexo no processo de redução e, conseqüentemente, uma maior produtividade (FREDERICO, 2009). A madeira de maior densidade e elevado teor de lignina apresenta bom rendimento e qualidade do carvão (PEREIRA et al., 2000; SAMPAIO, 2008; SANTOS, 2008; VALE et al., 2010). Pode-se, afirmar, que a

madeira para carvão deve ser a mais seca, com peso a granel e densidade aparente elevada, maior percentagem de lignina e baixo custo (JUVILLAR, 1979).

Segundo Oliveira et al. (2010) a implantação de florestas para a produção de carvão vegetal exige seleção de material genético, adoção de técnicas silviculturais, aliando a produtividade da madeira à qualidade para fins energéticos. Verifica-se que as plantações para a produção de madeira para carvão vegetal tem reduzido o ciclo de corte de 6-7 para 5 anos (já se considera o período de 3,5-4 anos).

A produção nacional de carvão vegetal de plantações tem incrementado desde 2002 apresentando, no entanto, em 2009, o valor de 3.378.492 ton., com queda de 15,0%. O carvão oriundo do extrativismo mostrou queda de 26,2% entre 2008 e 2009, com uma produção de 1.639.779 ton. A produção de carvão vegetal em 2009 foi de 5.018.271 ton., 19,0% menor que a de 2008, com 6.197.383 ton. (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2009). Em 2010 houve um aumento da produção de carvão de plantações de 1,6% e queda da produção de carvão de extrativismo de 9,1% (IBGE, 2010).

O estado de Minas Gerais possui a maior área de plantações de eucalipto do país, 1.438.971ha em 2012, de um total de 5.102.030ha no Brasil. Em 2012, o consumo de toras de madeira de plantações florestais foi 182,4 milhões m³, sendo 7,2% superior ao de 2011; onde 12,7% foram usados na produção de carvão para a produção de ferro e aço (ABRAF, 2012, 2013). Em 2010, os estados produtores de carvão vegetal de florestas plantadas foram Minas Gerais (81,2%), Bahia (5,8%), Maranhão (5,5%), São Paulo (1,9%) e Mato Grosso do Sul (1,6%) (IBGE, 2010).

O consumo de carvão vegetal oriundo de florestas plantadas vem apresentando, no setor de siderurgia um crescimento de 61,4% no período 2009-2012 (Figura 2) decorrente de vários fatores, como a pressão dos grandes consumidores nacionais e internacionais de ferro-gusa para a redução ou eliminação do carvão de florestas nativas, aliado às exigências ambientais nacionais mais intensas através de leis e regulamentos. Por outro lado, as indústrias independentes ou integradas de produção de ferro-gusa e ferro-ligas, grandes consumidoras de carvão vegetal estão aumentando a eficiência do processo de carbonização da madeira e do processo industrial aprimorando a sustentabilidade ambiental, econômica e social da produção de carvão vegetal e siderúrgica (ABRAF, 2013).

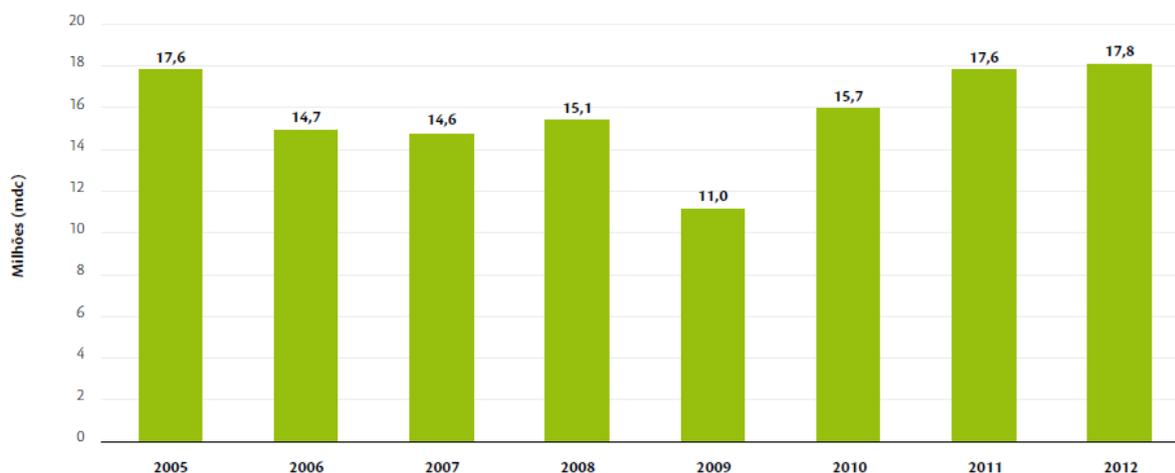


Figura 2 - Consumo nacional de carvão vegetal de florestas plantadas: 2005 - 12 (ABRAF, 2013)

De modo geral, a qualidade do carvão depende das características da madeira e do método de carbonização, com a densidade constituindo-se em uma das propriedades mais importantes: quanto mais denso o carvão, maior é a quantidade de energia/unidade de volume e melhor o aproveitamento do espaço do reator. O processo de carbonização influencia a dimensão do carvão, sendo que a carbonização lenta implica no menor fracionamento das peças de carvão, onde os fornos contínuos devem ser carregados com peças de madeira de menor tamanho. A temperatura de carbonização influencia, também, no peso/m³ e no teor de carbono fixo do carvão, sendo que o carvão desejável para o alto forno deve apresentar como propriedade (i) física, densidade, pouco friável, granulometria uniforme e suficiente resistência à compressão; (ii) química, alta % de carbono fixo, baixa % de cinzas e de fósforo. Deve-se evitar que o carvão se molhe no processo de manuseio, transporte e de estocagem (O EUCALIPTO, 2003).

A área de plantações florestais necessária para que o ferro-gusa fabricado com carvão vegetal não seja procedente de desmatamento de florestas nativas necessita ser ampliada mais do que o dobro da atual por um período de 10 anos. Da mesma forma, o aumento da produtividade do processo de carvoejamento de 250 para 350-400 kg/ton deverá reduzir à metade a necessidade de área de floresta plantada; o aumento da produtividade do carvão e da área de floresta plantada reduz a menos de 50% do que é necessário atualmente (VITAL; PINTO, 2009).

Comparando-se o custo médio de uma unidade produtora de carvão vegetal a partir de madeira de plantações e de uma unidade produtora de ferro-gusa em

coqueria própria, estima-se que o custo de produção de ferro-gusa a carvão vegetal é 46,5% superior do que o de gusa a carvão mineral (SANTOS JUNIOR, 2011).

De acordo com a Associação Mineira de Silvicultura - AMS (2009), as plantações florestais no Brasil não são suficientes para o suprimento da atual demanda de carvão, sendo que para Mota (2013) os fatores limitantes da cadeia produtiva do carvão vegetal são (i) falta de material genético adequado para a produção de carvão vegetal; (ii) deficiência no manejo florestal direcionado para a formação de florestas visando a qualidade da madeira para a produção do carvão; (iii) necessidade do reaproveitamento dos gases dos fornos de produção: o reaproveitamento de gases liberados durante o processo de produção para a secagem da madeira e outras aplicações, somando-se a diminuição dos gases liberados no ambiente; (iv) baixa qualidade da madeira para maior rendimento gravimétrico e carvão com menor teor de finos e cinzas, etc.

A necessidade de investimento em pesquisas para a seleção de madeira de material genético direcionada para a produção de carvão vegetal é destacada por Botrel et al. (2007). Ainda, as empresas florestais desenvolvem parte das pesquisas de seleção de material genético para a produção de celulose e papel, porém, há falta de material genético para a produção de carvão vegetal (MOTA, 2013). Portanto, é primordial a seleção de espécies, híbridos e clones de *Eucalyptus* com propriedades para a produção de carvão - propriedades físicas, químicas e anatômicas, tais como alta densidade, alto teor de lignina, fibras de parede espessa/menor largura - que gerem carvão com alto teor de carbono fixo, baixa quantidade de minerais e finos, resistência mecânica e densidade elevada (TRUGILHO et al. 1997, 2001; CAMPOS, 2008; NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011, 2012; ROCHA, 2011, SANTOS et al., 2011).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das áreas de plantações florestais

As plantações dos materiais genéticos de *Eucalyptus* e *Corymbia* estão instaladas na região do Alto Jequitinhonha, nos municípios de Capelinha, Itamarandiba, Minas Novas, Turmalina e Veredinha/MG, da empresa Aperam Bioenergia (antiga Arcelor Mittal Bioenergia). A região com as coordenadas geográficas de latitude 17° 41' 38" S; longitude 42° 31' 07" W, altitude de 1.070 m (Figura 3), é caracterizada por uma precipitação pluviométrica média anual de 1166 mm; temperatura média anual de 21°C; clima classificado como tropical de altitude, CWA; solo tipo latossolo vermelho distrófico típico e vermelho-amarelo distrófico típico, textura argilosa ou muito argilosa, bem estruturada; topografia plana (chapadas) e vegetação nativa, classificada como bioma de cerrado.



Figura 3 - Localização no estado de Minas Gerais das plantações de *Eucalyptus* e *Corymbia* (BING, 2013; GOOGLE EARTH, 2013)

3.2 Clones de espécies e de híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Os clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* selecionados para o presente trabalho, com a respectiva identificação numérica, identificação numérica sequencial, data da coleta, idade, local do plantio e nome dos clones encontram-se relacionados na Tabela 1. As árvores dos clones foram plantadas no espaçamento 3,0 x 2,0 m e aplicado o mesmo manejo florestal.

Tabela 1 - Clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp.

Nr. Clones	Identificação	Data do Plantio	Data da coleta	Idade (anos)	Local do plantio	Nome Clones
6	1	2004	16/jul/09	5	Talhão 205/Projeto 648 - São Bento (Ita)	Híbrido espontâneo <i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
43	2	2004	16/jul/11	7	Talhão 205/Projeto 648 - São Bento (Ita)	Híbrido espontâneo <i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>
144	3	2003	09/jul/09	6	Talhão 1080/Projeto 643 - Cruz Grande (Ita)	Híbridos espontâneos <i>E. urophylla</i>
182	4	2003	08/jul/09	6	Talhão 1812/Projeto 640 - São Caetano (Cap)	Híbridos espontâneos <i>E. urophylla</i>
220	5	2003	08/jul/09	6	Talhão 997/Projeto 643 - Cruz Grande (Ita)	Híbridos espontâneos <i>E. urophylla</i>
224	6	2003	08/jul/09	6	Talhão 577/Projeto 643 - Cruz Grande (Ita)	Híbridos espontâneos <i>E. urophylla</i>
296	7	2003	07/jul/09	6	Talhão 545/Projeto 643 - Cruz Grande (Ita)	Híbridos espontâneos <i>E. urophylla</i>
344	8	2003	06/jul/09	6	Talhão 576/Projeto 643 - Cruz Grande (Ita)	Híbrido polinização controlada <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>
601	9	2003	14/jul/09	6	Talhão 1743/Projeto 640 - São Caetano (Cap)	Híbridos espontâneos <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>
953	10	98/97	15/jul/09	10	Talhão 80/Projeto 618 - São Bento (Ita)	Híbridos espontâneos <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>
1528	11	2003	07/jul/09	7	Talhão 544/Projeto 643 - Cruz Grande (Ita)	Híbrido polinização controlada <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
2034	12	2003	01/jul/09	6	Talhão 189/Projeto 644 - São Bento - Banco Clonal 2003 (Ita)	Híbridos polinização controlada tricross (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>) x <i>E. urophylla</i>
2111	13	2003	01/jul/09	6	Talhão 189/Projeto 644 - São Bento - Banco Clonal 2003 (Ita)	Híbridos polinização controlada tricross <i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>)
2115	14	2003	02/jul/09	6	Talhão 189/Projeto 644 - São Bento - Banco Clonal 2003 (Ita)	Híbridos polinização controlada tricross <i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>)
2475	15	2003	02/jul/09	6	Talhão 190/Projeto 644 - São Bento - Banco Clonal 2003 (Ita)	Híbridos polinização controlada <i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i>
-	16	2002	10/jul/09	8	Talhão 964/Projeto 639 - Cruz Grande (Ita)	<i>C. citriodora</i>
-	17	2002	13/jul/09	8	Talhão 206/Projeto 648 - São Bento	<i>E. cloesiana</i>
-	18	2004	03/jul/09	5	Talhão 205/Projeto 648 - São Bento (Ita)	<i>E. urophylla</i> Flores
-	19	2004	03/jul/09	5	Talhão 205/Projeto 648 - São Bento (Ita)	<i>E. urophylla</i> Timor

Caracterização dos clones *Eucalyptus* e de *Corymbia*

Clones 1 e 2 - Híbridos espontâneos de ***C. citriodora* x *C. torelliana*** clone (1) AEC-0006: oriundos de plantação estabelecida em 1985, no Vale do Rio Doce, MG, com uma linha de mudas de sementes de *C. citriodora* de origem australiana, procedência Marliéria, MG ex Rio Claro, SP e outra linha com mudas de sementes de *C. torelliana*, de origem australiana. Em 2000 foram colhidas sementes nas árvores de *C. citriodora* e de *C. torelliana*, plantadas separadamente, com identificação do genitor feminino. Posteriormente foram selecionados as árvores com as características híbridas e clonados ; (clone 2) - AEC-0043 e ***C. torelliana* x *C. citriodora***;

Clones 3, 4, 5, 6 e 7 - clones de híbridos espontâneos de ***E. urophylla***: híbridos naturais segregantes, produzidos por polinização livre e clonados a partir de plantação comercial de *E. urophylla*, estabelecidos com sementes de Área Produtora

de Sementes (APS) de Turmalina, MG. Os progenitores femininos são matrizes da APS e os masculinos, são uma amostra de pólen das árvores da APS;

Clone 8 - Clones de híbrido de polinização controlada de *E. urophylla* x *E. grandis* resultado do cruzamento controlado das matrizes 13 de *E. urophylla* (progenitor feminino) e 19 de *E. grandis* (progenitor masculino). A matriz de *E. urophylla* foi selecionada em uma APS formada com sementes da Ilha de Timor. A matriz de *E. grandis* foi obtida em um Pomar de Sementes por Mudas (PSM) localizado no município de Minas Novas, MG estabelecido a partir de um teste de progênies que continha 90 famílias, sendo 30 de Atherton-QLD, Austrália, 40 famílias da África do Sul e 20 famílias de uma raça local existente na região de Viçosa, MG;

Clones 9 e 10 - Clones de híbridos espontâneos de *E. camaldulensis* x *E. grandis* material selecionado e clonado de plantaçoão comercial de *E. camaldulensis* proveniente de Zimbabwe;

Clone 11 - Clones de híbrido de polinização controlada de *E. grandis* x *E. urophylla* híbridos de polinização controlada, com o progenitor feminino a matriz 36 de *E. grandis* de Atherton, Austrália, de um Pomar de Sementes Clonal (PSC) formado, também, com árvores oriundas de sementes da África do Sul e Viçosa, MG. O progenitor masculino é a matriz 10 de *E. urophylla* de um PSC estabelecido com matrizes selecionadas de uma APS em Turmalina, MG, cuja origem é Timor. Os cruzamentos foram realizados em 1990, estabelecidos em testes de progênies híbridas, onde foram selecionadas as árvores que originaram os referidos clones;

Clone 12 - Clones de híbrido de polinização controlada Tricross de (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*: clone como progenitor feminino o híbrido espontâneo (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), clone I-3000 ex Zimbabwe, procedência Itamarandiba, MG e como progenitor masculino a matriz 09 de *E. urophylla*, de um PSC de matrizes selecionadas de uma APS de Turmalina, MG, cuja origem é Timor;

Clones 13 e 14 - Clones de híbrido de polinização controlada tricross de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*): resultado de cruzamentos

controlados, do tipo three-way-cross, sendo o progenitor feminino a matriz 02 de *E. urophylla*, de um PSC estabelecido com matrizes de uma APS em Turmalina, MG, cuja origem é Timor. O progenitor masculino, é um clone de híbrido espontâneo entre *E. camaldulensis* e *E. grandis* (clone I-3000), selecionado de plantação comercial de *E. camaldulensis*, de Zimbabwe. Os cruzamentos foram realizados em 1991, estabelecidos em Teste de Progênes híbridas onde foram selecionadas as árvores que originaram os clones;

Clone 15 - Clones de híbrido de polinização controlada de *E. urophylla* x *E. pellita*: resultado de cruzamento controlado, com o progenitor feminino a matriz 15 de *E. urophylla*, de um PSC estabelecido com matrizes selecionadas de uma APS de Turmalina, MG, cuja origem é Timor. O progenitor masculino é uma matriz de *E. pellita*, de um teste de procedências e progênes, com sementes da Austrália;

Clone 16 - Espécie pura - *C. citriodora*: de plantações de *C. citriodora* com sementes de Marliéria, MG e Rio Claro, SP; de origem australiana;

Clone 17 - Espécie pura - *E. cloeziana*: material genético de *E. cloeziana* estabelecido a partir de sementes procedentes de Mtao Forest - Zimbabwe ;

Clone 18 - Espécie pura - *E. urophylla* Flores;

Clone 19 - Espécie pura - *E. urophylla* Timor.

3.3 Amostragem dos discos de madeira

Para cada clone/híbrido/espécie (19) foram selecionadas 3 árvores e, de cada uma, foram cortados 6 discos de lenho a diferentes alturas do tronco: 0% (posição 1), DAP (2), 25% (3), 50% (4), 75%(5) e 100%(6), em um total de 342 amostras. Dos discos de lenho foram cortadas amostras radiais (2 x 1 cm), coladas em suporte de madeira e serradas no sentido transversal em equipamento de serra dupla circular paralela, originando corpos de prova radiais para a avaliação da estrutura anatômica macroscópica, determinação do perfil radial de densidade aparente (densitometria de raios X) (Figuras 4 e 6).

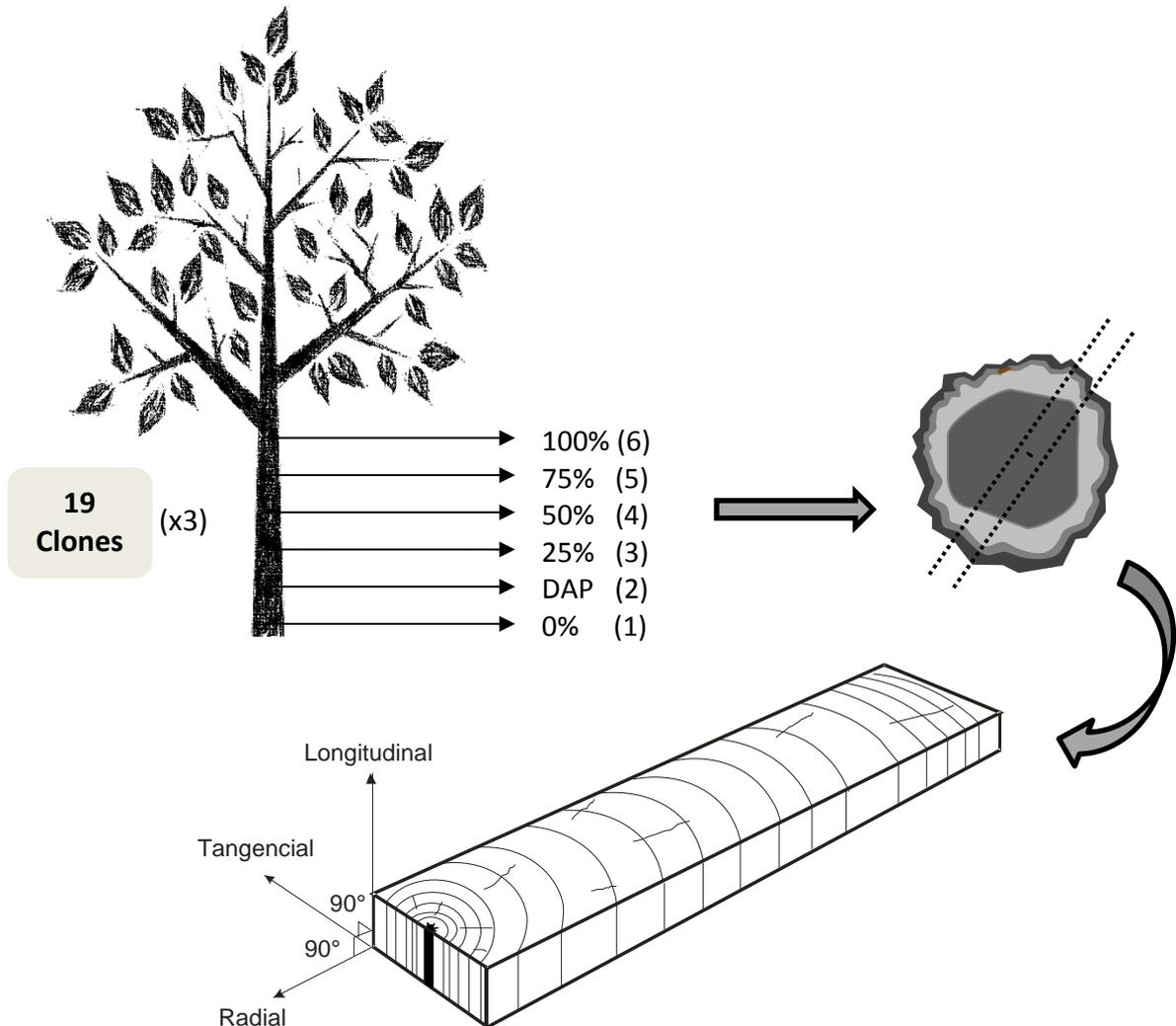


Figura 4 - Esquema do corte das árvores, discos e as amostras para a análise macroscópica e determinação do perfil radial de densidade aparente

3.4 Análise macroscópica da madeira

Para a análise macroscópica do lenho foram utilizadas as amostras radiais do lenho cortadas no equipamento de dupla serra (Figuras 4 e 6) que foram identificadas e coladas em suporte; em seguida, foram fixadas em suporte de micrótomo de deslize modelo WSL (Figura 5A) (GÄRTNER; NIEVERGELT, 2010), umedecida a seção transversal (glicerina, água; 1:5) e cortadas finas seções sequenciais do lenho até a visualização dos elementos anatômicos, com auxílio de lupa conta fios (x10). Na análise macroscópica do lenho foram utilizadas as amostras do raio A (amostras diametrais do lenho, com raio A e B) do DAP (posição 2) das árvores, sendo avaliados os 19 clones. Na superfície polida das amostras radiais do lenho das árvores foram demarcadas 3 áreas (1 x 0,5 cm; excluindo-se

0,5 cm da posição lateral) nas posições (1) próxima à medula, interna (LM), (2) intermediária, de transição (LT) e (3) próxima à casca, externa (LC) (Figura 5B) e examinadas sob microscópio estereoscópico OLYMPUS SZX-ILLB100 (Figura 5C) para a caracterização da estrutura macroscópica, com detalhe para os elementos de vaso.

3.4.1 Avaliação dos vasos

As áreas demarcadas na seção transversal do lenho foram examinadas e suas imagens digitais coletadas em câmera LEICA EC3 conectada ao microscópio estereoscópico para a determinação da frequência (30x) e diâmetro tangencial (200x) dos vasos. Na determinação da frequência dos vasos foi definida a área do lenho (0,25x 0,5cm) sendo aplicado o programa Image-Pro Plus 4.5; para o diâmetro foram mensurados pelo menos 25 vasos/posição radial aplicando o programa AxioVision LE 4.8 (IAWA COMMITTEE, 1989).

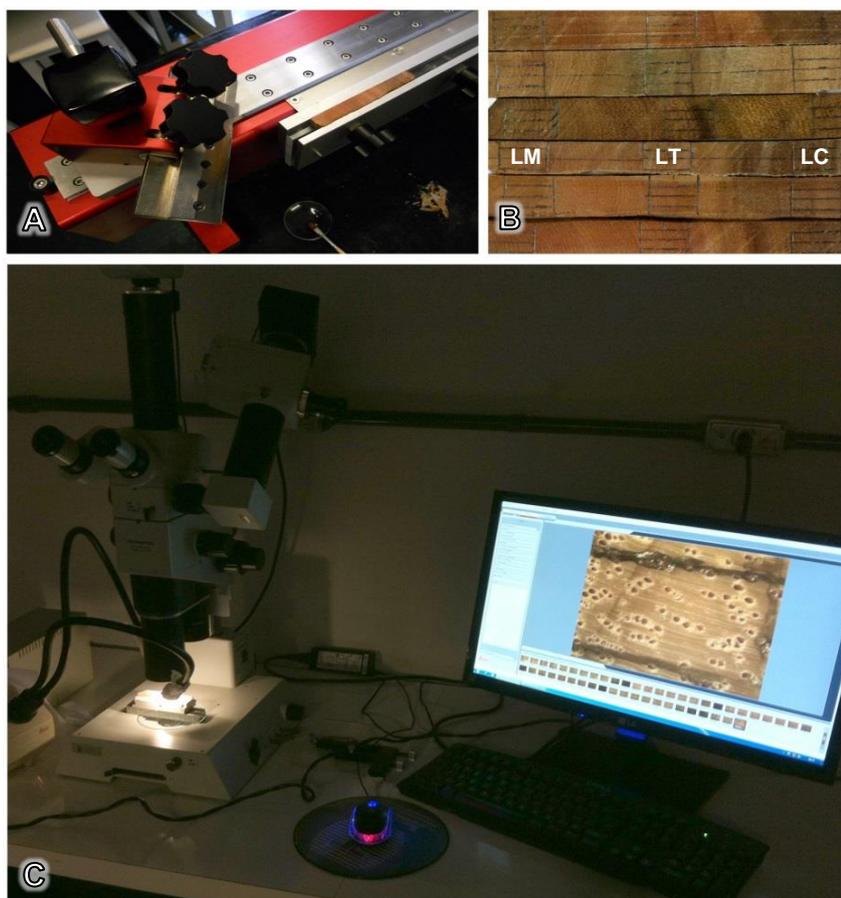


Figura 5 - Análise macroscópica do lenho (A) seccionamento da seção transversal das amostras do lenho em navalha no micrótomo de deslize; (B) seção transversal com a demarcação das áreas do lenho; (C) imagem da seção transversal do lenho adquirida pelo microscópio estereoscópico para a análise dos vasos

3.5 Perfil radial da densidade aparente do lenho

Para a determinação do perfil radial de densidade aparente do lenho por densitometria de raios X foram utilizadas as amostras do lenho (2 mm de espessura) cortadas no equipamento de dupla-serra circular paralela (Figura 6) acondicionadas em sala de climatização (20°C, 60%UR, 24 h). As amostras do lenho das árvores foram encaixadas no suporte metálico e transferidas para o compartimento interno blindado do equipamento QTRS-01X, da Quintek Measurement Systems, EUA (Figura 6). No processo de escaneamento das amostras do lenho, segue-se a sua autocalibração e a varredura da seção transversal radial do lenho por um feixe de raios X colimado. Os valores de raios X (leitura a distância de 40 μm) que atravessam a amostra do lenho são transformados em densidade aparente, através do software QMS, sendo construído o perfil radial de densidade aparente do lenho pelo arquivo *.DAT gerado pelo software QMS, lido pelo software Excel. Além do perfil radial de densidade aparente, é determinada a densidade aparente máxima, mínima e média da amostra do lenho das árvores (AMARAL; TOMAZELLO FILHO, 1998; QUINTEK MEASUREMENT SYSTEMS - QMS, 1999; TOMAZELLO FILHO, 2008; DOUNGPET, 2005; CHAGAS, 2013).

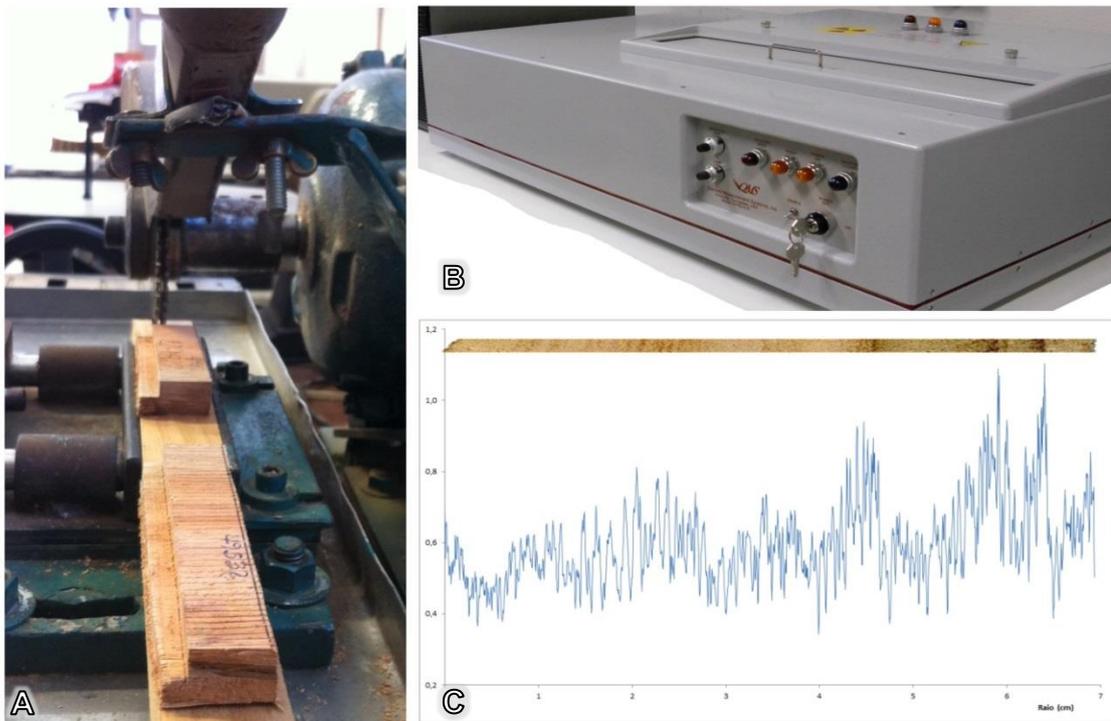


Figura 6 - (A) Equipamento de dupla-serra circular paralela em corte de amostra; (B) Aparelho QTRS-01X para a determinação do perfil radial de densidade aparente da madeira; (C) Gráfico densidade aparente da madeira (g/cm^3)

3.6 Variação da densidade aparente do lenho no tronco das árvores

Para a confecção da figura da variação da densidade aparente do lenho na direção radial (medula-casca) e longitudinal (base-topo) do tronco das árvores – utilizando os perfis radiais de densidade das amostras do lenho da base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura do tronco - foi aplicado o programa SCILAB, versão 5.3.3 (matriz de 200 por 200), sendo o script inicial de criação baseado nos gráficos de Hein (2011).

3.7 Determinação das dimensões das amostras do lenho

As amostras da seção transversal do lenho das árvores utilizadas na construção do perfil radial de densidade aparente do lenho foram utilizadas para a determinação das suas dimensões (largura e comprimento) através da aplicação da sua imagem digital. As amostras do lenho foram dispostas na câmara de irradiação do equipamento Faxitron X-ray, MX20-DC12 no tempo de exposição de 1,2s, 26 kV e a 57,2cm da fonte; e salvas em arquivos *.BMP na resolução de 96 dpi (Figura 7) (FAXITRON, 2013). Para a determinação das dimensões (comprimento x largura) das amostras do lenho foi aplicado o programa AxioVision LE 4.8, previamente calibrado (precisão 4 casas decimais) nas imagens digitais obtidas no equipamento de raios X digital. Em cada imagem digital foram avaliados o comprimento (1 medida linear) e a largura (4 medidas a 20, 40, 60, 80 % do raio). As imagens digitais do lenho foram obtidas no Lab. de Sementes do Dep. de Prod. Vegetal da ESALQ/USP.

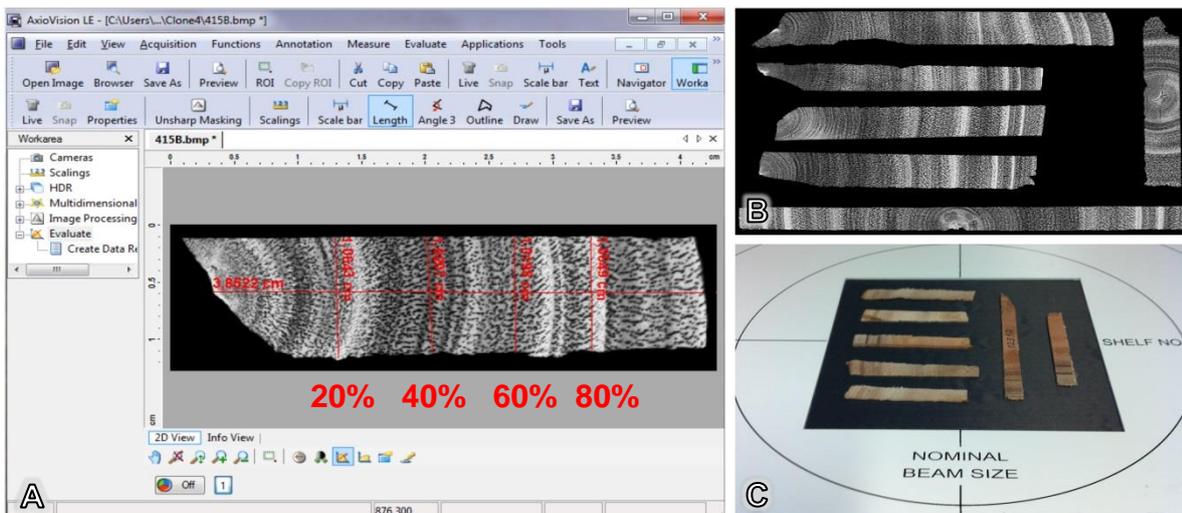


Figura 7 - Imagem digital das amostras do lenho. (A) imagem digital lenho aplicada na avaliação da sua largura/comprimento pelo programa AxioVision LE 4.8.; (B) imagem digital da madeira; (C) amostras do lenho na câmara de irradiação do equipamento

3.8 Carbonização das amostras do lenho

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico (mufla) adaptado com controle digital do aquecimento (incrementos de 15°C; 30 min.) (Figura 8B) correspondendo a uma taxa média de 0,5°C/minuto. A temperatura inicial foi sempre igual a 100°C e a temperatura máxima de 450°C, permanecendo esta estabilizada por um período de 60 min., com tempo total de carbonização de 10 horas (BRITO, 1992; TRUGILHO et al., 2001; ARANTES, 2009).

Foram feitas carbonizações em duas situações diferentes: (i) para a densitometria de raios X, onde as mesmas amostras de madeira analisadas pela densitometria (19 clones x 3 árvores x 6 posições x 2 raios = 684 amostras) foram separadas em 3 lotes e carbonizadas separadamente: A, B e C, representando as repetições (3 árvores); prevendo que mesmo se houvesse problema com a alguma carbonização ainda se teria o material de uma ou duas árvores; (ii) para a anatomia do carvão, onde separou-se as amostras da posição do DAP (posição 2) dos 19 clones e 3 árvores (19 x 3 = 57 amostras).

As amostras para carbonização foram demarcadas com lápis (grafite) nas duas extremidades, com o intuito de garantir a marcação pós-carbonização e possíveis quebras. Desta forma, a amostra de madeira (Figura 8A) e a termicamente tratada, chamada simplesmente de carvão. O tratamento foi realizado no Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE) do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP.

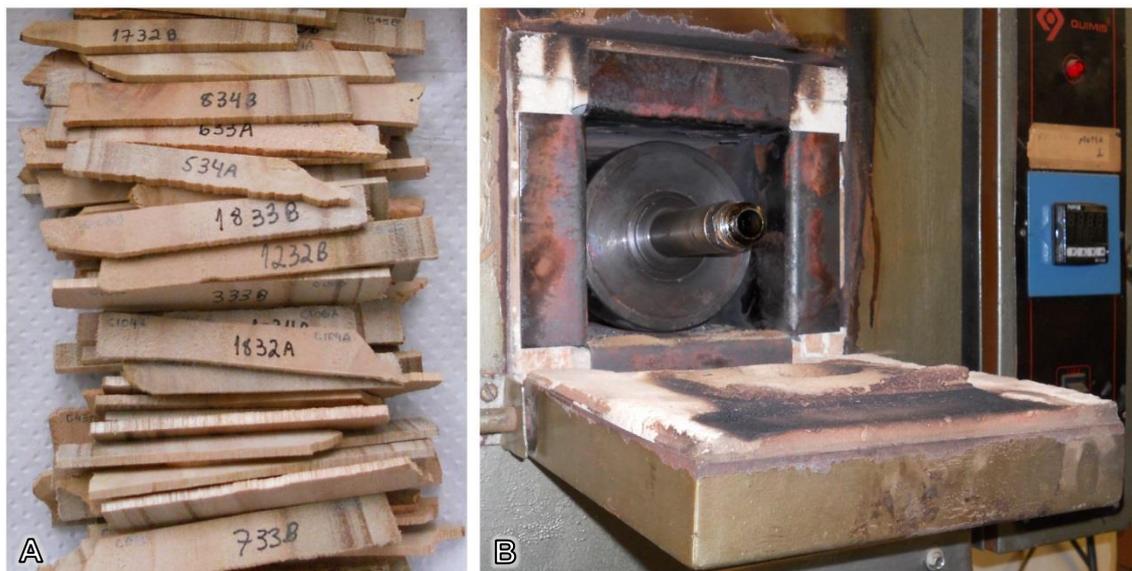


Figura 8 - Amostras de madeira para a carbonização (A) em forno mufla a 450°C (B)

3.9 Análise microscópica do carvão

3.9.1 Confeção de lâminas histológicas do lenho do carvão

Os corpos de prova de carvão foram cortados nas dimensões 1,2 x 1,2 x 1,5 cm e orientados nos três planos de estudo da madeira em três regiões do disco: medula, no cerne chamado de LM, transição entre cerne e alburno - LT e próximo à casca, no alburno - LC. As amostras foram imersas (álcool 95; 100%, temp. ambiente, 30 min, com 2 trocas em álcool 100%; em seguida no acetato de butila); transferidos para estufa (60-65°C, 20 min, no acetato de butila, com 3 trocas, na 3a por 30-40 min, até a impregnação total); transferidos para becker com solução homogeneizada com bastão de vidro (2-3 partes adesivo epóxi, araldite profissional, 24h; 1 parte endurecedor; 2 partes acetato de butila; o volume da solução deve ser 2-3 vezes maior do que o do corpo-de-prova); o becker foi transferido para estufa (90° C, becker semiaberto, 20-25 min); os corpos-de-prova de carvão foram então retirados da solução com uma pinça e colocado cartolina ou papel de filtro (esfriamento, 12 h); os corpos de prova foram fixados no micrótomo de deslize, aplicada 1 camada de adesivo (adesivo plastic, policloreto de vinil + acetato de butila; 2:1) e com a navalha de aço obtida a seção transversal do carvão (~12 µm de espessura), aplicando uma fita adesiva (durex) na superfície do corpo-de-prova de carvão (com resina de PVC) para maior aderência da superfície a ser seccionada; as seções transversal do carvão são transferidas para lamina de vidro e montadas com Entellan (ou balsam; diluído em acetate, 2:1) e aplicada a lamínula (BARBOSA¹, 2009; SCHWEINGRUBER, 2012).

Avaliação dos elementos de vaso: aplicando o procedimento descrito para as amostras do lenho (item 3.4.1) as lâminas histológicas da seção transversal das amostras do carvão, nas 3 posições radiais, foram examinadas e suas imagens digitais coletadas por câmera Leica EC3 conectada ao microscópio de luz para a determinação da frequência (Programa Image-Pro Plus 4.5) e diâmetro tangencial dos vasos (Programa AxioVision LE 4.8), além da avaliação das microfissuras e contração de elementos anatômicos.

¹ BARBOSA, A.C.F. **Obtenção de cortes histológicos em madeira termorretrificada.** São Paulo: IPT, Centro de Tecnologia de Recursos Florestais, Laboratório de Madeira e Produtos Derivados, 2009. Informação pessoal.

3.10 Perfil radial da densidade aparente do carvão

Para a determinação do perfil radial de densidade aparente do carvão por densitometria de raios X foram utilizadas as amostras do lenho (2 mm de espessura) carbonizadas, conforme descrito. As amostras de carvão foram encaixadas no suporte metálico e transferidas para o compartimento interno blindado do equipamento QTRS-01X, da Quintek Measurement Systems. O processo de escaneamento das amostras do carvão e todo o procedimento metodológico para a construção do perfil radial de densidade aparente das amostras de carvão foram descritas com detalhes no item 3.5.

3.11 Variação da densidade aparente do carvão no tronco das árvores

Para a confecção da figura da variação da densidade aparente do carvão na direção radial (medula-casca) e longitudinal (base-topo) do tronco das árvores – utilizando os perfis radiais de densidade das amostras do carvão da base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura do tronco - foi aplicado o programa SCILAB, versão 5.3.3 (matriz de 200 por 200), conforme o descrito para o lenho (vide item 3.6). As figuras da variação da densidade aparente do lenho e do carvão do tronco das árvores foram apresentadas juntamente, possibilitando a sua comparação.

3.12 Determinação das dimensões das amostras de carvão

As amostras da seção transversal do carvão utilizadas na construção do perfil radial de densidade aparente foram utilizadas para a determinação das suas dimensões (largura e comprimento) através da aplicação da sua imagem digital, de acordo com a metodologia descrita para o lenho das árvores (vide Item 3.7). Para a determinação das dimensões (comprimento x largura) das amostras do carvão foi aplicado o programa AxioVision LE 4.8 sendo avaliados o comprimento e a largura.

Determinação da redução das dimensões amostras da madeira e do carvão:

Para determinar a magnitude da redução das dimensões das amostras do lenho das árvores (em %) no processo de transformação para o carvão foi utilizada a seguinte fórmula:

$$\% \text{ Redução} = \frac{Dm - Dc}{Dc} \times 100$$

Onde,

Dm = dimensão linear madeira (cm);

Dc = dimensão linear carvão (cm);

% Redução = redução da dimensão do lenho em relação ao carvão (%)

3.13 Fluxograma da metodologia

O fluxograma do desenvolvimento da metodologia do trabalho é apresentado na Figura 9 visando o melhor entendimento das suas várias etapas.

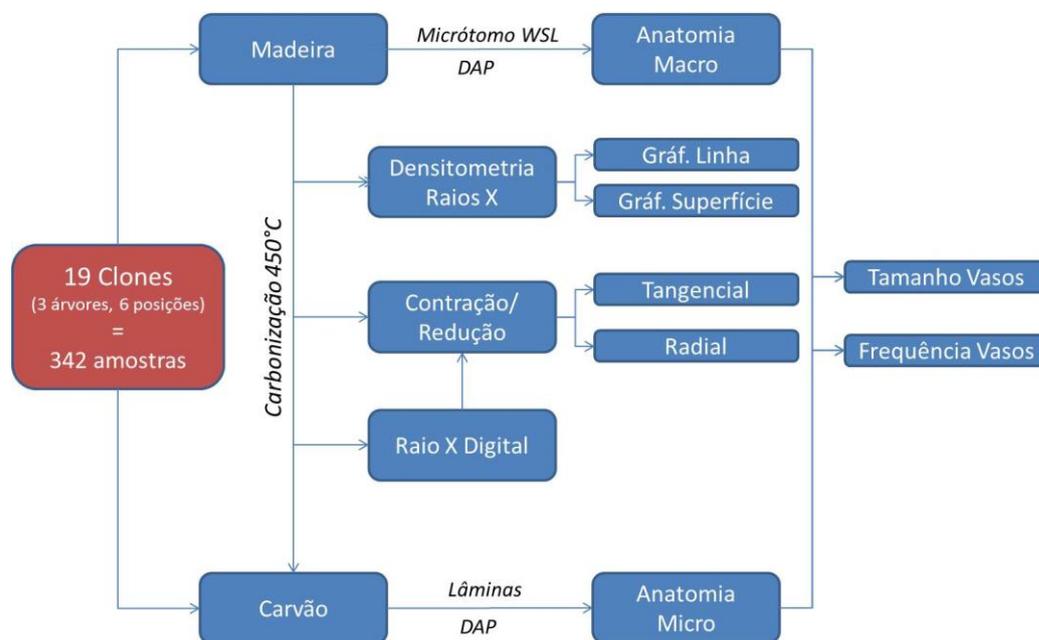


Figura 9 - Fluxograma Material e Métodos

3.14 Análise estatística dos resultados

Para a avaliação do experimento executou-se a análise estatística dos dados para os 19 tratamentos (clones) onde cada árvore foi considerada como repetição (delineamento inteiramente ao acaso com 3 repetições). Foi aplicada a ANOVA e quando a análise de variância foi significativa, utilizou-se o teste de Tukey com nível de significância a 5%, comparando as médias e analisando as correlações entre o lenho e o carvão, assim o como o efeito da posição radial e base-topo. Os softwares utilizados para aplicação das análises estatísticas foram o programa SAS versão 9.3 (Statistical Analysis System) e o SISVAR (FERREIRA, 2008).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise macroscópica da madeira

As características da estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho nas 3 posições radiais do tronco das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* estão apresentadas nas Figuras 10 a 13, ordenadas pelo valor da densidade aparente (da menor para a maior densidade do lenho, de acordo com item 4.3, Tabela 6, p. 83).

A análise detalhada da seção transversal do lenho das árvores de *Eucalyptus* e *Corymbia* evidencia variações na estrutura anatômica macroscópica sendo caracterizadas por:

Características Gerais: albarno e cerne indistintos a distintos quanto a cor; madeira com pouco brilho; grã direita a revessa; textura fina a média; macia a moderadamente dura e dura ao corte; cheiro e gosto indistintos;

Elementos de vasos: madeira de porosidade difusa, poros solitários e/ou múltiplos de dois ou mais elementos, com forma ovalada a circular, em arranjo oblíquo e radial e com presença de tiloses na madeira do cerne.

Vasos com diâmetro tangencial tendendo ao aumento no sentido medula-casca com valores de tamanho médios totais de 75,83 μm ; 105,11 μm e 116,69 μm para a posição LM (posição perto da medula), LT (posição intermediária) e LC (posição perto da casca), respectivamente; frequência de vasos de 15,16 vasos/ mm^2 ; 10,12 vasos/ mm^2 e 9,36 vasos/ mm^2 para as mesmas posições. Estes resultados mostram que, à medida que se distancia da medula, os vasos tornam-se menos frequentes e os diâmetros maiores;

Traqueídes vasculares: presentes;

Parênquima axial: indistinto a pouco visível mesmo sob lente; paratraqueal escasso, vasicêntrico, formando confluências curtas e oblíquas a apotraqueal difuso esparso;

Anéis de crescimento: indistintos no lenho juvenil, distintos na posição próxima a casca, demarcados por zonas fibrosas caracterizadas pela ausência ou menor frequência de vasos.

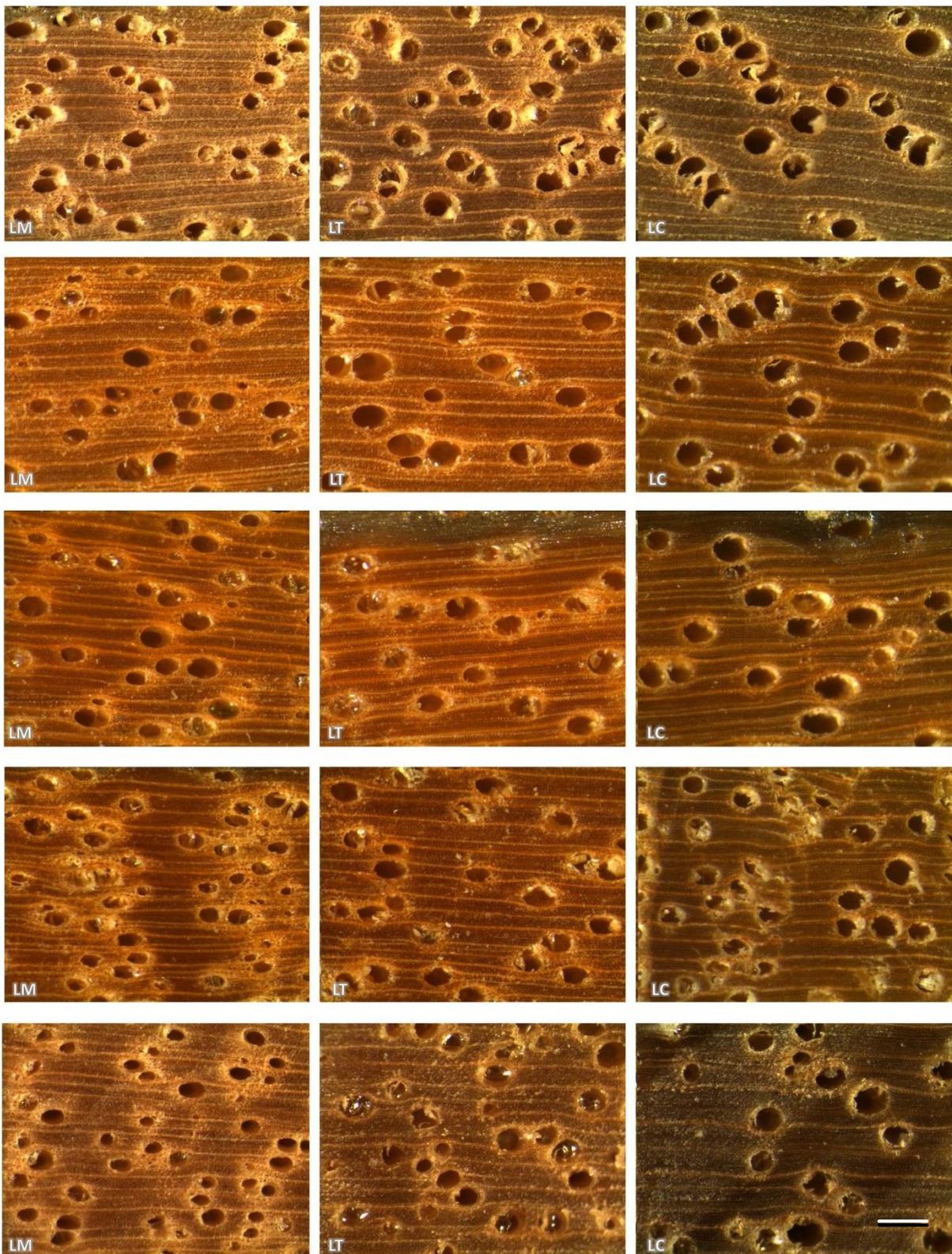


Figura 10 - Estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do tronco das árvores do clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*); clone 3 de *E. urophylla*; clone 6 de *E. urophylla*; clone 8 de *E. urophylla* x *E. grandis*; clone 11 de *E. grandis* x *E. urophylla* (Barra: 200 μ m)

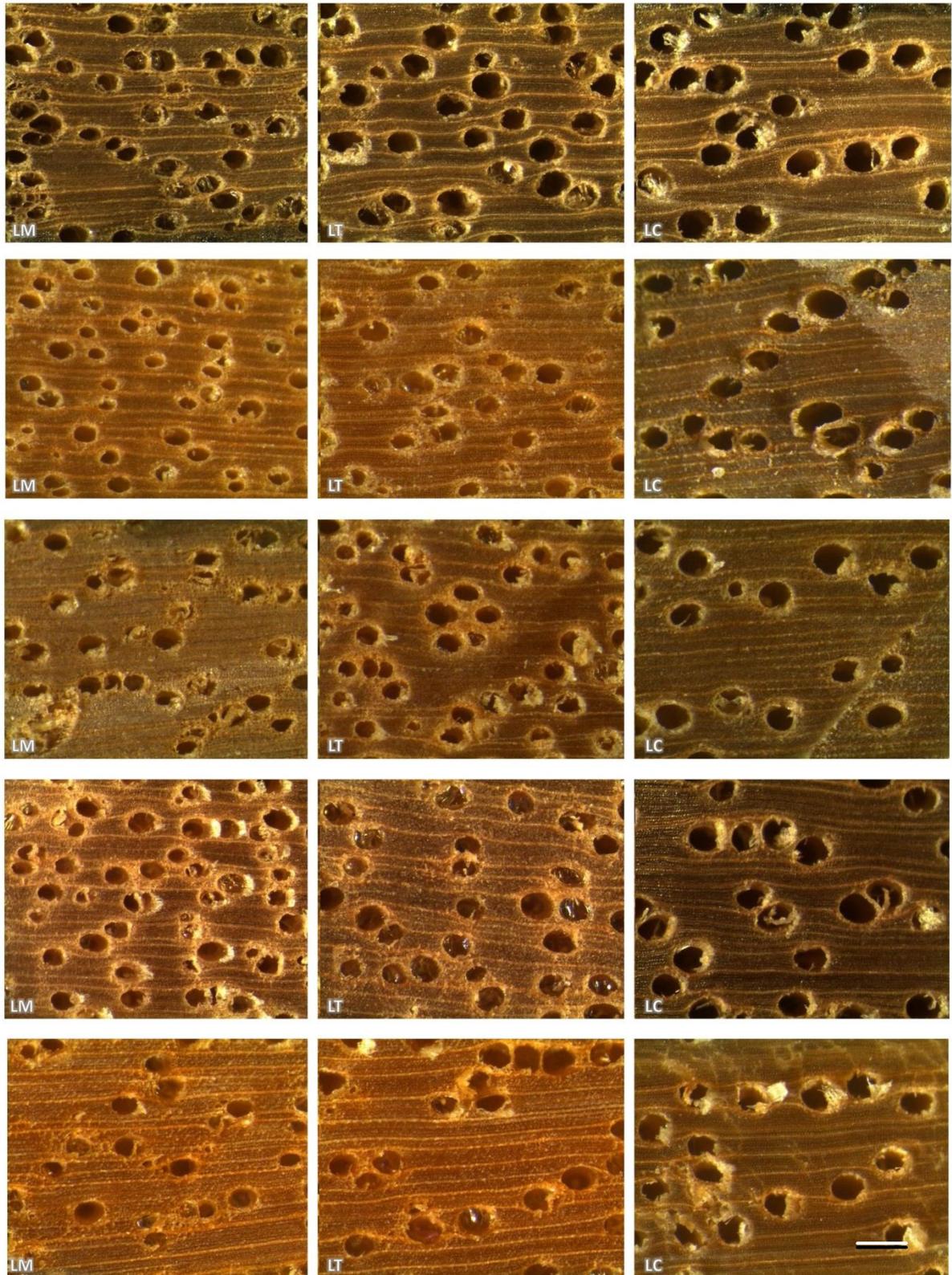


Figura 11 - Estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do tronco das árvores do clone 18 de *E. urophylla* Flores, clone 19 de *E. urophylla* Timor, clone 15 de *E. urophylla* x *E. pellita*, clone 5 de *E. urophylla*, clone 4 de *E. urophylla* (Barra: 200 μ m)

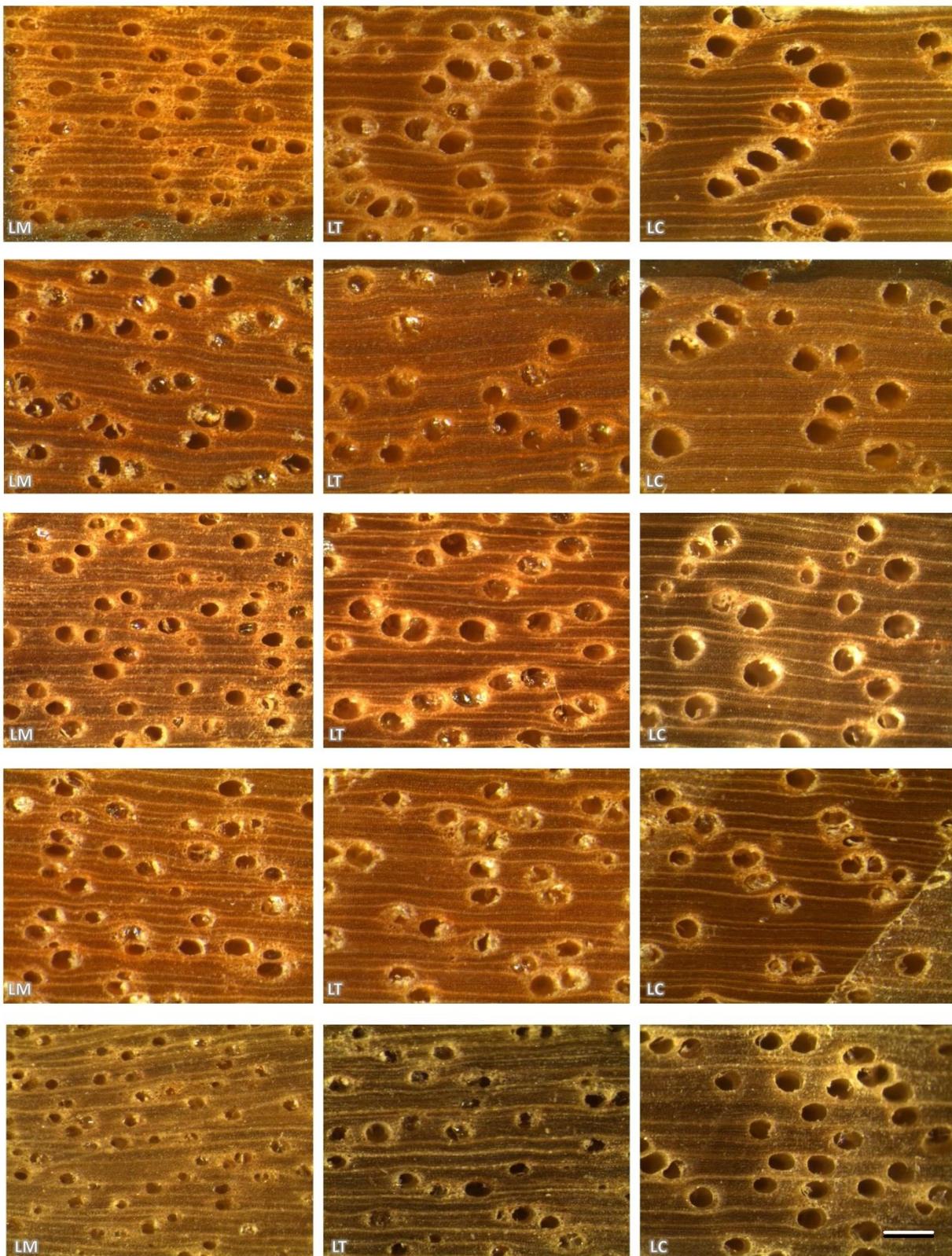


Figura 12 - Estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do tronco das árvores do clone 7 de *E. urophylla*, clone 14 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), clone 9 de *E. camaldulensis* X *E. grandis*, clone 12 de (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*., clone 17 de *E. cloeziana* (Barra = 200 μ m)

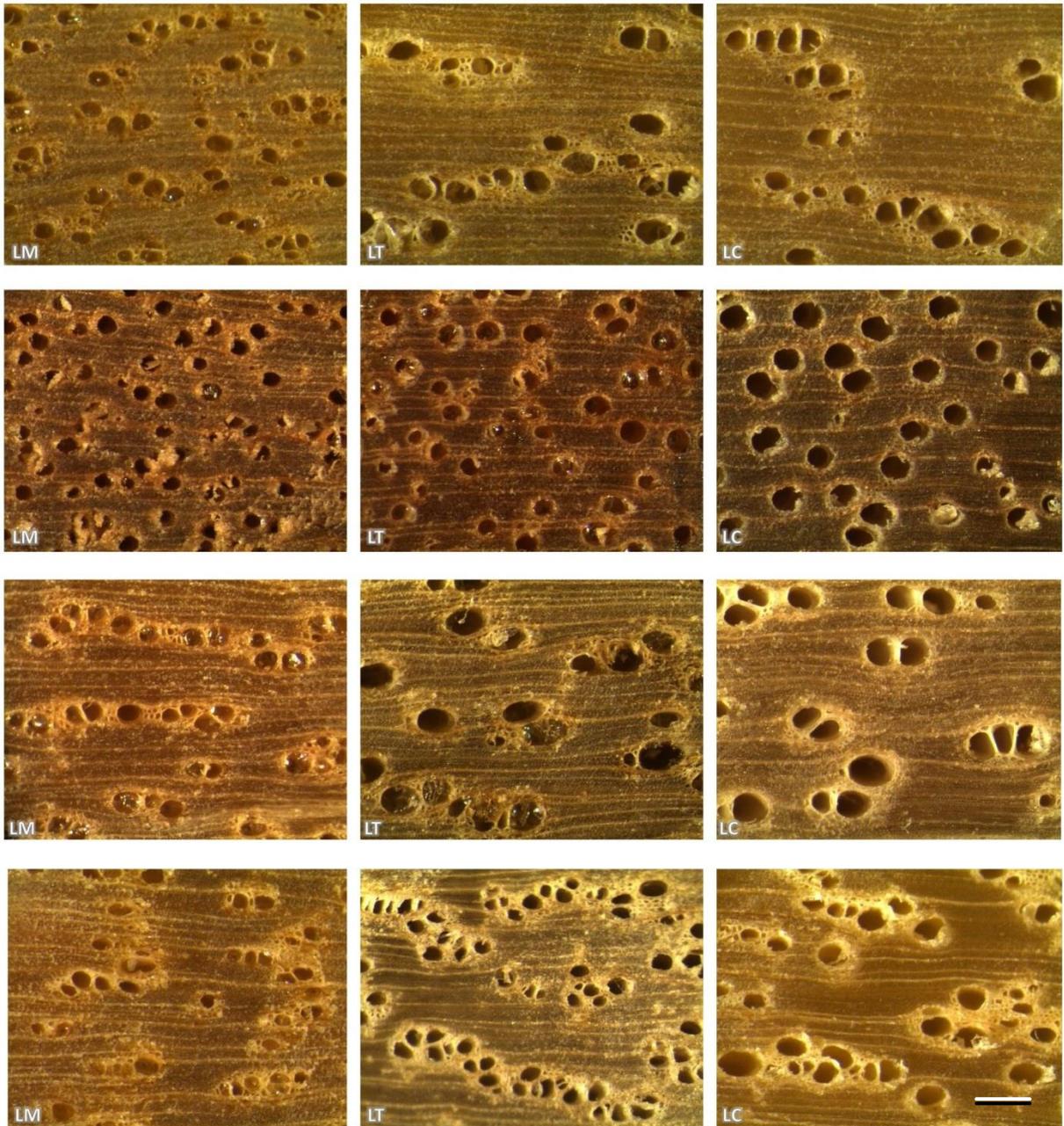


Figura 13 - Estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do tronco das árvores do clone 2 de *C. citriodora* x *C. torelliana*, clone 10 de *E. camaldulensis* X *E. grandis*, clone 1 de *C. citriodora* x *C. torelliana*, clone 16 de *C. citriodora* (Barra = 200 μ m)

O valor médio do diâmetro e da frequência dos vasos nas 3 posições radiais do tronco das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* é apresentado na Tabela 2 e Figura 15. A literatura reporta que no lenho das árvores ocorre, de modo geral, um modelo comum de variação radial do diâmetro e da frequência dos vasos. Em qualquer altura do tronco das árvores verifica-se uma maior frequência (n°/mm^2)/menor diâmetro dos vasos no lenho interno, próximo da medula em relação ao externo, próximo à casca, com menor frequência/maior diâmetro dos vasos, em função da idade do câmbio. Algumas referências bibliográficas indicam que área de vasos é menor no lenho próximo à região da medula ($5\text{-}8 \mu\text{m}^2/\text{mm}^2$) aumentando no sentido radial e se estabilizando próximo à casca ($15\text{-}20 \mu\text{m}^2/\text{mm}^2$) das árvores adultas (CARVALHO, 1962; HUDSON et al., 1997, 1998; FOELKEL, 2007).

Esse modelo de variação radial da frequência/diâmetro dos vasos é característico das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* (Tabela 2, Figura 15). No lenho das árvores de alguns clones observa-se, no entanto, que vasos de maior diâmetro ocorrem na região do lenho de transição (LT), localizada na posição intermediária do raio, como no clone 8 de *E. urophylla* x *E. grandis*, 12 de (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*, 16 de *C. citriodora*, 18 de *E. urophylla* Flores. No clone 8 o diâmetro médio dos vasos variou de 126,99 (LT) a 116,07 μm (LC) (Figura 14), indicativo da formação de uma faixa de lenho diferenciado conforme apontado por Sette et al. (2009) em árvores de eucaliptos de 24 meses.

Quanto ao diâmetro tangencial dos vasos, as normas da IAWA (1989) os vasos são classificados em pequenos ($<50 \mu\text{m}$), médios ($50\text{-}100 \mu\text{m}$), grandes ($100\text{-}200 \mu\text{m}$) e muito grandes ($>200 \mu\text{m}$) (medida tangencial - perpendicular ao raio).

Aplicando esses parâmetros, no lenho das árvores dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* foram encontrados elementos de vaso classificados como de *diâmetro médio*, mencionando os clones 16 (68,75 μm), 17 (79,59 μm), 7 (89,02 μm), 9 (90,10 μm), 12 (91,66 μm), 10 (92,92 μm), 1 (93,32 μm) e de *diâmetro grande* como os clones 14 (102,31 μm), 6 (102,38 μm), 13 (103,08 μm), 8 (104,02 μm), 2 (104,43 μm), 5 (104,64 μm), 19 (104,86 μm), 15 (105,22 μm), 11 (106,30 μm), 3 (108,58 μm), 18 (111,69 μm) e 4 (122,12 μm). O valor médio do diâmetro dos vasos no lenho das árvores aponta diferença estatística a 5% para todos os clones/posição, exceto na posição LT dos clones 16 e 17 e entre os clones 10 e 1.

O valor do diâmetro dos vasos obtidos no lenho das árvores de *Eucalyptus* e *Corymbia* é corroborado por outros autores, com variações em função da espécie, idade das árvores, características do site, etc.

No lenho das árvores de *Eucalyptus pellita* de 15 anos, Poubel et al. (2011) mostraram que, na direção medula-casca, a parede dos elementos de vaso são mais espessas e com o aumento do diâmetro, sem diferença significativa entre as posições radiais, indicando a necessidade de analisar amostras do lenho de árvores mais adultas para detectar as variações.

Em árvores de *Corymbia citriodora* de 20 anos, Shashikala e Vijendra Rao (2009) verificaram que nos sentido longitudinal e radial do tronco, o diâmetro dos vasos aumenta de 112 a 151 μm . Veenin et al. (2005) analisando as árvores de 5 clones de *Eucalyptus camaldulensis*, de 5 anos, plantados de galhos e de árvores de 9 anos, de origem seminal, detectaram vasos de 101 μm de diâmetro, que aumentam significativamente no lenho juvenil dos 3-4 cm iniciais nos clones e nos 5 cm na testemunha.

Em árvores de *Eucalyptus grandis* de 10, 14, 20 e 25 anos, Silva et al. (2007) obtiveram valor médio do diâmetro dos vasos de 162,3 (20 anos, próxima à casca) a 76,8 μm (10 anos, próxima da medula) havendo pequena diferença nas posições de 75 e 100% do raio.

Em árvores de *E. urophylla*, de 6 e 8 anos, Evangelista et al. (2010) observaram uma diminuição da frequência e um aumento do diâmetro do lume dos vasos no sentido medula-casca; porém em árvores de *E. camaldulensis*, de 10 anos, verificou-se pouca diferença da frequência dos vasos na zona de transição medula-casca e na área do lenho próxima da casca. O lenho das árvores de *E. urophylla* apresenta vasos de porosidade difusa, arranjo diagonal, predominância de solitários ou agrupados, formato oval e tiloses e com 12 μm de diâmetro (SILVESTRE; TORRES, 2003; EVANGELISTA, 2010).

Quanto à frequência dos vasos, as normas da IAWA (1989) classificam os vasos em baixa (<5/mm²), média-baixa (5-20/mm²), média (20-40/mm²), alta (40-100/mm²) e muito alta (>100/mm²) frequência.

Aplicando esses parâmetros, no lenho das árvores dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* foram encontrados elementos de vaso classificados como de *frequência média - baixa*, a exemplo do clone 16 (18,72/mm²), 18 (14,53/mm²), 10 (13,57/mm²), 5 (12,80/mm²), 12 (12,35/mm²), 13 (12,00/mm²), 9 (11,89/mm²), 14

(11,81/mm²), 15 (11,52/mm²), 19 (11,25/mm²), 11 (10,91/mm²), 6 (10,64/mm²), 3 (10,53/mm²), 2 (10,40/mm²), 1 (9,60/mm²), 8 (9,52/mm²), 17 (9,43/mm²), 7 (9,01/mm²) e 4 (8,91/mm²).

A literatura reporta os resultados de inúmeros trabalhos científicos com resultados da avaliação da frequência dos vasos no lenho das árvores de eucaliptos. Como, por exemplo, em árvores de 2 clones de *E. urophylla*, de 14 anos, Lima et al. (2007) obtiveram valores médios do diâmetro e frequência de vasos de 114,0-121,4 μm e 1,4-1,6 vasos/mm². Por outro lado, Oliveira e Hellmeister (1998) mensuraram no lenho de árvores de 7 espécies de eucalipto, de 16 anos, o diâmetro e a frequência de vasos mencionando as de *C. citriodora* (119 μm e 12/mm²), de *E. urophylla* (116,7 μm e 17/mm²), de *E. grandis* (126,6 μm e 13/mm²) e de *E. cloeziana* (82,6 μm e 34/mm²).

Em árvores de *E. grandis*, de 7 anos, Rocha F. et. al. (2004) determinaram em 3 posições radiais do lenho – interna, intermediária, externa – valores para o diâmetro dos vasos de 78,93, 105,34 e de 117,57 μm e a frequência de 18,70, 13,03 e de 11,07/mm², respectivamente. Os valores para os elementos de vaso têm similar magnitude aos obtidos nas 3 posições radiais do lenho das árvores das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e de *Corymbia* no presente trabalho, com média para o diâmetro de 75,83-105,11-116,69 μm e frequência de 15,16-10,12-9,36/mm², nas regiões interna (LM-medula), intermediária (LT-transição) e externa (LC-casca) (Figura 15). Verifica-se uma maior diferença no valor do diâmetro-frequência dos vasos na região LM em relação à LT e LC, do que entre as regiões LT e LC, pelo lenho juvenil formado no lenho do tronco das árvores. Aplicando as normas da IAWA (1989) nos valores radiais do diâmetro dos vasos, sua classificação enquadra-se como médio-grande com os de menor e maior diâmetro nas regiões LM e LC do lenho do tronco, a exemplo do clone 3 de *E. urophylla* (Figura 15), evidenciando uma relação funcional do diâmetro do vaso-densidade aparente do lenho de -0,47 (Figura 14).

A correlação dos parâmetros anatômicos com os físicos do lenho – como exemplo a densidade - é relatada na literatura como relacionada com as dimensões e % de ocorrência dos seus elementos celulares, da sua interação, da porcentagem de extrativos, etc. (PANSHIN; DeZEEUW, 1980). Nas árvores do gênero *Eucalyptus*, as variações da estrutura anatômica do lenho e, desta forma da densidade do lenho, relacionam-se com a idade, o vigor e a taxa de crescimento das árvores, a posição

no tronco das árvores (radial/axial do tronco), a qualidade do sítio, etc (FERREIRA,1972; SOUZA et al., 1979).

O lenho das árvores dos clones de maior densidade aparente foi determinado para o clone 16 de *C. citriodora*, caracterizado pelos vasos de menor diâmetro e maior frequência, de 68,75 μm e 18,72/mm², respectivamente. Nesse aspecto, de acordo com Thomas et al. (2004), a densidade do lenho é, em geral, um importante indicador da qualidade de sua madeira, relacionada com as dimensões dos vasos, mas, também com as das fibras (largura, espessura da parede e diâmetro do lume) e com os parênquimas longitudinal e radial.

Conforme apontado, a frequência dos vasos é inversamente proporcional ao seu diâmetro no sentido radial do lenho do tronco das árvores dos clones de *Eucalyptus* e de *Corymbia* (Figura 15), sendo que no lenho dos clones de maior densidade como o clone 16 de *C. citriodora*, os vasos são de menor diâmetro e maior frequência nas posições LM, LT e LC, com 18,24; 20,32 e 17,20/mm², respectivamente, com baixa relação entre a frequência dos vasos-densidade do lenho de $R^2 = 0,21$ (Figura 14). Mesmo no lenho fossilizado de árvores, segundo Martínez-Cabrera (2012), essa relação é baixa, no valor de -0,42, em relação às correlações com as dimensões das fibras.

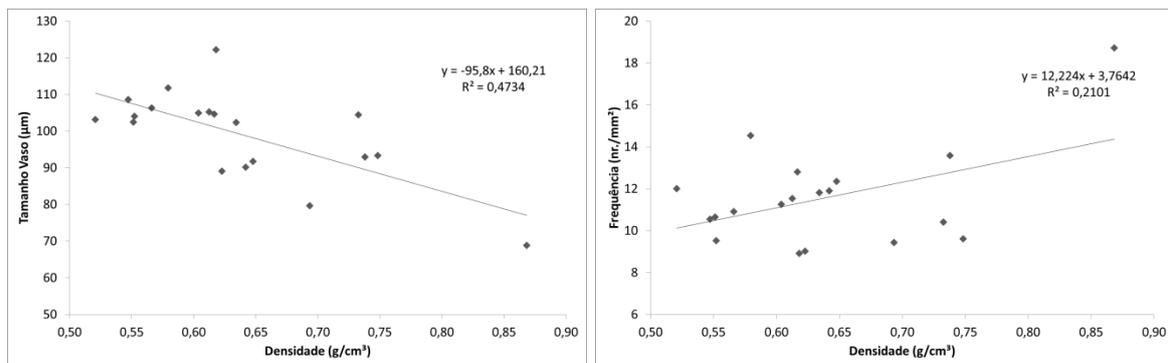


Figura 14 - Relação funcional entre a densidade e diâmetro e frequência dos vasos do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Tabela 2 – Valor médio e variação (entre parêntesis) do diâmetro e da frequência dos vasos nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Clone	Tamanho Vasos (μm)			Média	Frequência (nr./mm ²)			Média
	LM	LT	LC		LM	LT	LC	
1	75,46 (57,42 - 103,34)	90,72 (54,03 - 128,22)	113,79 (61,31 - 139,55)	93,32	12,48	8,80	7,52	9,60
2	83,65 (55,64 - 115,32)	113,84 (87,13 - 138,18)	115,80 (85,50 - 149,21)	104,43	13,92	8,80	8,48	10,40
3	81,97 (43,58 - 110,51)	108,17 (57,28 - 141,13)	135,62 (92,75 - 162,11)	108,58	13,60	9,36	8,64	10,53
4	86,05 (59,70 - 113,13)	138,09 (114,56 - 157,35)	142,21 (101,62 - 167,09)	122,12	11,52	7,68	7,52	8,91
5	82,58 (50,83 - 114,51)	110,77 (72,58 - 143,54)	120,58 (70,97 - 149,20)	104,64	17,52	11,20	9,68	12,80
6	75,59 (58,06 - 94,41)	111,00 (79,85 - 136,29)	120,55 (87,11 - 150,84)	102,38	14,40	9,76	7,76	10,64
7	68,30 (33,31 - 110,59)	95,30 (69,39 - 127,54)	103,47 (67,01 - 139,57)	89,02	11,20	8,56	7,28	9,01
8	69,01 (42,25 - 88,77)	126,99 (94,35 - 150,31)	116,07 (67,17 - 143,60)	104,02	11,44	9,36	7,76	9,52
9	74,64 (55,64 - 105,65)	94,16 (65,34 - 112,17)	101,50 (72,80 - 141,99)	90,10	17,84	9,04	8,80	11,89
10	73,57 (48,39 - 101,61)	90,21 (63,71 - 134,67)	114,97 (84,69 - 146,88)	92,92	19,04	9,92	11,76	13,57
11	70,54 (49,25 - 97,63)	119,60 (85,58 - 157,26)	128,74 (83,90 - 163,70)	106,30	16,08	8,72	7,92	10,91
12	82,34 (55,43 - 105,53)	97,00 (71,77 - 120,99)	95,64 (72,58 - 125,02)	91,66	13,04	12,56	11,44	12,35
13	77,97 (54,99 - 99,24)	109,31 (79,90 - 138,01)	121,97 (90,41 - 148,56)	103,08	16,24	11,12	8,64	12,00
14	74,32 (45,16 - 100,01)	102,08 (78,24 - 123,60)	130,52 (98,41 - 158,06)	102,31	15,68	10,32	9,44	11,81
15	76,80 (49,22 - 103,24)	114,45 (83,08 - 133,18)	124,40 (94,35 - 164,67)	105,22	18,24	7,84	8,48	11,52
16	58,50 (43,55 - 72,80)	67,82 (45,97 - 94,10)	79,92 (52,44 - 117,76)	68,75	18,64	20,32	17,20	18,72
17	61,38 (52,92 - 74,38)	70,96 (46,77 - 87,09)	106,45 (82,45 - 129,09)	79,59	12,14	7,89	8,25	9,43
18	88,47 (70,97 - 112,95)	124,36 (87,15 - 163,00)	122,25 (88,71 - 156,45)	111,69	19,28	12,00	12,32	14,53
19	79,64 (58,34 - 103,27)	112,33 (84,06 - 143,63)	122,60 (99,19 - 154,83)	104,86	15,68	9,12	8,96	11,25
Média	75,83	105,11	116,69	99,21	15,16	10,12	9,36	11,55

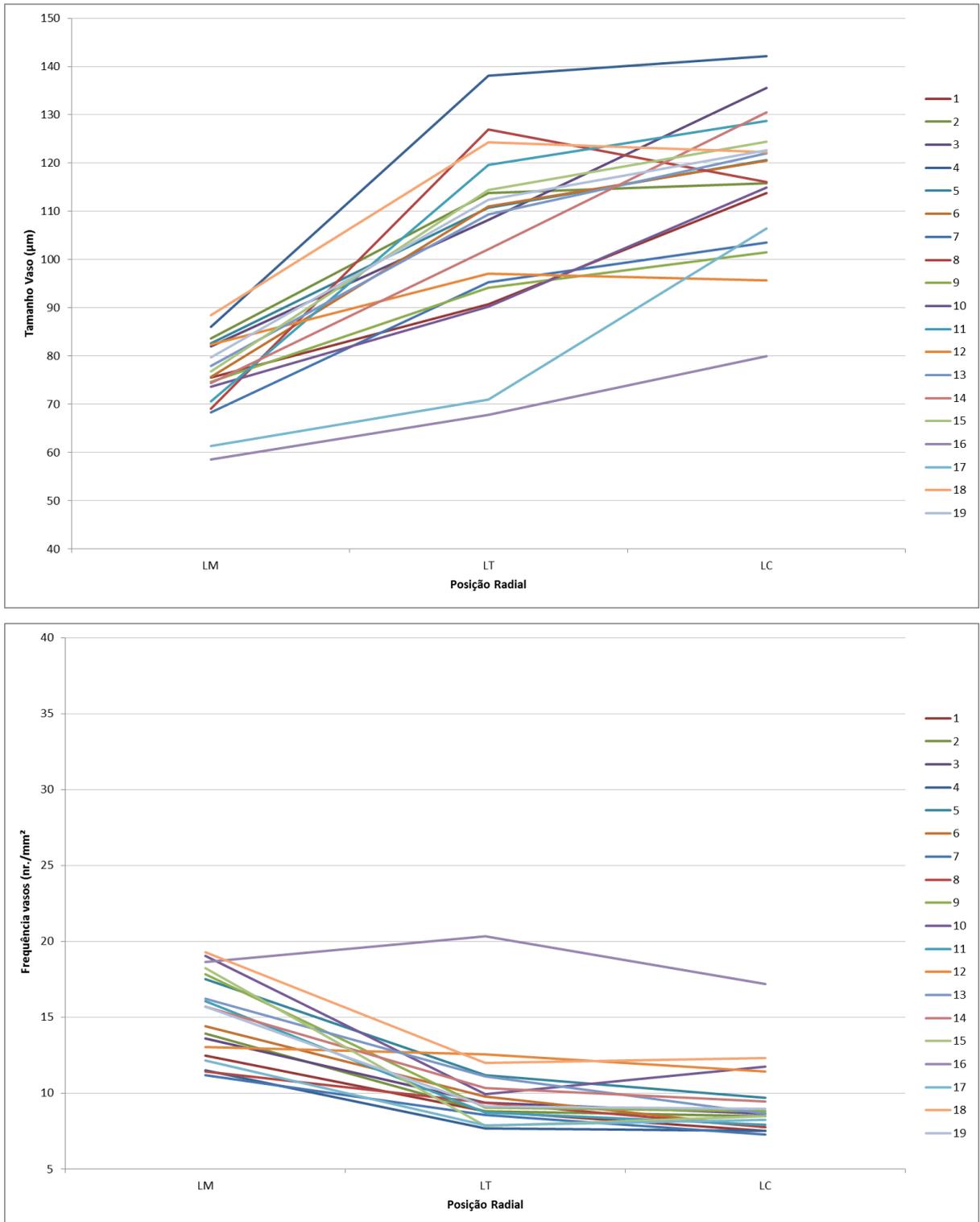


Figura 15 - Valor médio do diâmetro e da frequência dos vasos nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

4.2 Análise microscópica do carvão

As amostras carbonizadas do lenho das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* foram examinadas sob microscopia de luz – de seções finas do plano transversal montadas em lâminas histológicas – evidenciando alterações anatômicas resultantes do processo de carbonização. A metodologia de confecção de lâminas histológicas do carvão, inédita no Brasil, necessita, ainda, de aprimoramento, embora possível a visualização e análise quali- e quantitativa da estrutura anatômica do carvão. A dificuldade metodológica relaciona-se com a estrutura quebradiça e frágil do carvão, crítica no processo de corte com a navalha do micrótomo, devendo ser melhorado o tratamento da sua superfície.

A análise da anatomia comparada do lenho e do carvão indica variações relacionadas com o diâmetro e a frequência dos vasos, na ampliação utilizada para as observações microscópicas (Figura 18). As variações anatômicas mais distinguíveis – pela metodologia e equipamentos aplicados - foram a alteração da forma, redução do diâmetro e aumento da frequência dos vasos.

Com relação à **morfologia dos vasos**, o lenho apresenta seção com predominância arredondada e, no carvão mostram uma contração (sendo no sentido tangencial mais pronunciada) resultando em uma seção ovalada a oblonga e, em consequência desta distorção, os vasos adquirem a forma pontiaguda no lenho dos clones de algumas espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

Com relação ao **diâmetro dos vasos**, observa-se uma redução do diâmetro tangencial e leve tendência de aumento do diâmetro radial nas amostras de carvão em comparação com as do lenho (Tabela 3, Figura 19). Aplicando as normas da IAWA (1989) para a caracterização das dimensões dos vasos, têm-se para o carvão uma classificação como de *dimensão média* com variação dos valores médios em função dos clones, sendo de, para o clone 16 (53,42 μm), 17 (73,35 μm), 9 (78,65 μm), 19 (80,62 μm), 12 (81,32 μm), 10 (81,56 μm), 13 (82,99 μm), 14 (83,35 μm), 1 (83,75 μm), 18 (86,52 μm), 2 (88,20 μm), 6 (89,43 μm), 8 (89,44 μm), 3 (89,58 μm), 5 (91,11 μm), 15 (91,70 μm) e 11 (97,04 μm) e de *dimensão grande* para o clone 4 (100,74 μm). O diâmetro dos vasos das amostras de carvão indica valores com significância estatística a 5% para todos os clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* e posições radiais, a exceção dos clones 9 de *E.*

camaldulensis X *E. grandis* e 2 de *C. citriodora* x *C. torelliana* na posição radial LC e dos clones 7 de *E. urophylla* e 16 de *C. citriodora*: na posição radial LM (Tabela 3).

Com relação à **frequência dos vasos** observa-se um aumento do número de vasos/mm² no carvão em relação ao lenho dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*. Os valores mensurados de frequência dos vasos nas amostras de carvão, de acordo com a metodologia da IAWA (1989) definiram sua classificação como *médios*, para os clones 16 (28,00/mm²), 10 (26,83/mm²), 8 (21,73/mm²) e 5 (21,47/mm²) e *médios a baixos*, para os clones 9 (19,81/mm²), 1 (19,04/mm²), 12 (19,01/mm²), 18 (18,72/mm²), 14 (18,64/mm²), 3 (17,79/mm²), 6 (17,47/mm²), 15 (17,47/mm²), 2 (16,77/mm²), 19 (16,16/mm²), 17 (16,03/mm²), 11 (15,49/mm²), 4 (15,39/mm²), 13 (15,39/mm²) e 7 (14,45/mm²). O aumento da frequência dos vasos nas amostras de carvão está diretamente relacionado com o processo de contração radial e tangencial das amostras de madeira, sendo claramente perceptível para os elementos de vaso pelas técnicas e equipamentos utilizados - uma redução da área da seção transversal do lenho pelo processo de carbonização, incluindo a dos elementos de vaso, conforme discutido, implica no aumento da frequência ou do número de vasos/unidade de área. No entanto no processo de transformação do lenho em carvão, a parede celular de outros elementos anatômicos (como as fibras, raios, parênquima radial) exibe uma significativa contração total, embora, não passível de quantificação na ampliação aplicada no presente estudo. Os valores de contração total no processo de transformação do lenho em carvão - indicativos da contração da parede celular de todos os elementos anatômicos - são apresentados no item 4.4.

A contração média do diâmetro dos vasos verificada no processo de **transformação do lenho-carvão** foi da ordem de 15%, com significativa variação, de 1 a 34%, do clone 10 de *E.camaldulensis* x *E.grandis* e do clone 7 de *E.urophylla*.

Em relação à contração média do diâmetro dos vasos no processo de carbonização **em relação à posição do lenho/carvão** do tronco das árvores, verificou-se que na região mais próxima da medula (posição LM) do tronco das árvores detectou-se uma maior contração de 17%, seguindo-se a região mais externa do lenho (posição LC) com 16% e a região intermediária do lenho (posição LT) com 13% de contração do diâmetro tangencial dos vasos (Figura 16).

Aplicando vários programas de carbonização da madeira de *Eucalyptus* e de *Acacia*, Kumar e Gupta (1995) concluíram que a estrutura anatômica é preservada, sendo que no tratamento de carbonização lenta e na temperatura abaixo de 800°C não se observou a formação de rachadura; da mesma forma, o diâmetro dos vasos diminuiu e a forma da sua seção transversal altera-se para elíptico. Para a madeira de *Quercus robur*, Braadabaart e Pole (2008) no processo de carbonização a 450°C houve a manutenção da estrutura anatômica e contração do diâmetro dos vasos, resultado similar ao obtido por Gonçalves (2010) no processo de carbonização à 400° C da madeira de espécies arbóreas do cerrado.

De acordo com Gonçalves et al. (2012), dentre os elementos anatômicos do lenho, os vasos são os mais afetados pela carbonização, com valor médio de 17% do diâmetro tangencial e variação de 2-32% para as espécies de *Tapirira guianensis* e *Vochysia tucanorum*, respectivamente. Da mesma forma, Kwon et al. (2009) obtiveram a contração de 27% do diâmetro dos vasos do lenho das árvores de *Quercus variabilis*, no processo de carbonização à temperatura de 450°C.

Albuquerque (2012) em estudo da anatomia comparada do lenho e do carvão (400°C) de 75 espécies da floresta Amazônica constatou que os vasos tiveram seu formato alterado após a carbonização tornando-se alongados e com paredes onduladas/irregulares e que houve a contração (%) dos mesmos, da madeira para o carvão, de 1,12% a 33,5%.

Estudando a alteração da anatomia da madeira de *Copaifera* e *Dipteryx* no processo de transformação, Nisgoski et. al. (2012) constataram que o aumento da temperatura resultou na redução da espessura da parede celular das fibras e a ruptura na interface fibra/parênquima radial, rompimento da parede das células do parênquima (finas e frágeis) mantendo, no entanto, a estrutura anatômica e a possibilidade da sua aplicação na discriminação das espécies. Muñiz et al. (2012b) avaliaram a estrutura anatômica do lenho carbonizado de varias espécies, a 450°C, relatando a contração do vasos e concluindo da possibilidade da identificação das espécies e sua aplicação no controle do comércio e utilização do carvão ilegal (ALBUQUERQUE, 2012; MUÑIZ et al., 2012a).

Alguns estudos indicam a variação dos elementos anatômicos da madeira no processo de transformação em carvão, como o realizado por Arantes (2009) determinando valores de diâmetro e frequência dos vasos de 95-100-118 µm e 40-41-31/mm², respectivamente, para as árvores de 3 classes de diâmetro – do maior

para o menor - do tronco de *E. grandis* e *E. urophylla*, de 6 anos. Esses valores seguiram o modelo de variação obtido para o lenho das árvores dos clones de híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*, quando houve uma maior diferença da dimensão e frequência dos vasos na posição LM em relação à LT-LC e menor diferença para a posição LT e LC.

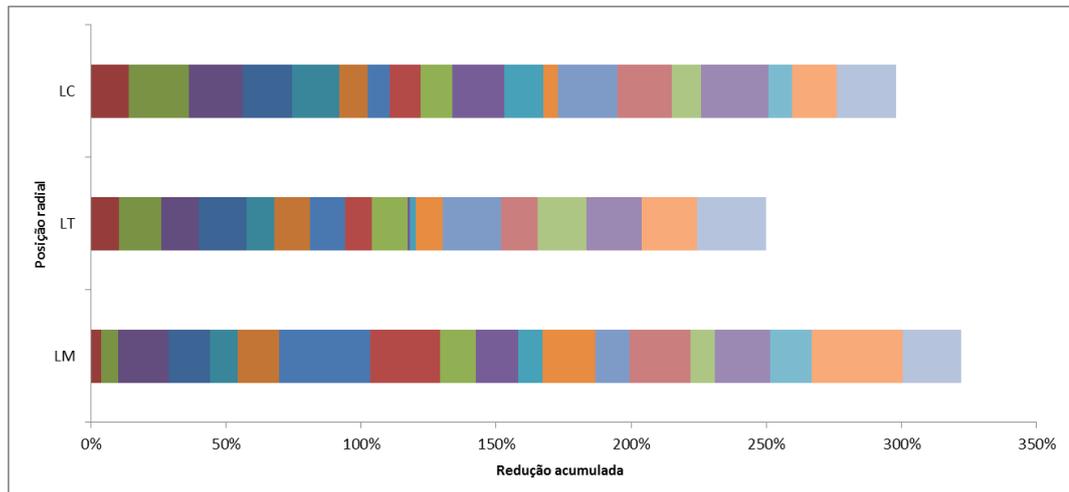


Figura 16 - Redução média (%) do diâmetro dos vasos nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do carvão do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Em relação à densidade, verificou-se que a existência de relação funcional de $R^2 = -0,51$ para a densidade aparente do carvão e o diâmetro tangencial dos vasos, com os vasos de maior diâmetro localizados no lenho próximo à casca (posição LC), como no clone 3 de *E. urophylla*. A relação entre a densidade aparente do carvão e a frequência dos vasos foi baixa, de $R^2 = 0,42$, porém evidenciando menor tendência entre as variáveis (Figura 17).

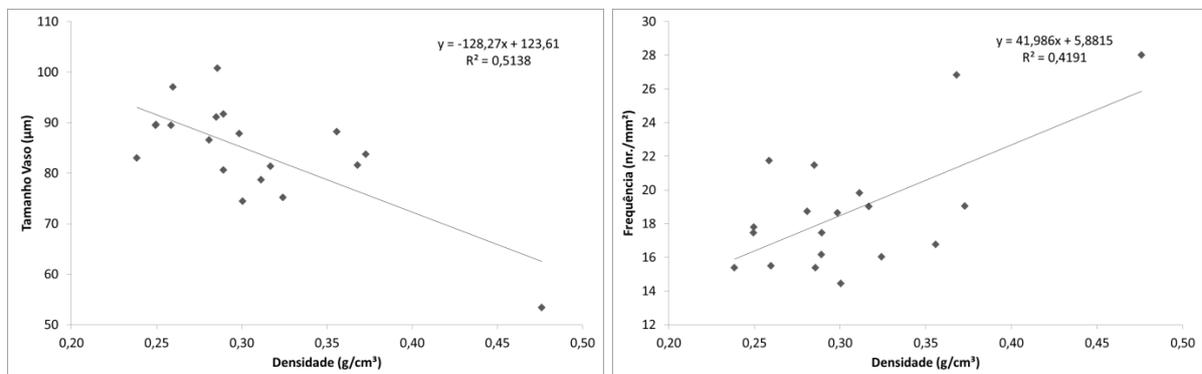


Figura 17 - Relação funcional entre a densidade (g/cm^3) e as características anatômicas tamanho de vaso (μm) e frequência de vasos ($\text{nr.}/\text{mm}^2$) para o carvão

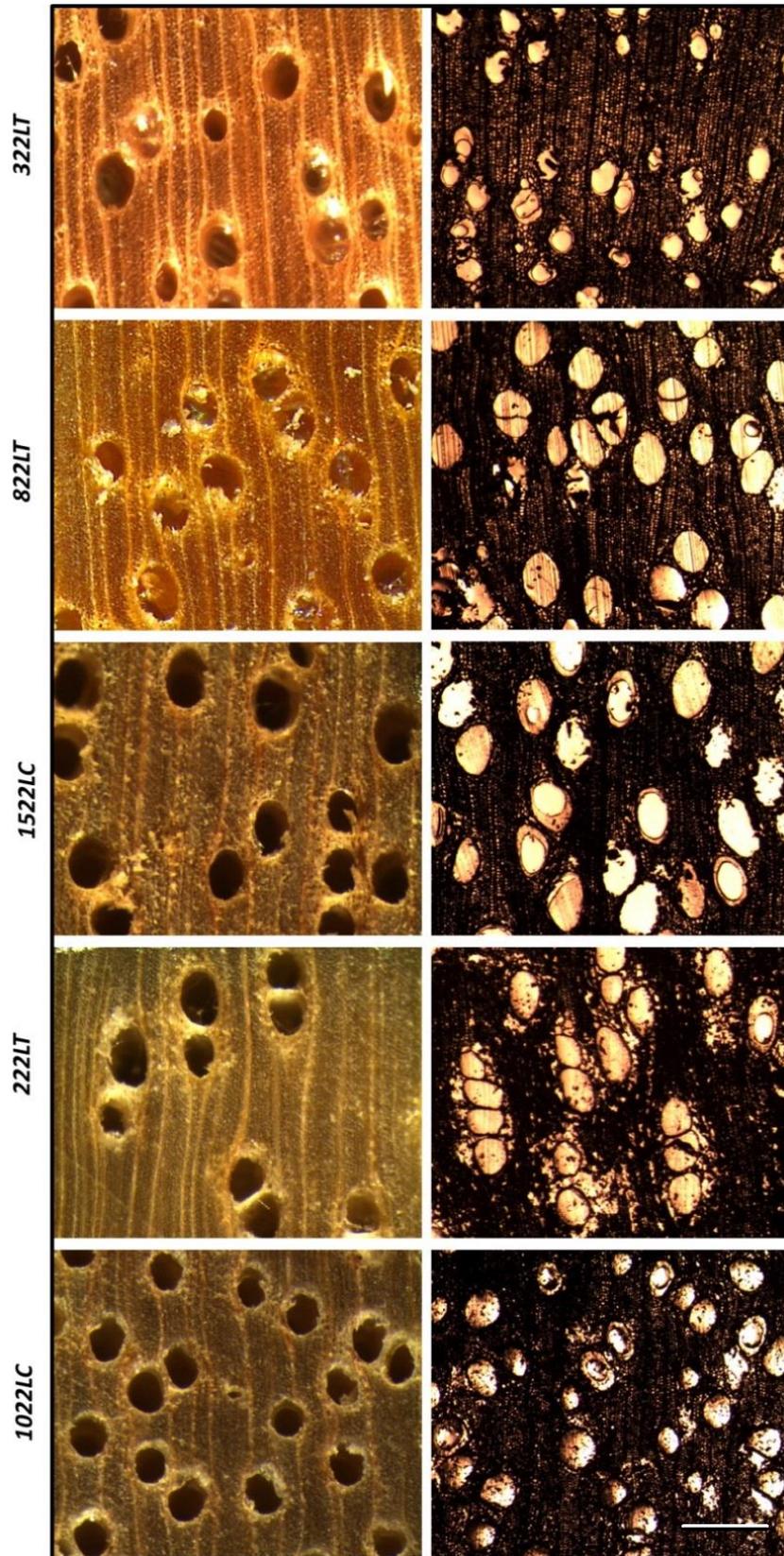


Figura 18 - Estrutura anatômica macroscópica comparada da seção transversal do lenho e do carvão do tronco das árvores de *E. urophylla* (clone 3), *E. urophylla* x *E. grandis* (clone 8), *E. urophylla* x *E. pellita* (clone 15), *C. citriodora* x *C. toreliana* (clone 2) e *E. camaldulensis* x *E. grandis* (clone 10) (aumento 200x, Barra = 200 μ m)

Tabela 3 - Valor médio e variação (entre parêntesis) do diâmetro e da frequência dos vasos nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do carvão do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Clone	Tamanho Vasos (μm)			Média	Frequência (nr./mm ²)			Média
	LM	LT	LC		LM	LT	LC	
1	72,52 (58,06 - 88,04)	81,08 (45,19 - 130,64)	97,66 (62,12 - 137,90)	83,75	24,16	19,12	13,84	19,04
2	78,34 (52,92 - 98,65)	96,28 (77,76 - 118,63)	89,99 (58,26 - 117,75)	88,20	21,04	14,88	14,40	16,77
3	66,74 (42,32 - 97,31)	93,08 (80,17 - 123,38)	108,92 (71,04 - 135,60)	89,58	24,40	14,96	14,00	17,79
4	72,91 (45,27 - 108,88)	113,48 (80,04 - 135,08)	115,83 (77,97 - 154,20)	100,74	19,44	11,76	14,96	15,39
5	74,02 (46,47 - 100,08)	99,66 (68,62 - 123,85)	99,63 (71,64 - 121,24)	91,11	25,44	19,60	19,36	21,47
6	64,10 (45,19 - 91,99)	96,25 (61,37 - 117,78)	107,95 (77,22 - 130,76)	89,43	24,24	13,60	14,56	17,47
7	45,24 (36,39 - 59,07)	82,82 (54,32 - 105,89)	95,15 (72,60 - 118,54)	74,40	19,04	11,92	12,40	14,45
8	51,12 (31,95 - 81,48)	114,39 (83,53 - 137,70)	102,81 (65,40 - 127,16)	89,44	28,88	18,64	17,68	21,73
9	64,70 (43,55 - 83,88)	81,86 (58,15 - 114,58)	89,39 (68,57 - 120,23)	78,65	24,96	16,88	17,60	19,81
10	62,16 (46,02 - 87,13)	89,42 (58,06 - 118,61)	93,10 (67,52 - 116,20)	81,56	35,44	23,92	21,12	26,83
11	64,26 (49,19 - 93,02)	116,99 (72,58 - 154,03)	109,87 (78,22 - 141,97)	97,04	20,48	14,32	11,68	15,49
12	66,25 (45,19 - 87,09)	87,25 (62,01 - 109,01)	90,44 (64,55 - 103,92)	81,32	19,52	18,96	18,56	19,01
13	68,10 (52,57 - 89,00)	85,65 (61,29 - 98,38)	95,21 (54,39 - 131,58)	82,99	19,68	15,52	10,96	15,39
14	57,51 (41,76 - 85,79)	88,29 (59,00 - 113,34)	104,26 (77,57 - 125,98)	83,35	23,92	14,56	17,44	18,64
15	69,93 (50,91 - 81,15)	94,02 (59,68 - 113,78)	111,14 (74,21 - 149,75)	91,70	23,28	15,04	14,08	17,47
16	46,51 (33,07 - 62,09)	53,83 (33,15 - 73,93)	59,91 (39,51 - 78,64)	53,42	28,16	30,80	25,04	28,00
17	51,99 (27,42 - 63,71)	76,55 (54,25 - 92,74)	97,09 (85,58 - 118,54)	75,21	16,40	14,08	17,60	16,03
18	58,63 (32,46 - 91,74)	98,96 (71,74 - 136,54)	101,98 (72,58 - 125,21)	86,52	21,92	18,24	16,00	18,72
19	62,37 (34,76 - 79,87)	83,54 (65,40 - 97,74)	95,96 (69,35 - 130,70)	80,62	27,20	13,20	8,08	16,16
Média	63,02	91,23	98,23	84,16	23,56	16,84	15,76	18,72

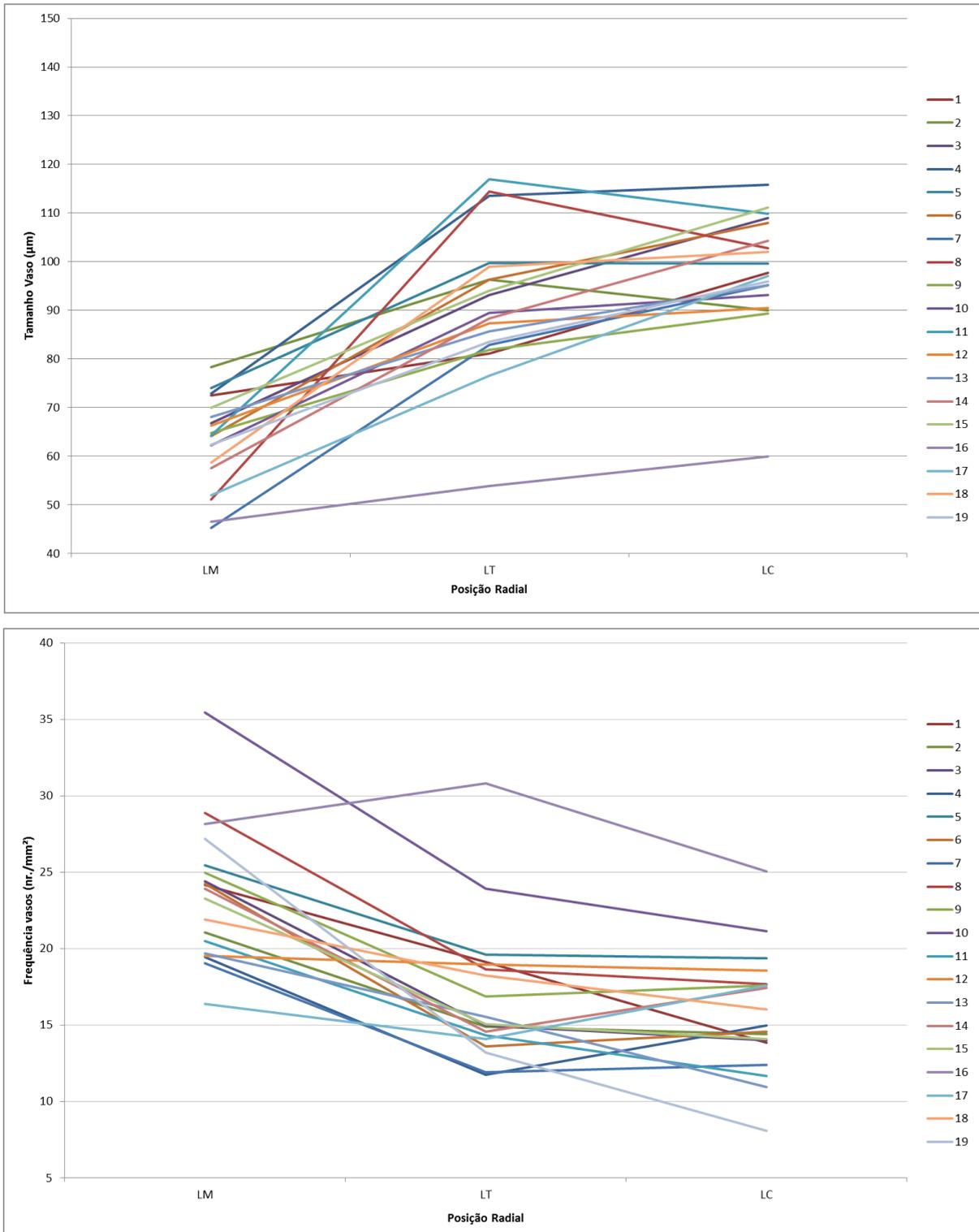


Figura 19 - Valor médio do diâmetro e da frequência dos vasos nas 3 posições radiais (LM, LT, LC) do carvão do lenho do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

4.3 Perfil radial da densidade aparente do lenho

A metodologia de densitometria de raios X possibilita a avaliação das características e a comparação da madeira e do carvão das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*. Como exemplo, a Figura 20 expressa a variação radial da densidade aparente de amostra de lenho, de 7 cm de raio, com a formação da madeira juvenil até cerca de 3 cm, entre 3 e 4 cm a madeira de transição, seguida da madeira adulta, caracterizada pela crescente e maior variação dos valores mínimo-máximo de densidade, representativos dos lenhos inicial (menor densidade) e tardio (maior densidade).

A correlação da densidade aparente e da anatomia do lenho, na direção medula-casca (Figura 21, 22), obtida pela densitometria de raios X, é exemplificada pela amostra 312A (clone 3, árvore 1, posição 2), do clone 3 de *E. urophylla*, com destaque para 3 regiões distintas do lenho e do carvão.

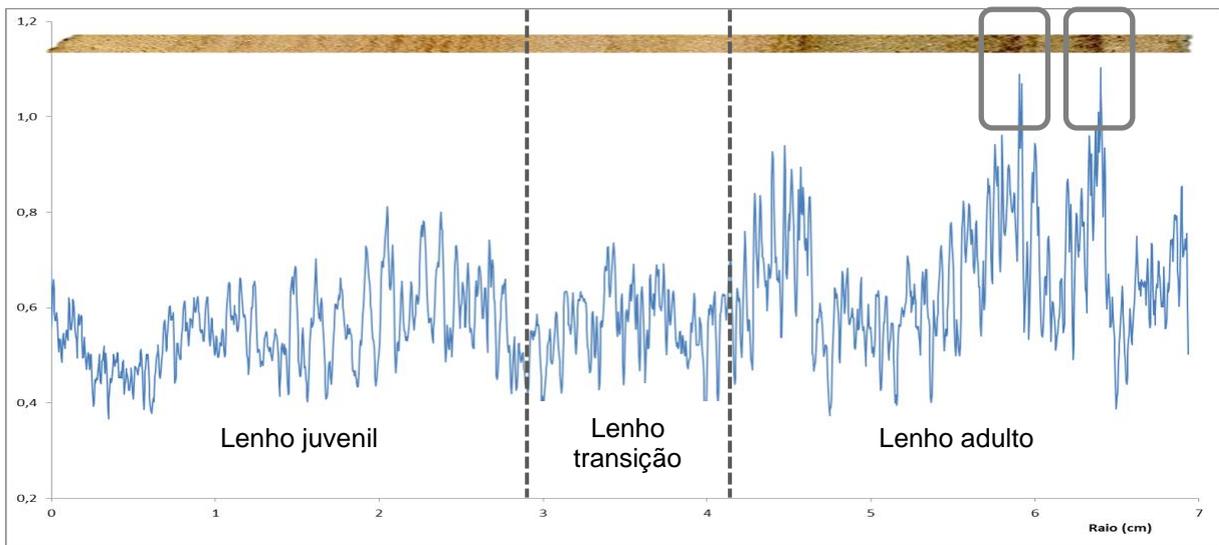


Figura 20 - Variação radial da densidade aparente da madeira, com a distinção dos lenhos juvenil, de transição e adulto

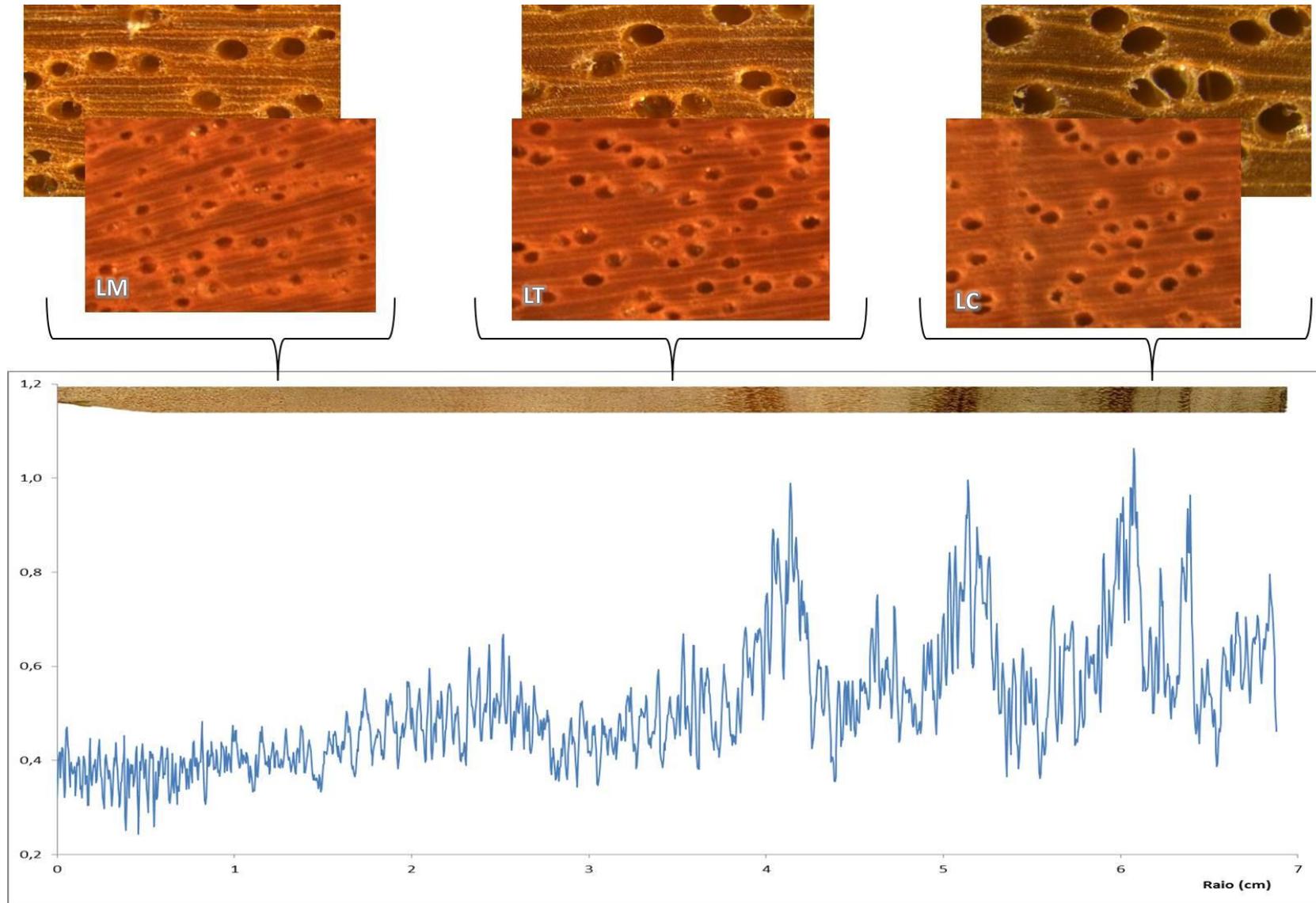


Figura 21 - Densit. de raios X da madeira do clone 3 - traço azul - e a correlação com a anatomia em 3 pontos distintos (LM, LT e LC)

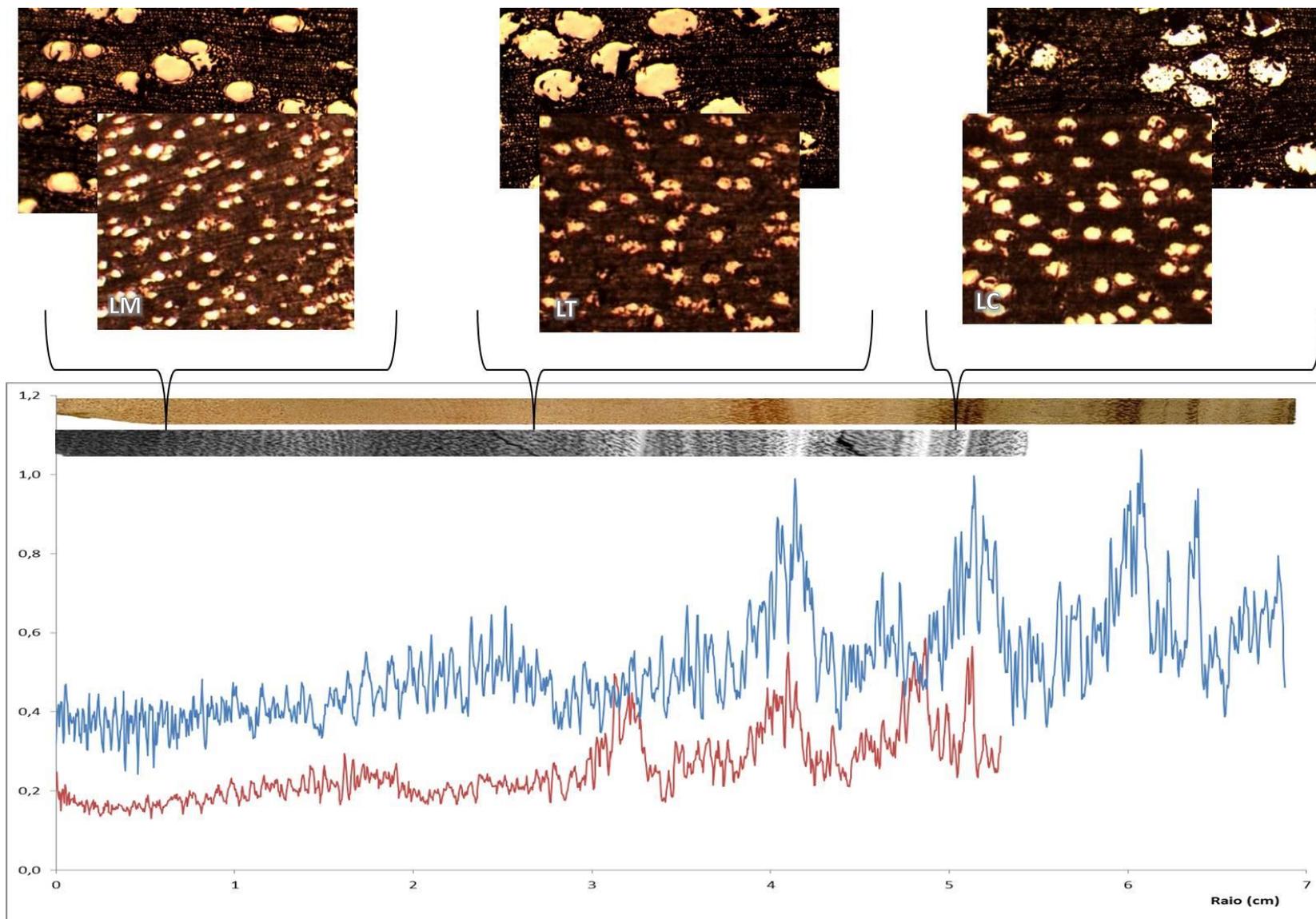


Figura 22 - Densit. de raios X da madeira e do carvão (clone 3) - traço azul/vermelho - e a correlação com a anatomia em 3 pontos distintos (LM, LT e LC)

Os perfis radiais de densidade aparente do lenho (traço azul) e do carvão (traço vermelho) em 6 alturas do tronco das árvores do clone 3 de *E. urophylla*, clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), clone 7 de *E. urophylla*, clone 1 de *C. torellina* x *C. citriodora*, e clone 16 de *C. citriodora*, são apresentados nas Figuras 23 a 27. Os clones foram selecionados pelos valores de densidade aparente do lenho, sendo baixa (clones 3 e 13, de 0,547 e 0,521 g/cm³), média (clone 7, de 0,623 g/cm³) e alta (clones 1 e 16, de 0,749 e 0,868 g/cm³).

Os perfis radiais de densidade aparente do lenho e do carvão atendem o modelo de variação indicado na literatura, por vários autores, caracterizado pela menor densidade no lenho próximo da medula, aumentando em direção à casca (SILVA, 2002; TRUGILHO et al., 2005; ARANGO; TAMAYO, 2008; TOMAZELLO FILHO et al., 2008; ARANTES, 2009; SETTE, 2010); a região do lenho próxima da medula, compreendendo 3-4 cm iniciais do raio, é característica de lenho juvenil, com diferença no sentido longitudinal do tronco, com maior % de lenho juvenil na sua região terminal, observada para quase todos os clones.

Além da variação radial da densidade aparente do lenho, os perfis indicam que (i) alguns clones apresentam raio (ou diâmetro) com significativa variação, indicativo de maior (clone 13, raio de 12,38 cm) e menor crescimento (clone 16, raio de 6,21 cm) do tronco das árvores de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* e (ii) variação do comprimento do raio do lenho em uma mesma altura do tronco das árvores de *Eucalyptus* e *Corymbia*, indicativa da excentricidade da medula e formação de lenho de reação, como nos clones 3 e 13, na altura do tronco de posição 1 (0%) e 2 (DAP).

As regiões do perfil de densidade, caracterizadas por maiores valores de densidade aparente são relacionadas com a formação de zonas fibrosas no lenho – região do lenho com predominância de fibras de parede espessa, menor diâmetro do lume, vasos de menor diâmetro e frequência, típicas de lenho tardio. Ao contrário, as regiões do perfil de menor valor de densidade são características de lenho inicial, com fibras de maior largura, menor espessura da parede e maior diâmetro do lume, vaso de maior diâmetro e frequência. A formação de faixas de crescimento constituída de lenhos de maior e menor densidade é resultado da sazonalidade da atividade cambial do tronco das árvores, face às variáveis climáticas, principalmente ligadas às estações com maior e menor disponibilidade de água, temperatura, fotoperíodo, A apresentação da seção transversal da amostra do lenho e sua

correspondente imagem digital (obtida através dos raios X) das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e de *Corymbia* amplia as possibilidades de uma interpretação mais acurada da variação radial da densidade e de sua relação com a estrutura anatômica do lenho.

A análise dos perfis radiais de densidade aparente do lenho e do carvão evidencia as diferenças marcantes na contração/redução do comprimento das amostras do lenho no processo de transformação em carvão (vide item 4.4). Da mesma forma, essa análise comparativa permite visualizar a similaridade das variações da densidade nos perfis radiais do lenho e do carvão, devida à manutenção da estrutura anatômica do lenho após o processo de carbonização, ou seja, a alternância de zonas fibrosas e “não fibrosas” no lenho mantém-se no carvão, apesar do decréscimo de densidade pelo processo de carbonização (ARANTES, 2009).

A literatura especializada reporta inúmeros trabalhos científicos, como o de Trugilho et al. (2001) que obtiveram valor de densidade aparente da madeira de 0,40-0,49 g/cm³ em árvores de clones de *Eucalyptus grandis*; enquanto que Frederico (2009) obteve valor de densidade aparente do carvão de 0,29-0,32 g/cm³ para árvores de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, valores semelhantes aos encontrados nesse trabalho.

Em árvores de clones de *Eucalyptus*, de 7,5 anos, Pereira et al. (2012) obtiveram valor de densidade aparente do carvão de 0,36 a 0,41 g/cm³, e concluíram que a madeira de maior densidade, resulta em carvão de maior densidade.

A madeira carbonizada de árvores de *Eucalyptus pellitta*, de 5 anos, a 1,25°C/min, 6h, 450°C, mostrou maior rendimento gravimétrico, maior poder calorífico superior e maior teor de carbono fixo e densidade aparente de 0,35 a 0,39 g/cm³ (OLIVEIRA et al., 2010). Dias-Leme et al. (2010) observaram que a madeira carbonizada de *Mimosa ophthalmocentra* e *M. tenuiflora*, à 300°C, não apresenta a aparência de carvão e mantendo a estrutura estratificada das fibras; com o aumento da temperatura de carbonização, à 800°C, os espaços intercelulares dos parênquimas longitudinal e radial aumentam, resultando na ruptura dos raios e fusão do conteúdo dos vasos.

Segundo Tazrout et al. (2012) as regiões do lenho de menor densidade são as de maior perda de densidade no processo de carbonização, coincidente com as observações de Bisset e Ellwood (1951) sobre a maior susceptibilidade das células

de parede delgada da região de madeira juvenil ao processo de colapso pelo aumento da temperatura. Por outro lado, Alzate et al. (2005) obtiveram densidade básica média da madeira de *E. grandis*, *E. saligna* e *E. grandis x urophylla* de 0,46; 0,47 e 0,49 g/cm³, respectivamente, com variações no sentido longitudinal do tronco e com maior valor de densidade básica para o híbrido.

Outros autores também compararam a densidade da madeira e do carvão, conforme pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Densidade básica, aparente e relativa aparente média (g/cm³) de amostras de madeira e de carvão de *Eucalyptus* sp. em trabalhos de Tavares et al. (2012) e Pereira et. al. (2013)

Material Genético	Densidade (madeira)		Densidade (carvão)	
	básica	aparente	relativa	aparente
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0,531 - 0,563	-	-	0,361 - 0,405
<i>Eucalyptus urophylla</i>	0,545 - 0,548	0,525 - 0,528	0,367 - 0,405	0,246 - 0,270
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,577	-	0,385	-
<i>C. toreliana x C. citriodora</i>	-	0,723	-	0,359
<i>E. camaldulensis x E. grandis</i>	-	0,727	-	0,356
<i>C. citriodora</i>	-	0,800	-	0,433

Densidade aparente madeira e densidade aparente carvão - Tavares et al. (2012)

Densidade básica madeira e densidade relativa aparente carvão - Pereira et al. (2013)

A seguir podem ser vistos alguns dos gráficos de densitometria de raios X que comparam a densidade aparente da madeira (traço azul - superior) e a densidade aparente do carvão (traço vermelho - inferior) ao longo da árvore (posição base-topo).

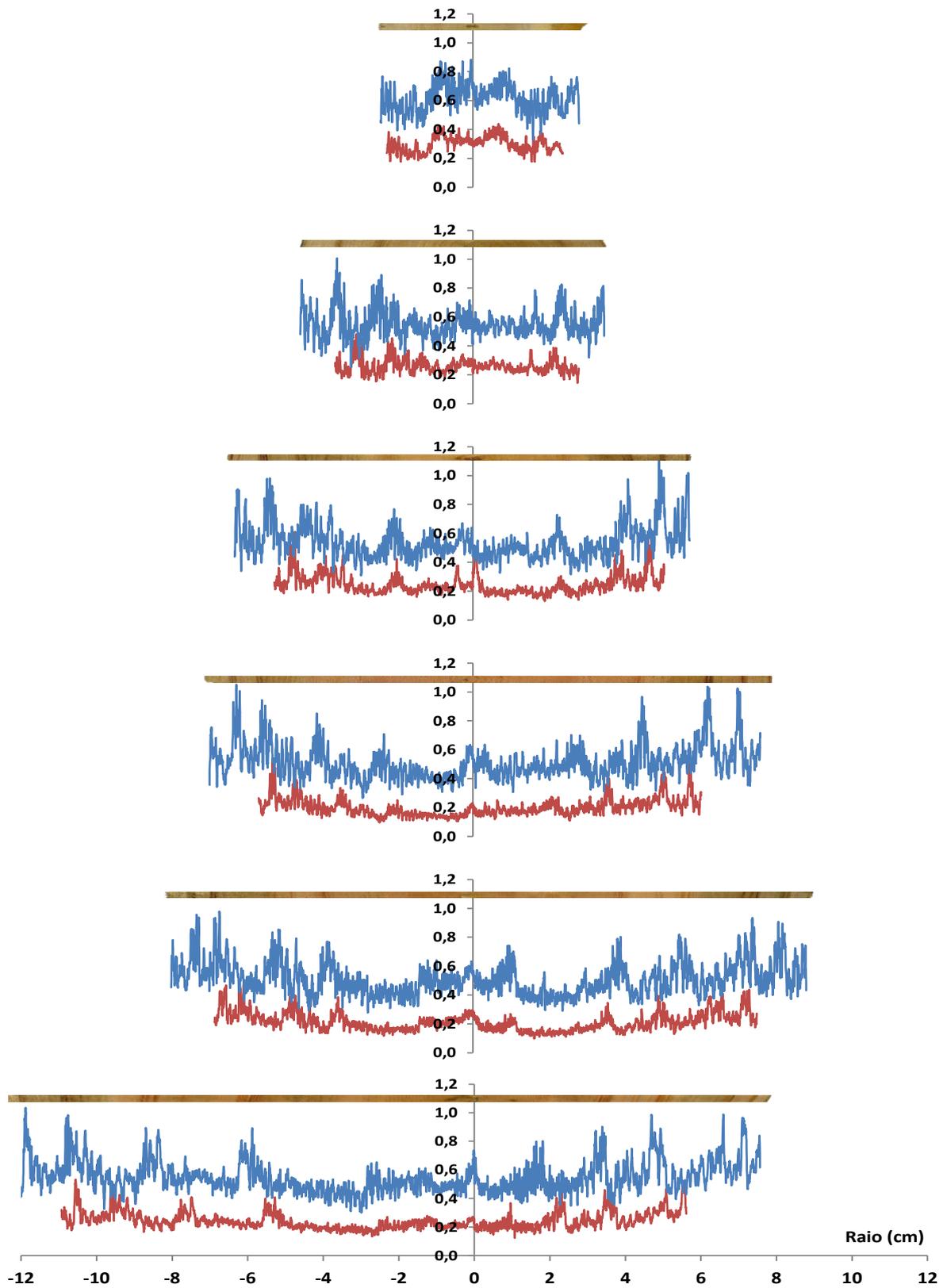


Figura 23 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 1 do clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*)

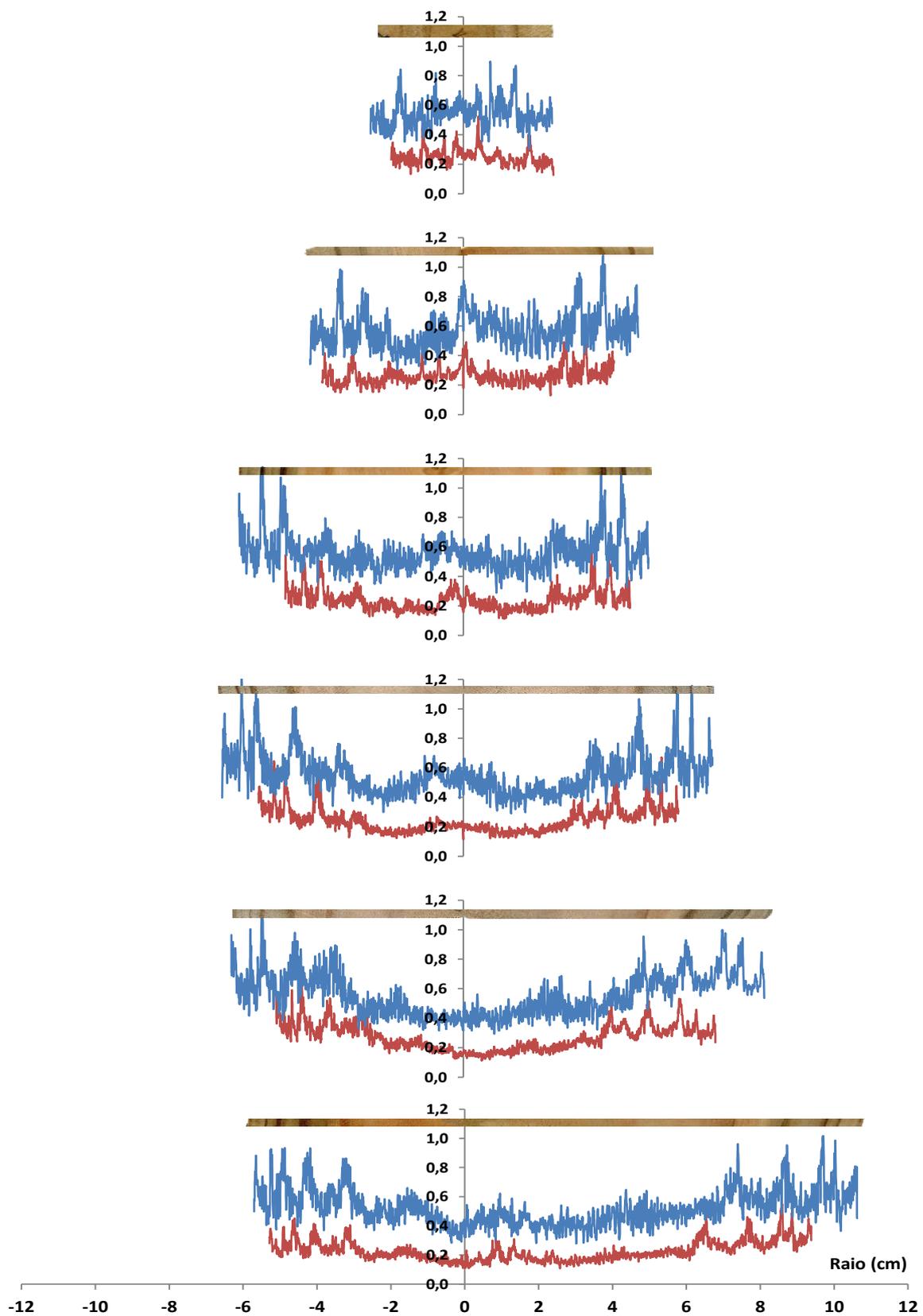


Figura 24 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 3 do clone 3 de *E. urophylla*

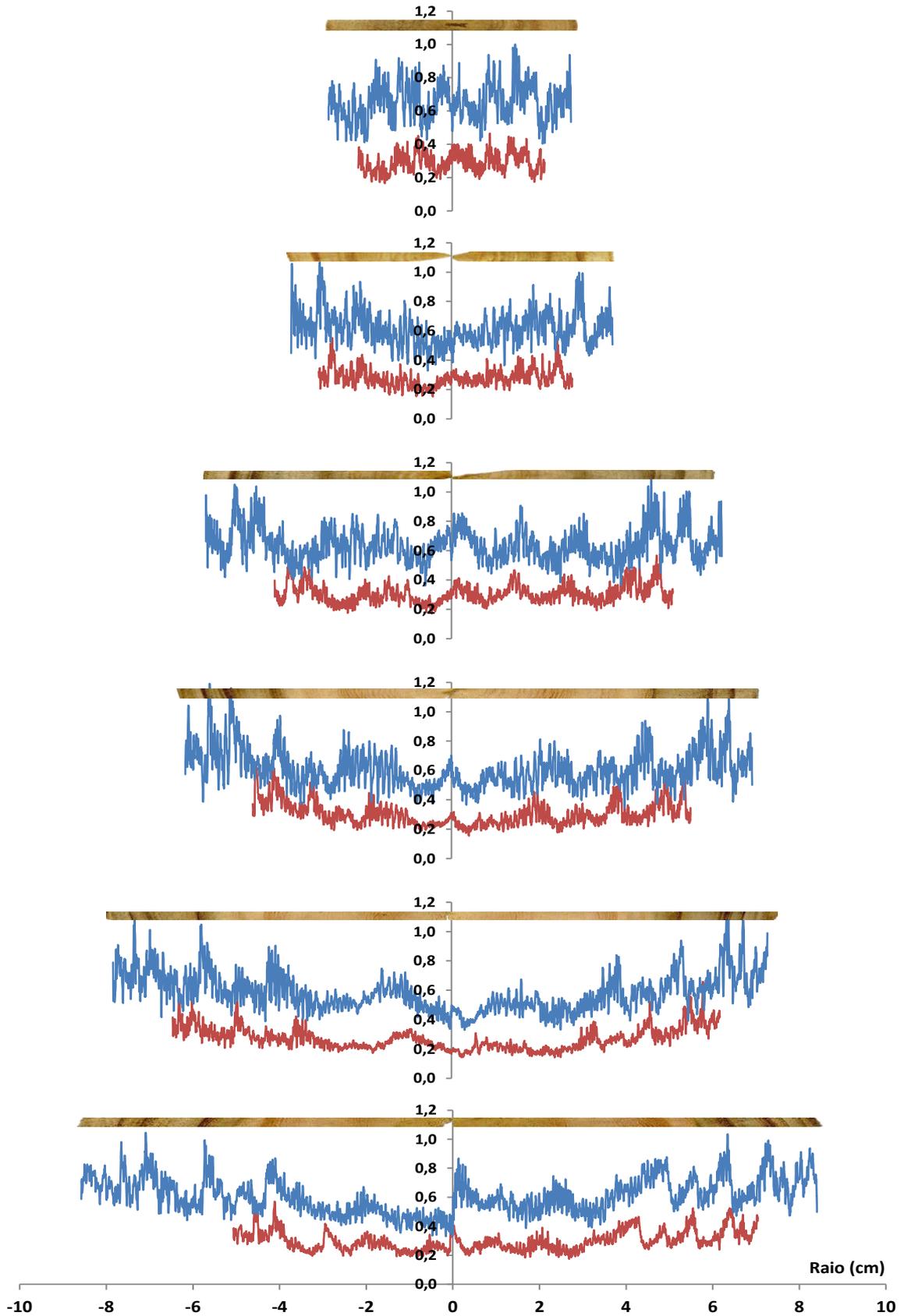


Figura 25 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 1 do clone 7 de *E. urophylla*

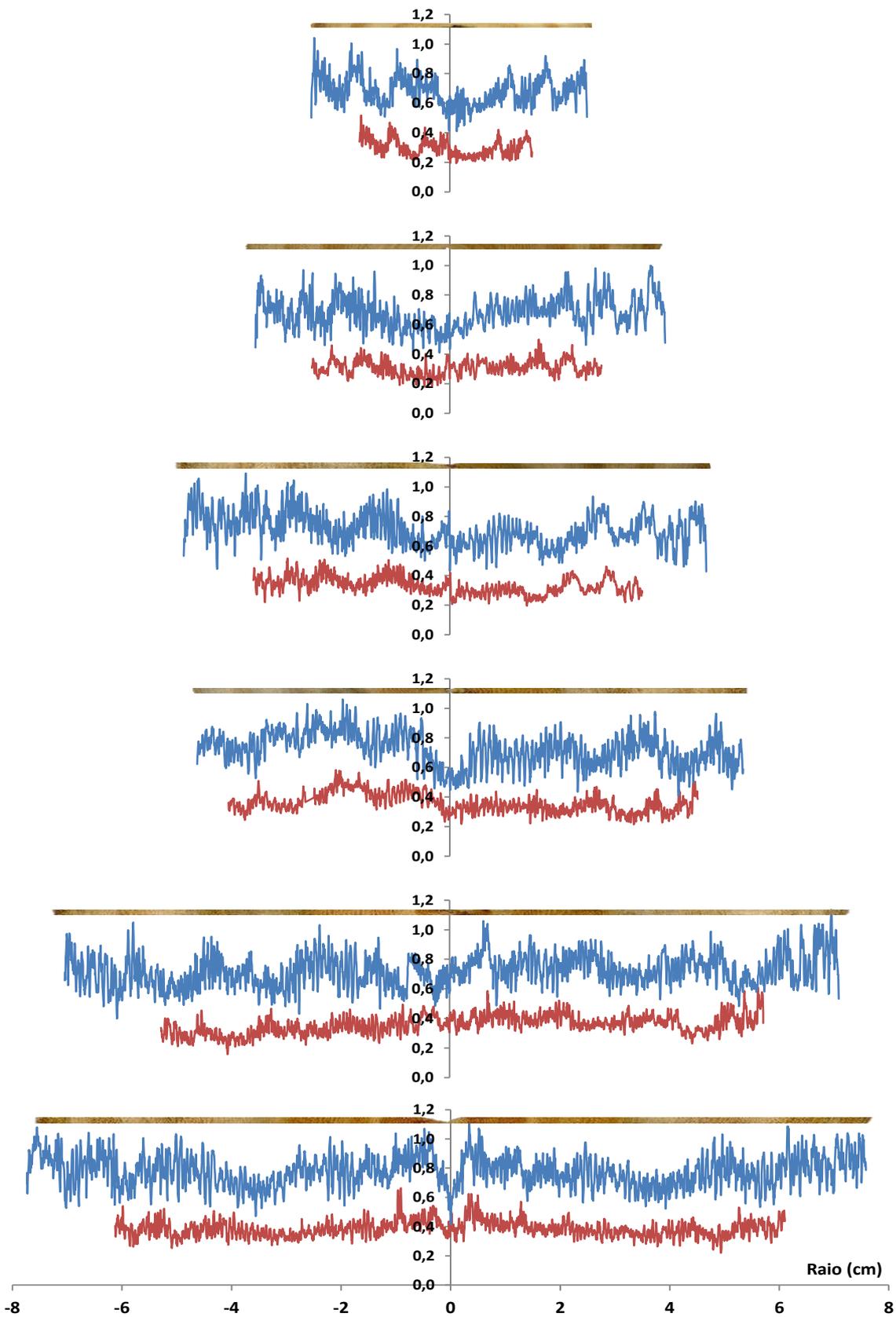


Figura 26 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 1 do clone 1 de *C. torellina* x *C. citriodora*

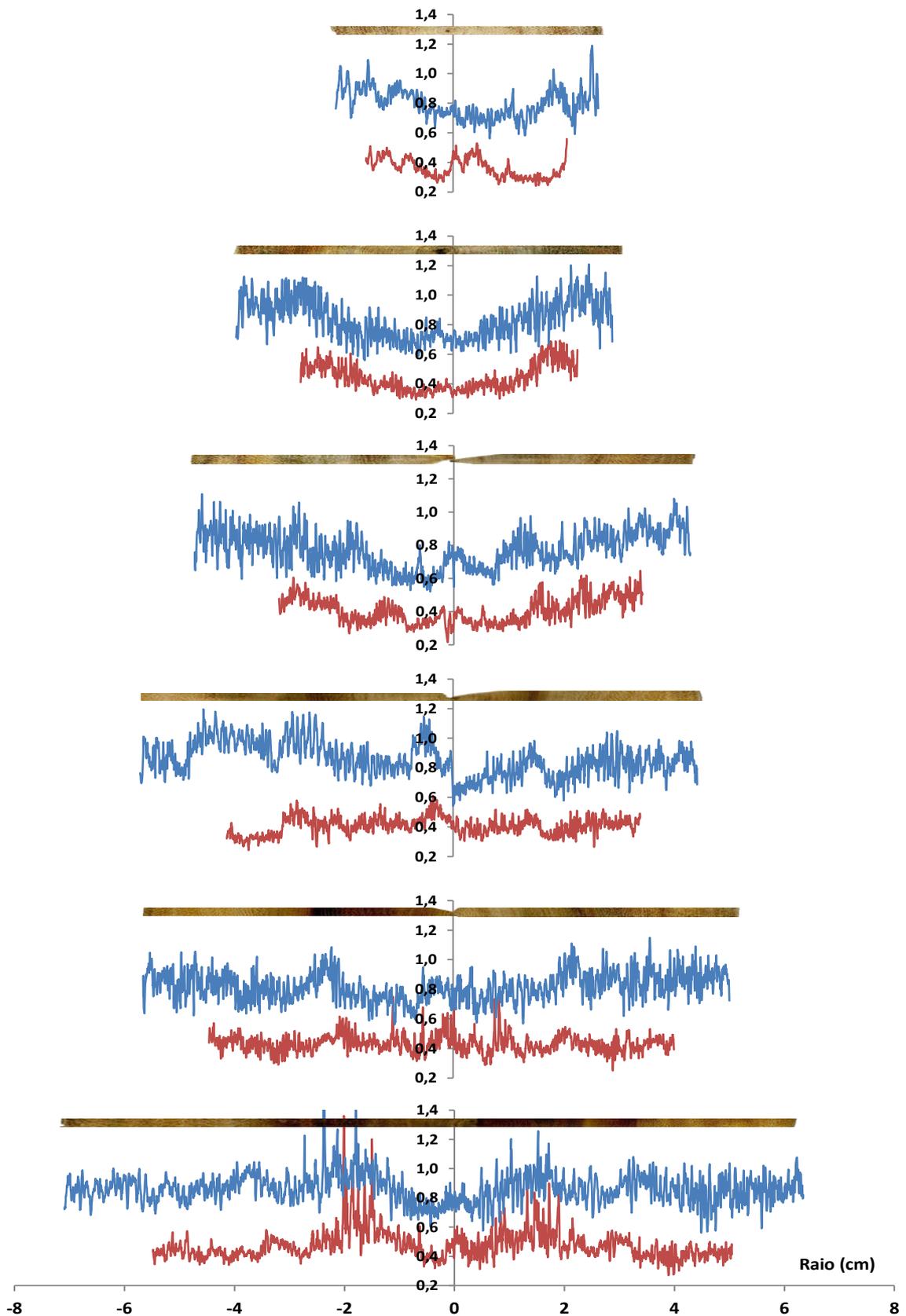


Figura 27 - Perfil radial da densidade aparente (g/cm^3) da madeira (linha azul) e do carvão (linha vermelha) do lenho em 6 posições no sentido longitudinal do tronco da árvore 1 do clone 16 de *C. citriodora*

No sentido longitudinal do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* foram encontradas variações da densidade do lenho e do carvão - o menor valor da densidade aparente da madeira/carvão foi identificado no DAP (posição 2) e o maior valor na base (posição 1) e no ápice (posição 6) do tronco (Tabela 5, Figura 28); os valores de densidade do carvão são estatisticamente diferentes, exceto no DAP (posição 2) e a 25% (posição 3) do tronco das árvores.

Para as árvores de *E. grandis*, de 8 anos, Rezende et al. (1998) apresentaram a variação da densidade do lenho, em diferentes níveis de produtividade, com maior e significativo valor na base do que a 25% da altura comercial do tronco. Da mesma forma, Costa (2006) verificou o aumento da densidade do lenho na direção base-topo do tronco das árvores, a exceção da dos clones de *E. grandis* com maior densidade do lenho somente na região basal do tronco. Panshin e Zeeuw (1970) apresentaram 3 padrões de variação longitudinal da densidade do lenho do tronco da árvore, sendo (i) densidade decresce uniformemente no sentido base-topo; (ii) densidade decresce até determinada altura e aumenta ou diminui até o topo e (iii) a densidade cresce de forma desuniforme da base para o ápice do tronco. O modelo de variação (ii) é apresentado para inúmeras espécies de eucalipto, por diversos autores (BARRICHELO et al., 1983).

As variações na densidade do lenho ao longo do tronco das árvores de eucalipto são menos consistentes do que aquelas verificadas na direção radial. A proporção de madeira juvenil tende a aumentar na direção longitudinal do tronco e, como resultado, a densidade do lenho diminui devido à madeira juvenil (TRUGILHO et al., 1996).

É possível, portanto, observar que a variação das médias de densidade aparente ao longo do tronco segue uma tendência já estabelecida por outros autores de decréscimo no DAP e aumento em direção ao topo. A média da densidade aparente do lenho e do carvão no sentido longitudinal do tronco das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* é apresentada na Figura 28.

Tabela 5 - Densidade aparente média (g/cm^3) da madeira e do carvão em 6 posições no sentido longitudinal do tronco das árvores de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

Posição	Média		Posição	Média	
0%	0,650	(a)	0%	0,316	(a)
DAP	0,605	(f)	DAP	0,286	(e)
25%	0,615	(e)	25%	0,286	(e)
50%	0,643	(d)	50%	0,306	(d)
75%	0,644	(c)	75%	0,310	(c)
100%	0,646	(b)	100%	0,312	(b)

Teste de Tukey - letras diferentes na coluna indicam diferença estatística a 5%

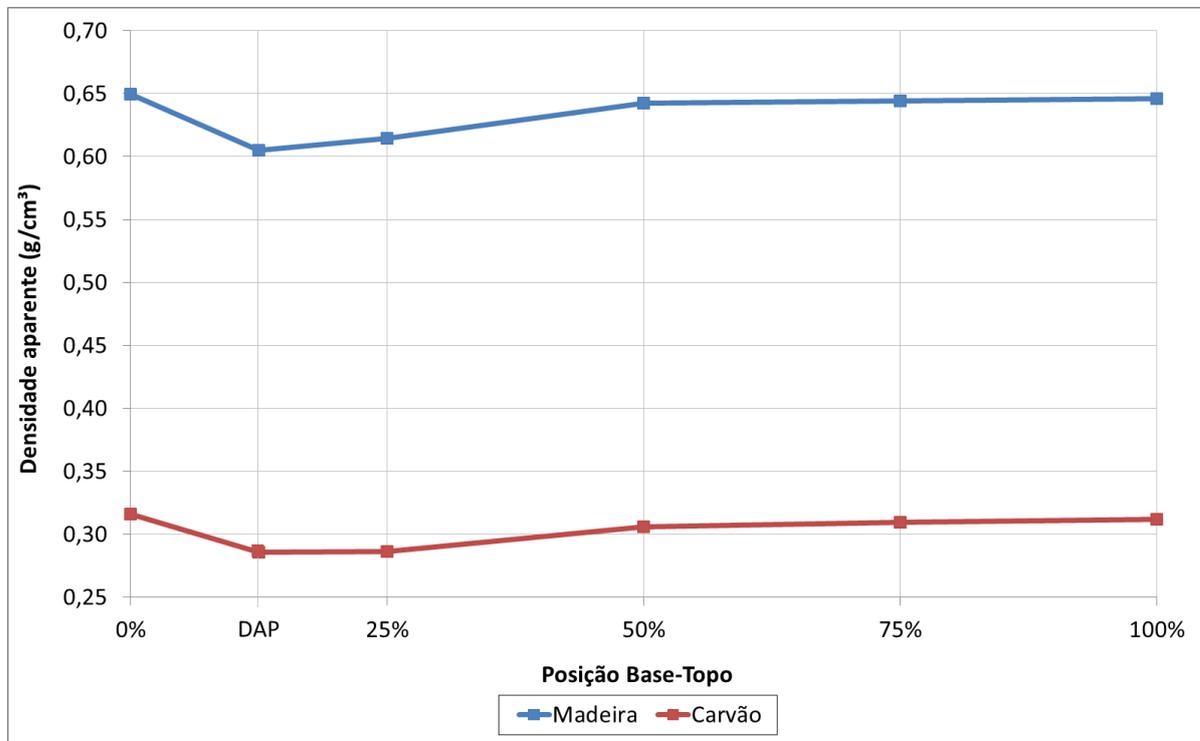


Figura 28 - Densidade aparente média (g/cm^3) da madeira (linha azul - superior) e do carvão (linha vermelha - inferior) em 6 posições (0% a 100%) no sentido longitudinal do tronco das árvores das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

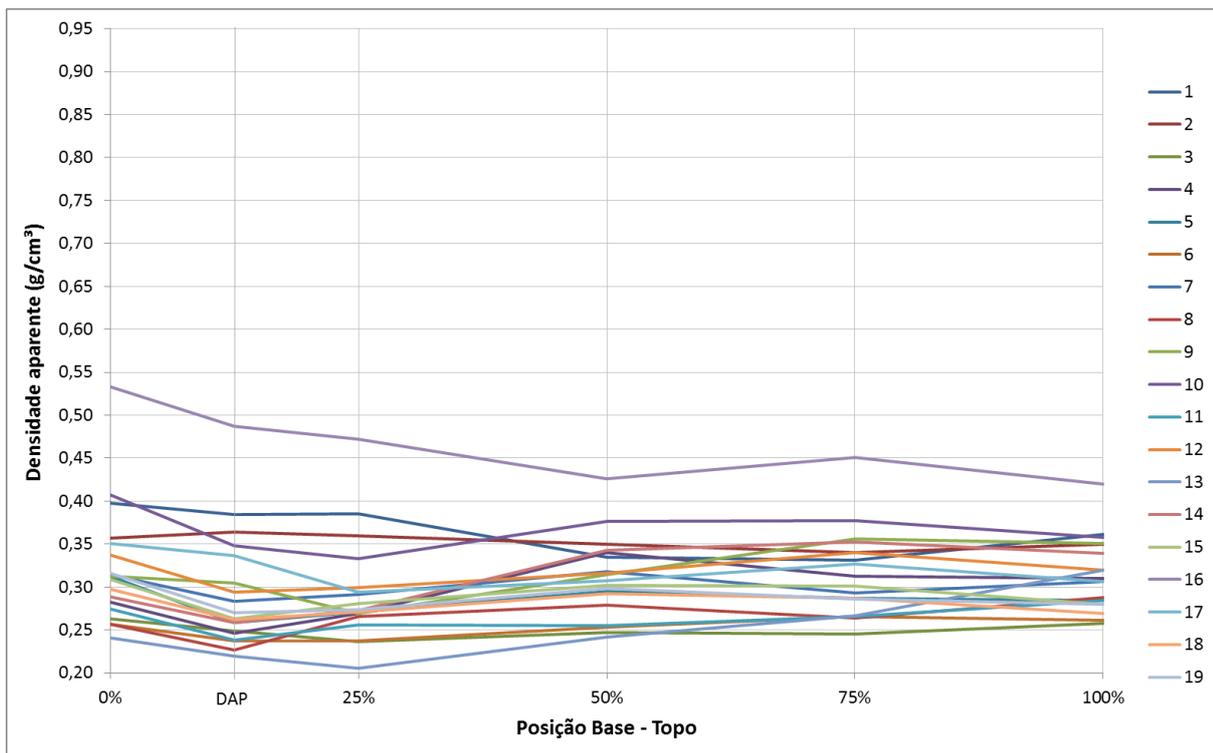
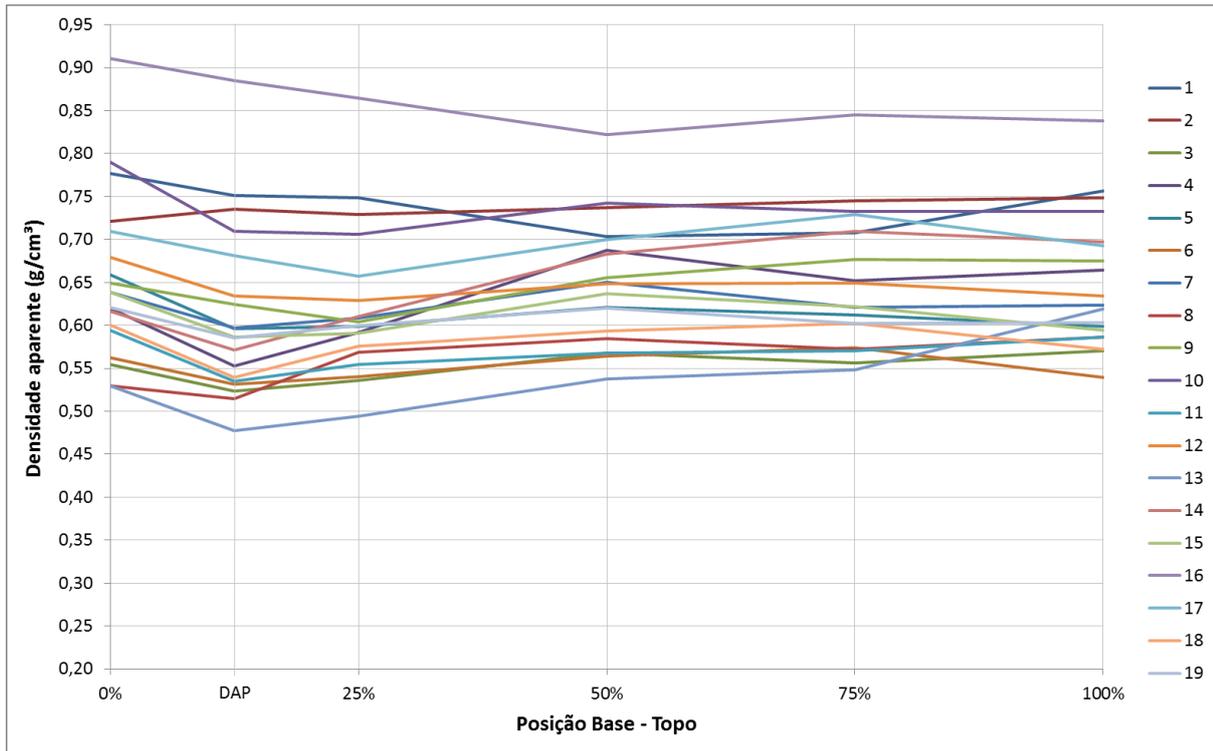


Figura 29 - Variação da densidade aparente média (g/cm^3) da madeira (superior) e carvão (inferior) no sentido longitudinal do tronco das árvores dos 19 clones de eucalipto/corymbia

O valor médio, mínimo e máximo da densidade da madeira e do carvão e sua variação na direção longitudinal do tronco das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e de *Corymbia* são apresentados na Tabela 6 e Figura 30.

Verifica-se que o clone 16 de *C. citriodora*, clone 1 de *C. toreliana* x *C. citriodora* e clone 10 de *E. camaldulensis* x *E. grandis* apresentam a maior densidade aparente média do carvão e da madeira de 0,476-0,868, 0,373-0,749; 0,368-0,738 g/cm³, respectivamente. Por outro lado, o clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), clone 3 de *E. urophylla* e clone 6 de *E. urophylla* apresentaram a menor densidade aparente do carvão e da madeira de 0,238-0,521, 0,250-0,547 e 0,249-0,551 g/cm³, respectivamente. Para os clones 3 e 6 há uma pequena diferença da densidade média do carvão, sendo que o clone 6 tem o menor valor de densidade do carvão após o clone 13; para a madeira é o clone 3 (Tabela 6, Figura 30).

O valor da densidade aparente do carvão e da madeira para os demais clones: clone 4 (0,286 e 0,618 g/cm³), clone 5 (0,285 e 0,617 g/cm³); clone 8 (0,259 e 0,552 g/cm³), clone 9 (0,311 e 0,642 g/cm³), clone 11 (0,260 e 0,566 g/cm³), clone 12 (0,317 e 0,648 g/cm³), clone 14 (0,299 e 0,634 g/cm³), clone 15 (0,289 e 0,613 g/cm³), clone 17 (0,324 e 0,694 g/cm³), clone 18 (0,281 e 0,580 g/cm³) e clone 19 (0,289 e 0,604 g/cm³). A análise estatística indica que a média das densidades aparentes do carvão dos clones não difere significativamente entre si a 5%, entre os clones 4 e 5, clones 15 e 19, clones 11 e 8, clones 3 e 6; com diferença estatística para os demais. A análise estatística indica que a média das densidades da madeira dos clones difere entre si significativamente a 5%, para todos os clones, exceto entre os clone 4 e 5, clones 8 e 6, sem diferença entre as médias.

A densidade aparente da madeira é próxima à relatada por Oliveira e Hellmeister (1998) para as árvores de *C. citriodora*, *E. cloeziana*, *E. urophylla* e *E. grandis*, de 16 anos, com 0,89, 0,85, 0,67 e 0,55 g/cm³, respectivamente; ainda, verificou-se que madeira juvenil localiza-se a 3-4 cm do raio para o *C. citriodora* e 7 cm para o *E. urophylla*.

Moutinho (2013) indica a densidade aparente do carvão do clone 1, 13 e 6, de 0,47, 0,35 e de 0,30 g/cm³, corroborando o valor obtido pela densitometria de raios X; a densidade básica da madeira do clone 1, 13 e 6, de 0,610, 0,529, 0,443 g/cm³ foi em média menor, em se tratando de densidade básica e não aparente.

Analisando árvores de *E. camaldulensis*, de 35 anos, Tazrout et al. (2012) relataram valor de densidade aparente média de 804-918 kg/m³ e, após a termorreificação a 120°C, variou de 785-843 kg/m³, com redução de 8-16%.

Assis et al. (2012) indicam que a densidade do carvão é influenciada pela origem da madeira sendo que, no estudo utilizando-se a madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* destacaram-se os tratamentos de 61 e 86 meses com temperatura final de carbonização de 450° C. Estudos realizados por Tavares et al. (2012) demonstram para árvores de *Eucalyptus* que a densidade aparente do carvão é cerca de 50% menor do que a da madeira (Tabela 4). Por outro lado, Neves et al. (2011) avaliando clones de *Eucalyptus*, de 68 meses, encontraram densidade aparente do carvão de 0,351 g/cm³, concluindo que a madeira de maior densidade e maior teor de lignina é recomendada para a produção de carvão. Botrel et al. (2007) encontraram para árvores de clones de *Eucalyptus* densidade aparente do carvão de 0,280 a 0,420 g/cm³.

Para Calonego et al. (2005) e Adamopoulos et al. (2011) a transição da madeira juvenil-adulta ocorre entre o 5º - 20º ano, sendo que para as árvores de *Corymbia citriodora*, 32 anos, a transição madeira juvenil-adulta ocorreu a 4,5-5,5 cm do raio do lenho.

Quanto à relação cerne/alburno, Pereira et al. (2013) verificaram para a madeira e carvão de clones de *Eucalyptus* que deve-se utilizar o lenho com maior proporção de alburno, de árvores de menor idade que não possuem significativa área de cerne. Os autores indicam na Tabela 4, que a densidade aparente do carvão é 33% menor do que a densidade básica da madeira, normalmente de menor valor do que a densidade aparente.

Verifica-se que o valor da densidade aparente da madeira é semelhante ao indicado na literatura para as árvores de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia*, de diferentes idades; ressalte-se, porém, que a densidade aparente do carvão é obtida pelo método hidrostático da norma NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003), descrito por Protásio et al. (2012) que utiliza a imersão do carvão em água, incluindo os espaços vazios. Somente Arantes (2009) obteve a densidade aparente do carvão de *E. grandis* e *E. urophylla*, 6 anos, pela densitometria de raios X, com valor médio de 0,306 (classe diamétrica baixa: 8,1cm), 0,369 (classe intermediária: 11,4 cm) e de 0,469 g/cm³ (classe superior: 14,2 cm). Os valores de densidade aparente do carvão são similares aos relatados no presente trabalho, exceto o da classe superior, do *C. citriodora* com 0,476 g/cm³, de alta densidade, considerando que as amostras diamétrais do lenho analisadas não são maiores do que 12,83 cm.

Tabela 6 - Densidade aparente (g/cm³) média, mínima e máxima da madeira (M) e do carvão no sentido longitudinal do tronco dos clones/espécies/híbridos de *Eucalyptus* e de *Corymbia*

Clone	Tipo	Posição Base - Topo						Média	
		0%	DAP	25%	50%	75%	100%	Geral (Mín. - Máx.)	
1	M	0,777	0,752	0,749	0,703	0,708	0,757	0,749	(0,349 - 1,287)
	C	0,397	0,385	0,385	0,334	0,331	0,361	0,373	(0,120 - 1,007)
2	M	0,721	0,735	0,729	0,737	0,745	0,749	0,733	(0,387 - 1,137)
	C	0,357	0,364	0,360	0,349	0,340	0,350	0,356	(0,130 - 0,887)
3	M	0,554	0,523	0,536	0,568	0,556	0,570	0,547	(0,177 - 1,216)
	C	0,263	0,248	0,236	0,247	0,246	0,257	0,250	(0,097 - 0,671)
4	M	0,620	0,553	0,592	0,688	0,652	0,664	0,618	(0,231 - 1,255)
	C	0,282	0,246	0,269	0,340	0,312	0,310	0,286	(0,110 - 0,878)
5	M	0,659	0,596	0,598	0,621	0,612	0,599	0,617	(0,273 - 1,193)
	C	0,313	0,258	0,271	0,295	0,287	0,284	0,285	(0,098 - 0,719)
6	M	0,562	0,532	0,541	0,564	0,574	0,539	0,551	(0,255 - 1,187)
	C	0,256	0,237	0,237	0,253	0,265	0,262	0,249	(0,112 - 0,642)
7	M	0,638	0,597	0,608	0,651	0,621	0,624	0,623	(0,285 - 1,773)
	C	0,314	0,283	0,291	0,318	0,293	0,307	0,301	(0,115 - 0,674)
8	M	0,530	0,514	0,568	0,585	0,572	0,587	0,552	(0,248 - 1,085)
	C	0,256	0,227	0,265	0,279	0,263	0,288	0,259	(0,104 - 1,241)
9	M	0,650	0,625	0,604	0,655	0,677	0,675	0,642	(0,290 - 1,345)
	C	0,313	0,304	0,269	0,314	0,356	0,350	0,311	(0,065 - 1,459)
10	M	0,790	0,710	0,706	0,743	0,732	0,733	0,738	(0,331 - 1,248)
	C	0,407	0,348	0,333	0,377	0,377	0,358	0,368	(0,136 - 0,962)
11	M	0,594	0,535	0,554	0,567	0,571	0,586	0,566	(0,242 - 1,244)
	C	0,274	0,238	0,256	0,255	0,266	0,284	0,260	(0,093 - 0,841)
12	M	0,680	0,634	0,629	0,649	0,650	0,634	0,648	(0,271 - 1,182)
	C	0,337	0,294	0,299	0,317	0,340	0,319	0,317	(0,109 - 0,724)
13	M	0,529	0,477	0,494	0,537	0,548	0,619	0,521	(0,141 - 1,112)
	C	0,241	0,219	0,205	0,241	0,266	0,320	0,238	(0,082 - 0,666)
14	M	0,616	0,571	0,611	0,683	0,709	0,697	0,634	(0,290 - 1,456)
	C	0,289	0,258	0,273	0,342	0,352	0,339	0,299	(0,118 - 1,410)
15	M	0,639	0,586	0,591	0,637	0,622	0,594	0,613	(0,255 - 1,263)
	C	0,309	0,263	0,280	0,302	0,301	0,280	0,289	(0,110 - 1,063)
16	M	0,911	0,885	0,865	0,822	0,845	0,838	0,868	(0,412 - 1,658)
	C	0,534	0,487	0,472	0,426	0,451	0,420	0,476	(0,214 - 1,361)
17	M	0,710	0,681	0,657	0,700	0,729	0,693	0,694	(0,318 - 1,152)
	C	0,351	0,336	0,294	0,308	0,326	0,307	0,324	(0,119 - 0,769)
18	M	0,601	0,539	0,576	0,594	0,602	0,572	0,580	(0,280 - 1,345)
	C	0,298	0,262	0,271	0,292	0,287	0,269	0,281	(0,124 - 0,968)
19	M	0,621	0,585	0,600	0,620	0,602	0,603	0,604	(0,261 - 1,149)
	C	0,316	0,270	0,273	0,299	0,286	0,280	0,289	(0,094 - 0,850)

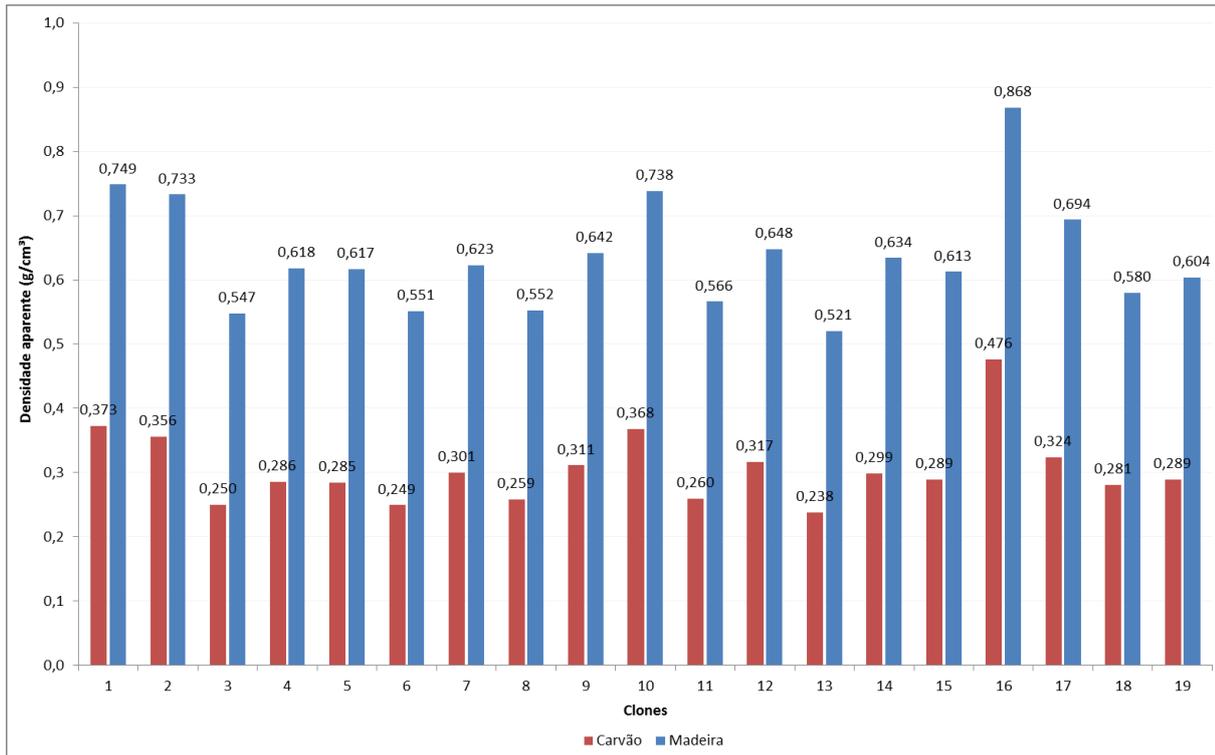


Figura 30 - Densidade aparente média (g/cm³) da madeira e do carvão do lenho do tronco das árvores de clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

4.3.1 Variação da densidade aparente do lenho e do carvão no tronco das árvores

A variação da densidade aparente do lenho e do carvão nos sentidos longitudinal-radial do tronco das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e de *Corymbia*, pela aplicação do programa Scilab, é apresentada nas Figuras 31 a 35. As figuras representam a variação da densidade da madeira e do carvão, pela divisão do tronco - em 2 partes, raios A e B - das árvores dos clones 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), 3 de *E. urophylla*, 7 de *E. urophylla*, 1 de *C. torellina* x *C. citriodora* e 16 de *C. citriodora*, selecionados pelos valores de densidade menores e maiores do lenho e do carvão e utilizados, da mesma forma, nas Figuras 23 a 27, expressando o perfil de densidade por densitometria de raios X (os gráficos de um raio da madeira/carvão dos clones 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18 e 19 se encontram em Anexos, Anexo A).

A análise da distribuição da densidade do lenho e do carvão ao longo do tronco das árvores do clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) – **de menor densidade** – indica as variações de densidade aparente da madeira de

0,3-0,7 g/cm³ (tons verde-laranja) e do carvão de 0,1-0,4 g/cm³ (tons azulados). Observa-se, ainda, os menores valores de densidade aparente do lenho e do carvão concentram-se na posição interna do tronco, próxima à região da medula; no sentido longitudinal (base-topo) do tronco verifica-se, da mesma forma, um aumento gradativo dos valores da densidade aparente do lenho e do carvão, principalmente da posição do DAP para o topo. Para o clone 3 de *E. urophylla* – **de densidade pouco mais alta** – verifica-se a distribuição da densidade aparente da madeira (tons alaranjados) e do carvão (tons esverdeados) de até 0,8 e 0,5 g/cm³, respectivamente. No clone 7 de *E. urophylla* - **densidade média** – a densidade aparente da madeira e do carvão varia de 0,4-0,9 e 0,5 g/cm³, respectivamente.

A análise da distribuição da densidade do lenho e do carvão ao longo do tronco das árvores dos clones 1 de *C. torellina* x *C. citriodora* e 16 de *C. citriodora* – **de alta densidade** - expressa a variação da densidade aparente da madeira (tons alaranjados a escuros) de 0,6-1,0 g/cm³ e do carvão (tons azulados a esverdeados) de 0,3-0,6 g/cm³.

O perfil dos troncos das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* permite inferir com nitidez acerca da variação dos valores de da densidade aparente da madeira e do carvão, bem como a sua localização nos sentidos longitudinal e radial. Desta forma, na base do tronco-próximo da medula encontram-se as regiões do lenho e do carvão de menor densidade aparente; por outro lado, na base do tronco-próximo à casca e, da mesma forma, ao longo de sua altura localizam-se as regiões do lenho e do carvão de maior densidade aparente.

Verifica-se, ainda, que uma redução das dimensões radiais, ao longo da altura do tronco das árvores dos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*, expressando as **contrações da madeira** durante o processo de carbonização, a exemplo do que foi demonstrado pela comparação dos perfis de densidade aparente do lenho e do carvão (Figuras 21, 22).

A justaposição dos perfis do tronco das árvores dos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* permite visualizar a distribuição da densidade aparente da madeira e do carvão, bem como a sua correlação, ou seja, a comparação do tronco cortado e, em seguida, carbonizado. Ainda, é importante vislumbrar a possibilidade da comparação com os parâmetros anatômicos dos vasos (diâmetro e frequência) (discutidos no item 4.1), com as variações da densidade aparente da madeira e do carvão ao longo do tronco das árvores dos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*. Embora haja

necessidade da inclusão dos parâmetros anatômicos fibras (espessura da parede, largura, diâmetro do lume) e parênquimas longitudinal e radial (espessura da parede, largura), é possível observar que a região do lenho (e do carvão) próxima à casca, com vasos de menor frequência/ maior diâmetro (valores próximos à casca) detecta-se a densidade aparente do lenho (e carvão) mais alta.

Com a construção dos perfis de densidade aparente do lenho e do carvão no tronco das árvores de *Eucalyptus* e de *Corymbia* notam-se importantes e estratégicas possibilidades de sua aplicação no setor florestal, no setor tecnológico de conversão da madeira em carvão e demais produtos (fibra, painéis, bioenergia, bioprodutos, madeira sólida, etc.). Da mesma forma, com a inclusão de parâmetros anatômicos tem-se uma importante aplicação em linhas de pesquisa, como melhoramento e genética, manejo de plantações, tecnologia da madeira, etc. A avaliação das características químicas da madeira das árvores dos eucaliptos, como a % de lignina e de outros constituintes químicos, além da densidade e anatomia do lenho é, da mesma forma, importante para a utilização da madeira como carvão e outros produtos da madeira, conforme destacam Trugilho et al. (1997), Vale et al. (2010), Neves et al. (2011) e Moutinho (2013).

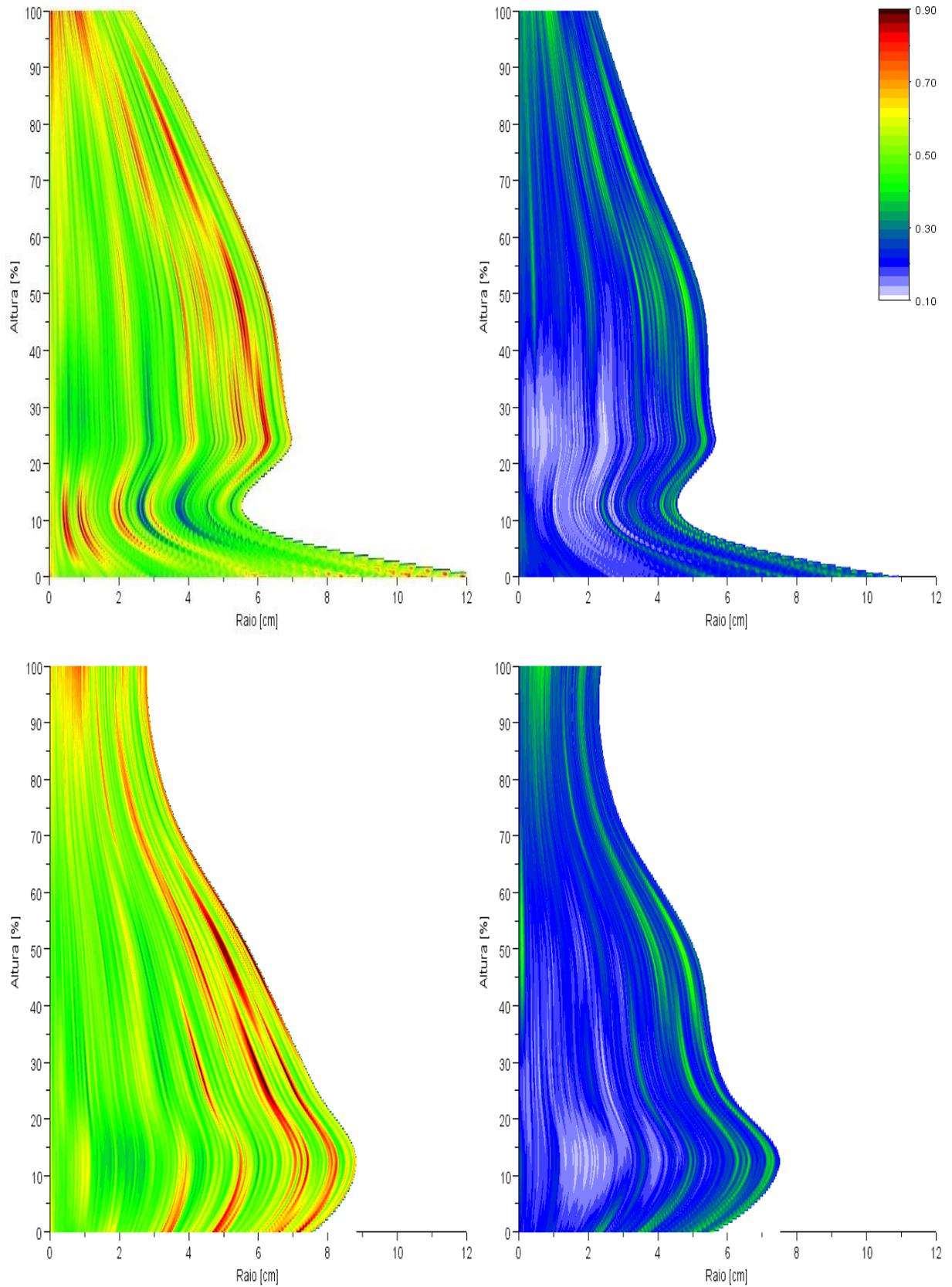


Figura 31 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 1 do clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*)

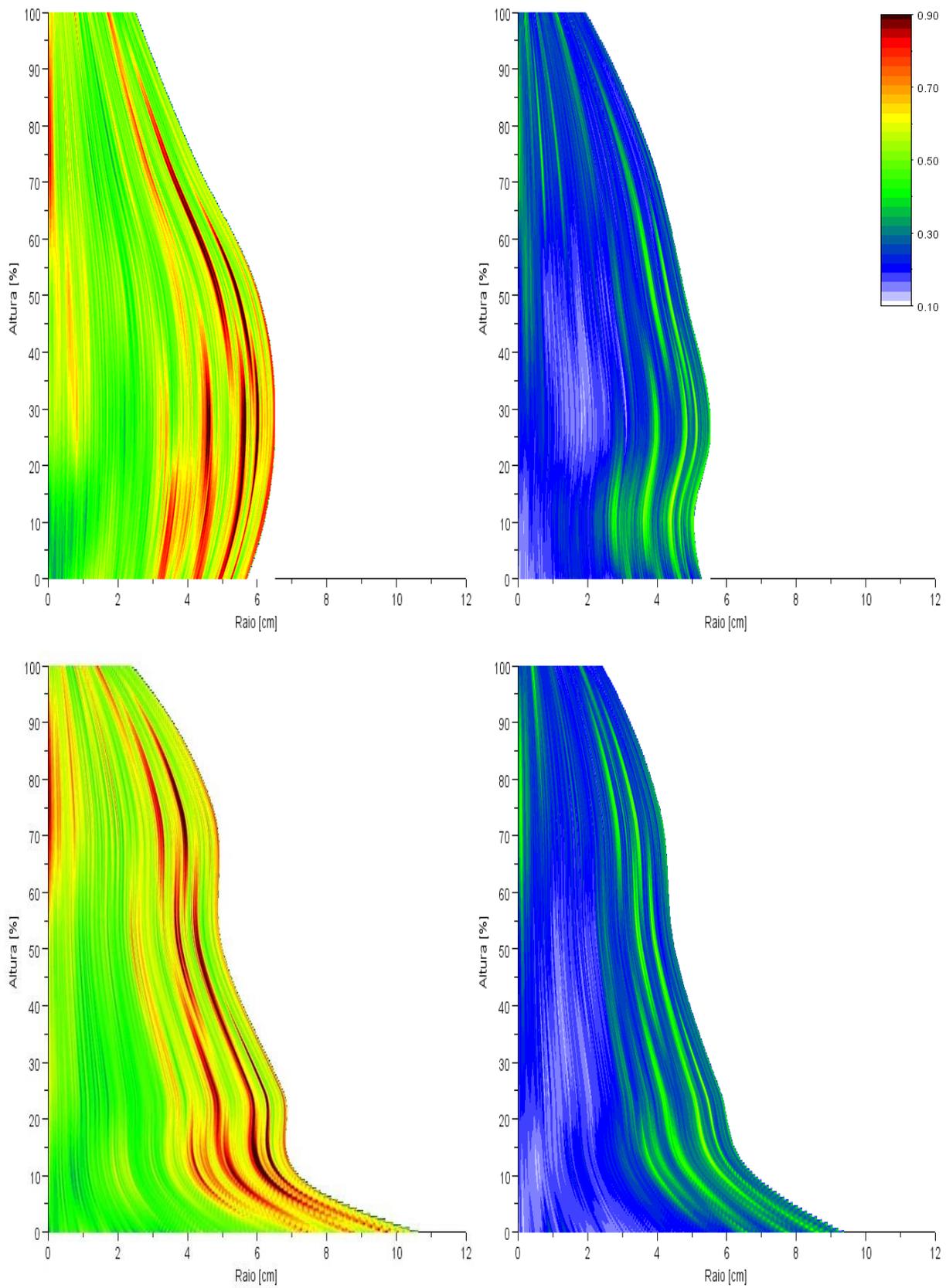


Figura 32 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 3, do clone 3 de *E. urophylla*

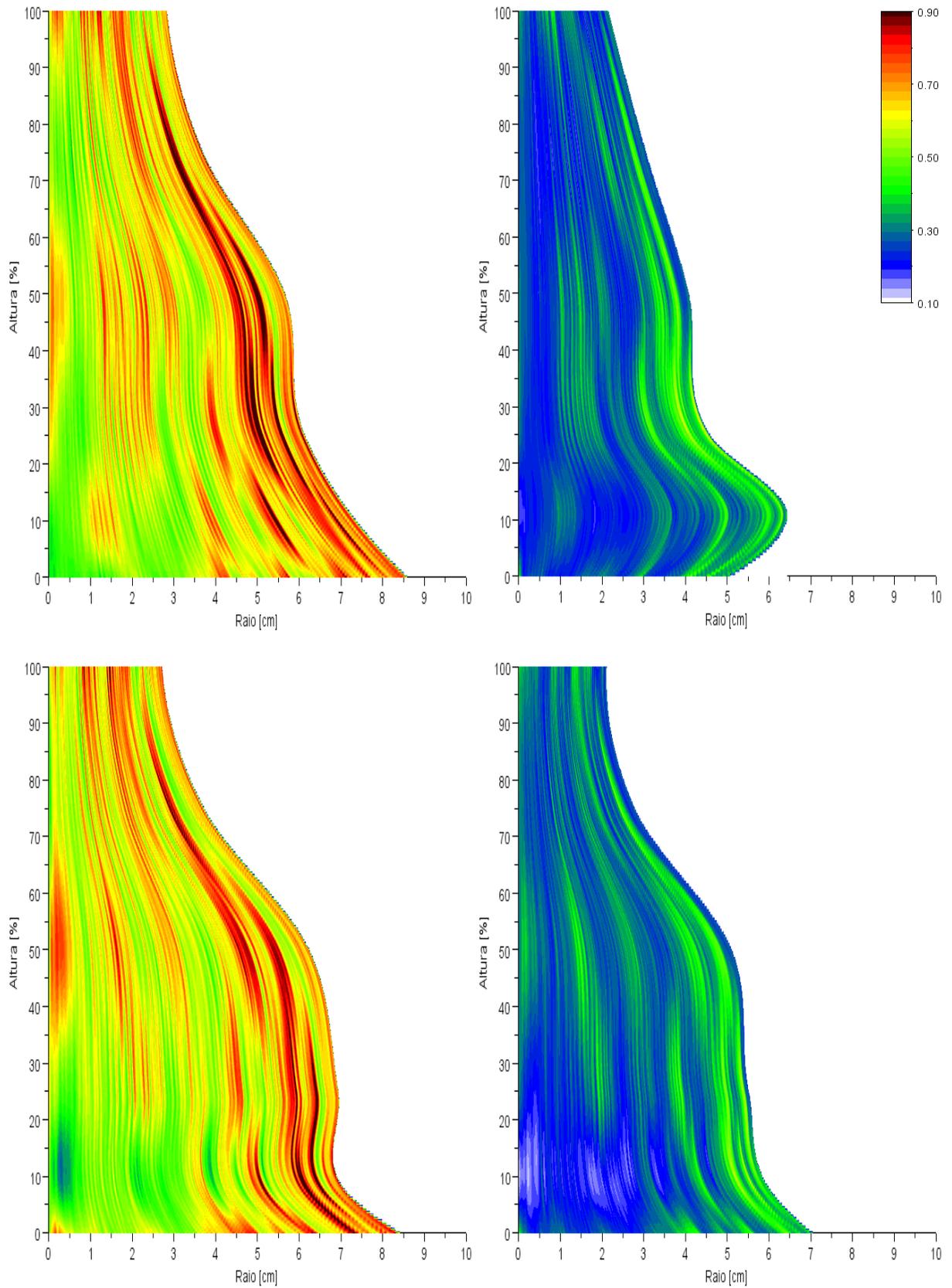


Figura 33 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 1 do clone 7 de *E. urophylla*

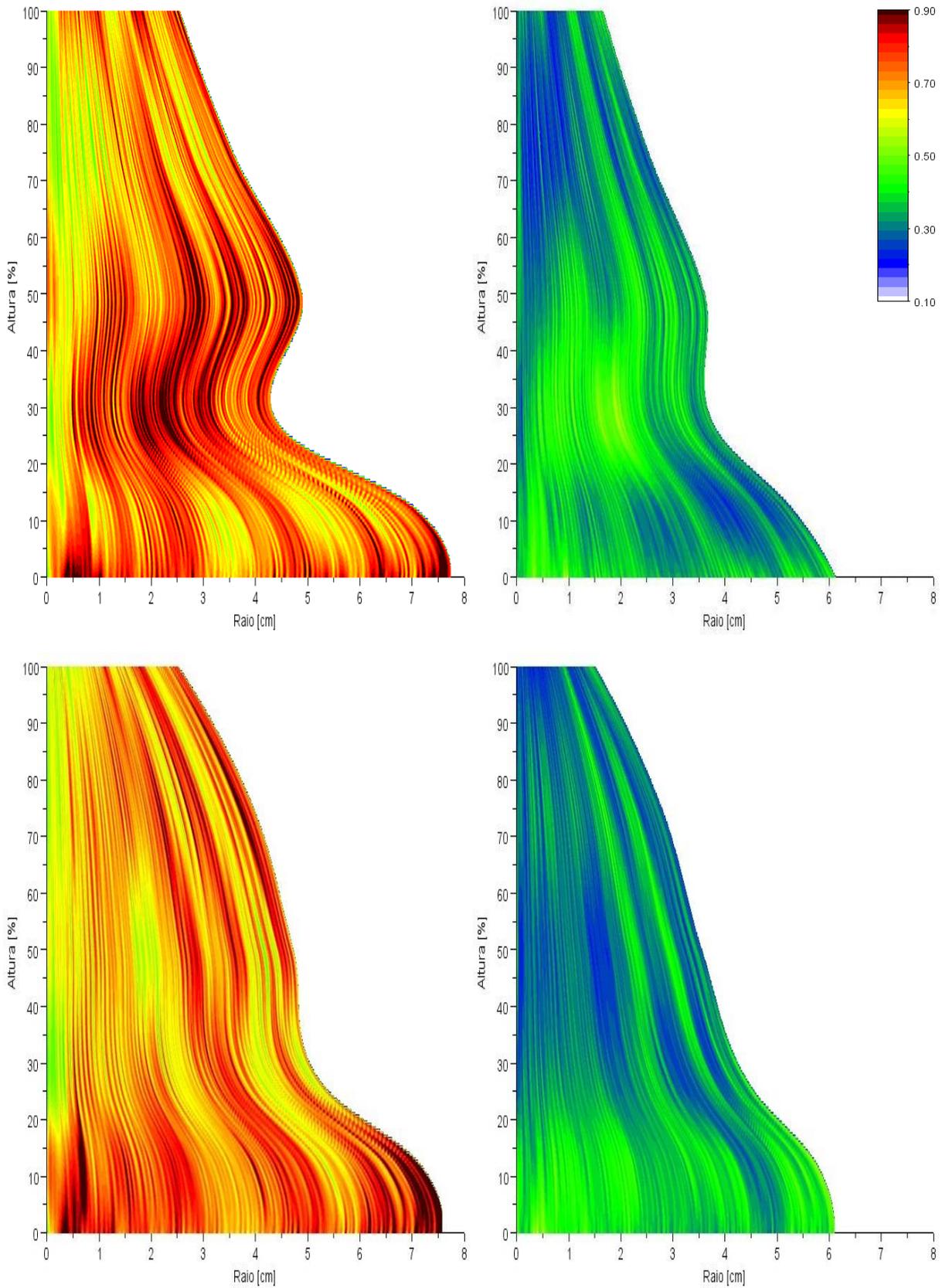


Figura 34 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 1 do clone 1 de *C. torellina* x *C. citriodora*

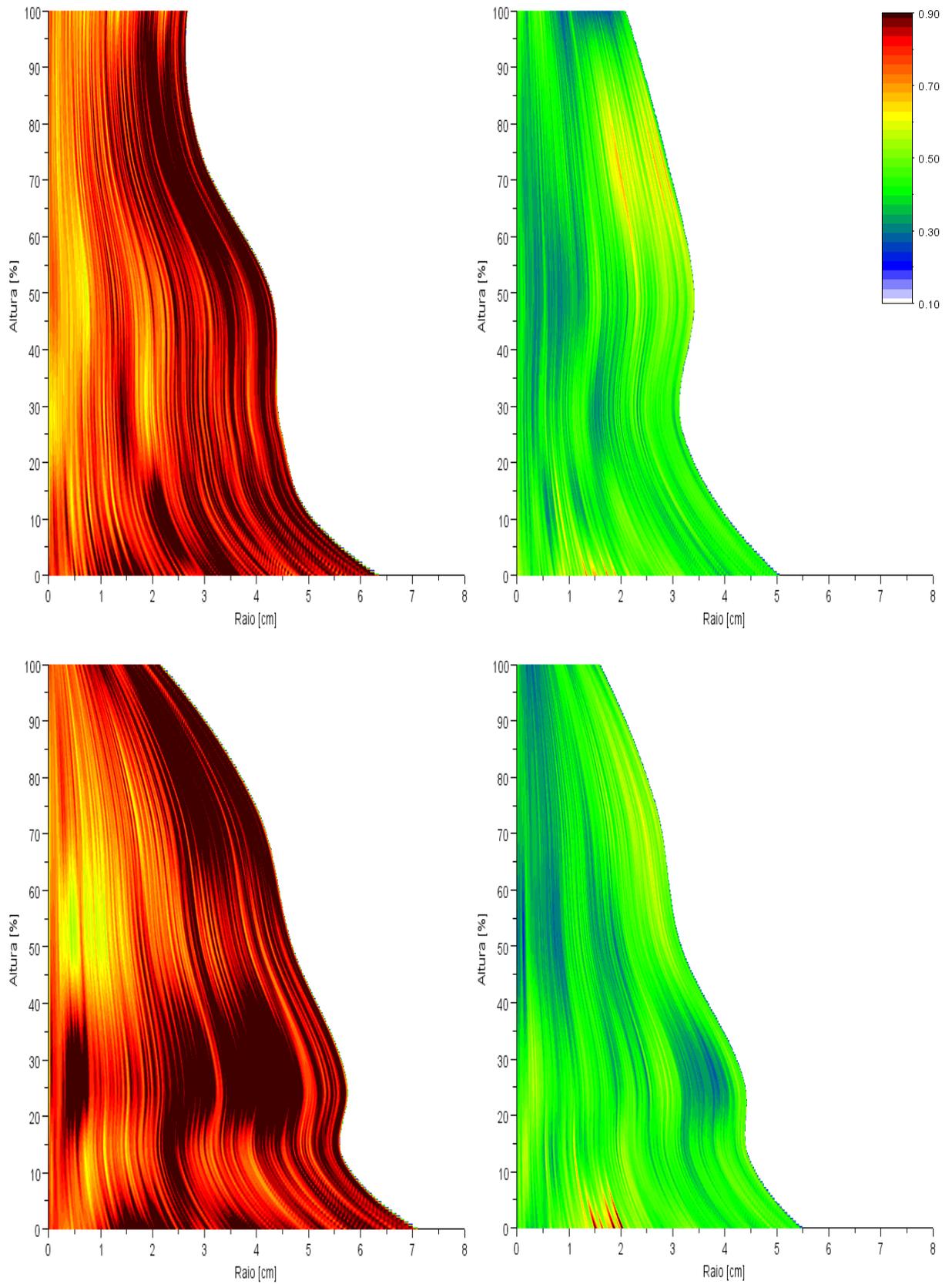


Figura 35 - Variação da densidade aparente da madeira (figuras a esquerda) e do carvão (figuras a direita) - (raio A, superior/raio B, inferior) do tronco da árvore 1 do clone 16 de *C. citriodora*

A redução dos valores de densidade resultante do processo de carbonização da madeira é resultado da degradação térmica dos constituintes químicos da madeira, incluindo os materiais voláteis. Brito e Barrichelo (1980) analisando os valores da densidade básica da madeira e do carvão de várias espécies de *Eucalyptus* obtiveram variações semelhantes, bem como uma correlação entre as densidades. Da mesma forma, Coutinho (1984), Oliveira et al. (1989), Arantes (2009), Vale et al. (2010), Albuquerque (2012) encontraram correlação entre a densidade da madeira e a do carvão mostrando que, quanto maior a densidade da madeira, maior será a do carvão.

Portanto a partir dos dados de densidade aparente da madeira e do carvão dos 19 clones e dos gráficos que demonstram essa estreita relação pode-se observar na Figura 36 que a relação entre as duas densidade é da ordem de $R^2 = 0,975$ (mesmo valor encontrado por Brito e Barrichello (1980)) provando que madeiras de alta densidade irão produzir carvão também de alta densidade e vice-versa. Essa correlação também demonstra que os dados obtidos primeiramente a partir do carvão, como é caso de amostras de carvoarias ou de sítios arqueológicos podem ser extrapolados para o descobrimento das características da madeira que deu origem ao material carbonizado.

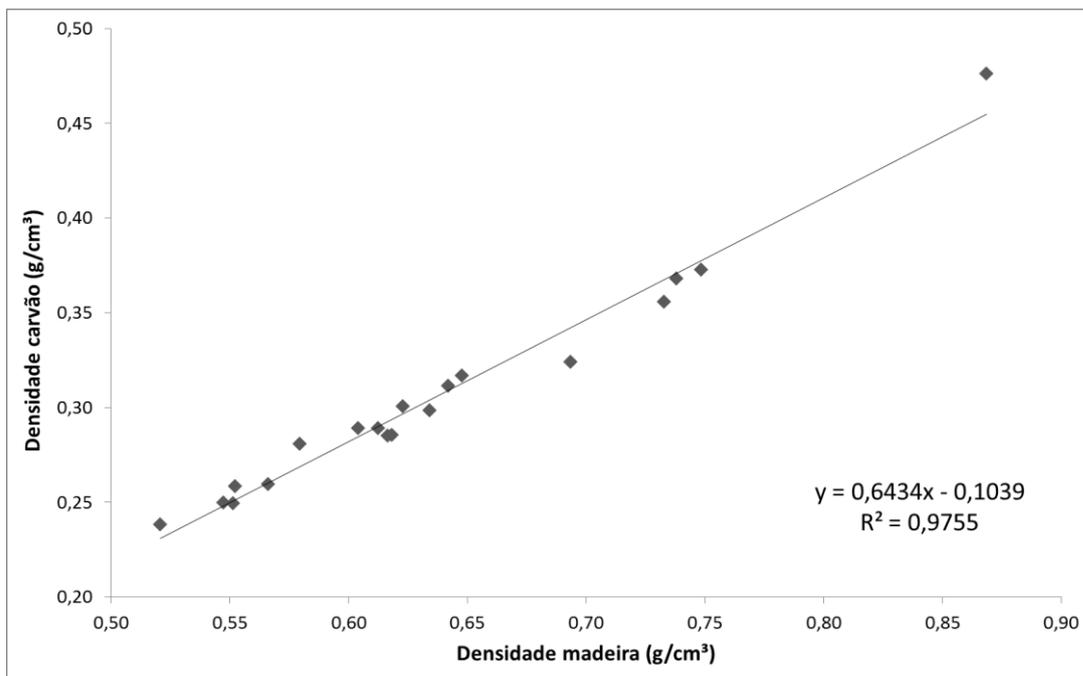


Figura 36 - Relação funcional entre a densidade aparente da madeira e a densidade aparente do carvão de todos os dados (média 19 clones, 3 árvores, 6 posições)

4.4 Análise da redução das dimensões da madeira para o carvão

4.4.1 Imagens radiográficas digitais da madeira e do carvão

A análise das imagens radiográficas das amostras da madeira e do carvão da posição do DAP do tronco das árvores (posição 2) do lenho e do carvão do DAP do tronco das árvores evidencia as características anatômicas e físicas que, muitas vezes, não são visíveis na amostra - faixas de lenho de maior/menor densidade, sua % e distribuição no sentido radial, presença de lenho de tração e de defeitos, como os nós, da biodegradação, entre outros - tornando possível inferir sobre a qualidade da madeira e do carvão. Da mesma forma, constitui-se em ferramenta precisa para determinar a contração, tortuosidade, colapso e rachaduras do processo de carbonização da madeira (Figura 37).

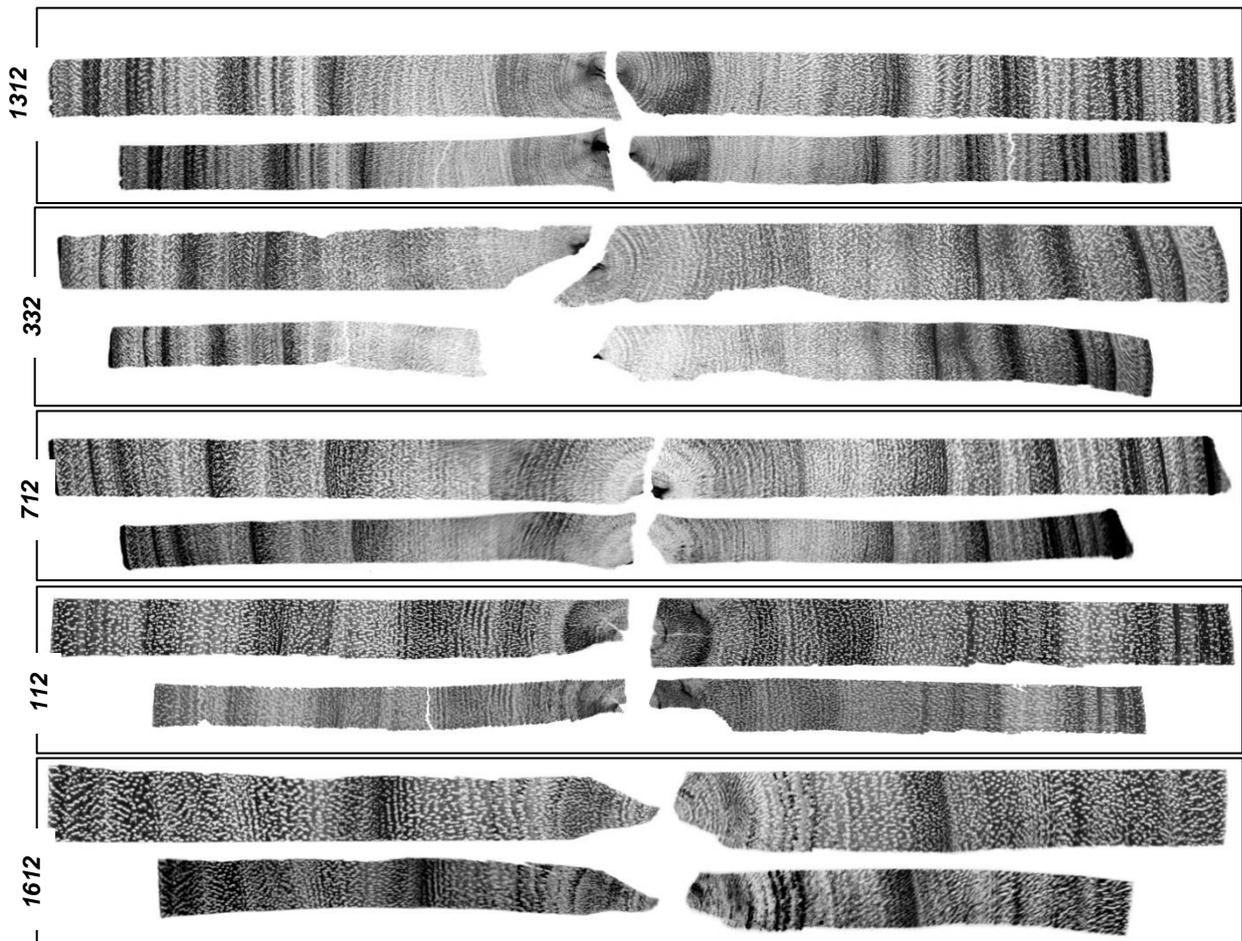


Figura 37 - Seção transversal do lenho (superior) e do carvão (inferior) do lenho do clone 3 de *E. urophylla*, clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), clone 7 de *E. urophylla*, clone 1 de *C. torellina* x *C. citriodora*, clone 16 de *C. citriodora* (Imagens de raios X digital: cor invertida - real) (ordem de menor para maior densidade)

4.4.2 Redução da largura e do comprimento das amostras de madeira para o carvão (contração tangencial e radial)

A imagem radiográfica digital do lenho e do carvão das árvores dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* permitiu mensurar com precisão a contração/redução do seu comprimento e largura. De modo geral pode-se dizer que houve uma maior redução no sentido tangencial das amostras, seguido da redução no sentido radial. Os valores médios foram de 25,72% (posição 20%), 25,88% (40%), 26,12% (60%) e 26,51% (80%), para a redução tangencial, sendo menor na região interna do lenho (próxima à medula) e maior na região externa do lenho (próxima à casca) (Tabela 7); o valor da contração radial da madeira foi de 15,94%.

A variação da contração no sentido tangencial do lenho, resultante da redução da sua largura no processo de carbonização para as árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* é apresentada na Figura 39. O clone que teve a menor redução foi o clone 13, com o valor de 23,26%, com a menor redução na posição 40% de 22,80% (menor redução geral), provavelmente devido ser esse clone de menor densidade aparente.

A relação entre a contração e a densidade aparente do lenho dos clones das árvores das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* indica que os de maior densidade apresentaram maior porcentagem de contração, indicando o efeito da estrutura anatômica, relacionada à contração da parede celular das fibras, vasos, parênquima longitudinal e radial.

O clone 1 de *C. torelliana* x *C. citriodora* e o clone 16 de *C. citriodora*, de alto valor de densidade aparente, mostraram as maiores porcentagens de contração tangencial de 26,82 e 27,58% e radial de 18,66 e 19,20%, respectivamente. Por outro lado, o clone 13 de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) e o clone 3 de *E. urophylla*, de baixa densidade aparente, apresentaram menores valores de contração tangencial de 26,05 e 23,26% e radial de 16,30 e 12,64%, respectivamente (Figura 40). A relação funcional da densidade aparente da madeira e a contração tangencial e radial foram de 0,35 e 0,49, respectivamente (Figura 38).

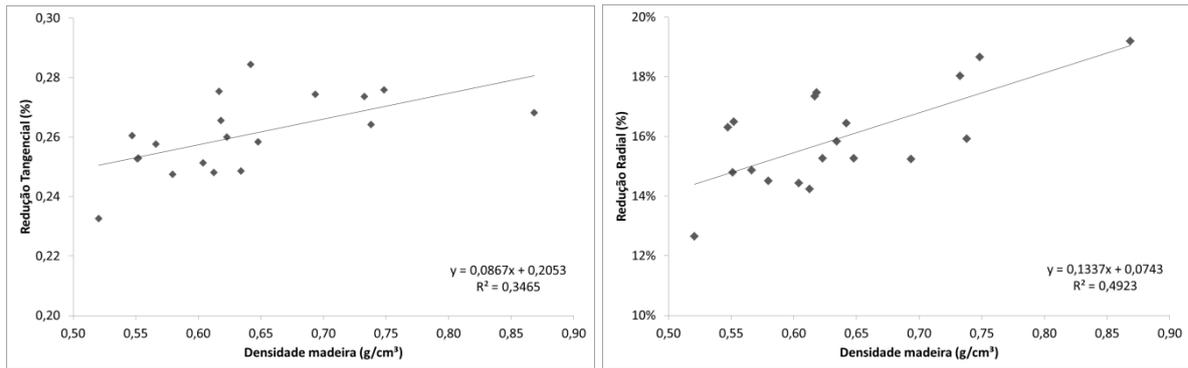


Figura 38 - Relação funcional entre a densidade aparente e contração tangencial e radial do lenho no processo de carbonização das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Tabela 7 - Valores de redução da largura (%) do lenho em relação ao carvão das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* em 4 posições radiais (20, 40, 60 e 80%) (média de 3 árvores e 6 posições base - topo)

Clone	% Redução da Largura			
	20%	40%	60%	80%
1	26,85% (a)	27,47% (a)	27,91% (a)	28,09% (a)
2	26,47% (a)	26,81% (a)	27,84% (a)	28,31% (a)
3	26,19% (a)	26,09% (a)	25,91% (a)	26,00% (a)
4	26,11% (a)	26,61% (a)	27,28% (a)	26,22% (a)
5	27,22% (a)	27,44% (a)	27,31% (a)	28,14% (a)
6	25,33% (a)	25,50% (a)	25,39% (a)	24,81% (a)
7	25,29% (a)	25,79% (a)	26,59% (a)	26,29% (a)
8	25,37% (a)	25,00% (a)	25,23% (a)	25,54% (a)
9	27,85% (a)	28,48% (a)	28,76% (a)	28,64% (a)
10	25,63% (a)	25,71% (a)	26,46% (a)	27,86% (a)
11	25,11% (a)	25,64% (a)	25,89% (a)	26,39% (a)
12	25,73% (a)	24,89% (a)	26,03% (a)	26,70% (a)
13	23,63% (a)	22,80% (a)	23,20% (a)	23,40% (a)
14	24,66% (a)	24,60% (a)	25,11% (a)	25,06% (a)
15	24,64% (a)	25,31% (a)	24,33% (a)	24,95% (a)
16	26,06% (a)	26,45% (a)	27,27% (a)	27,48% (a)
17	26,09% (a)	27,51% (ab)	27,69% (ab)	28,43% (b)
18	25,03% (a)	24,75% (ab)	23,33% (ab)	25,83% (b)
19	25,39% (a)	24,79% (a)	24,76% (a)	25,58% (a)

Letras (a), (b) indicam a diferença estatística entre médias de um mesmo clone para a característica redução da largura. Letras iguais não diferem entre si significativamente a 5% no Teste de Tukey.

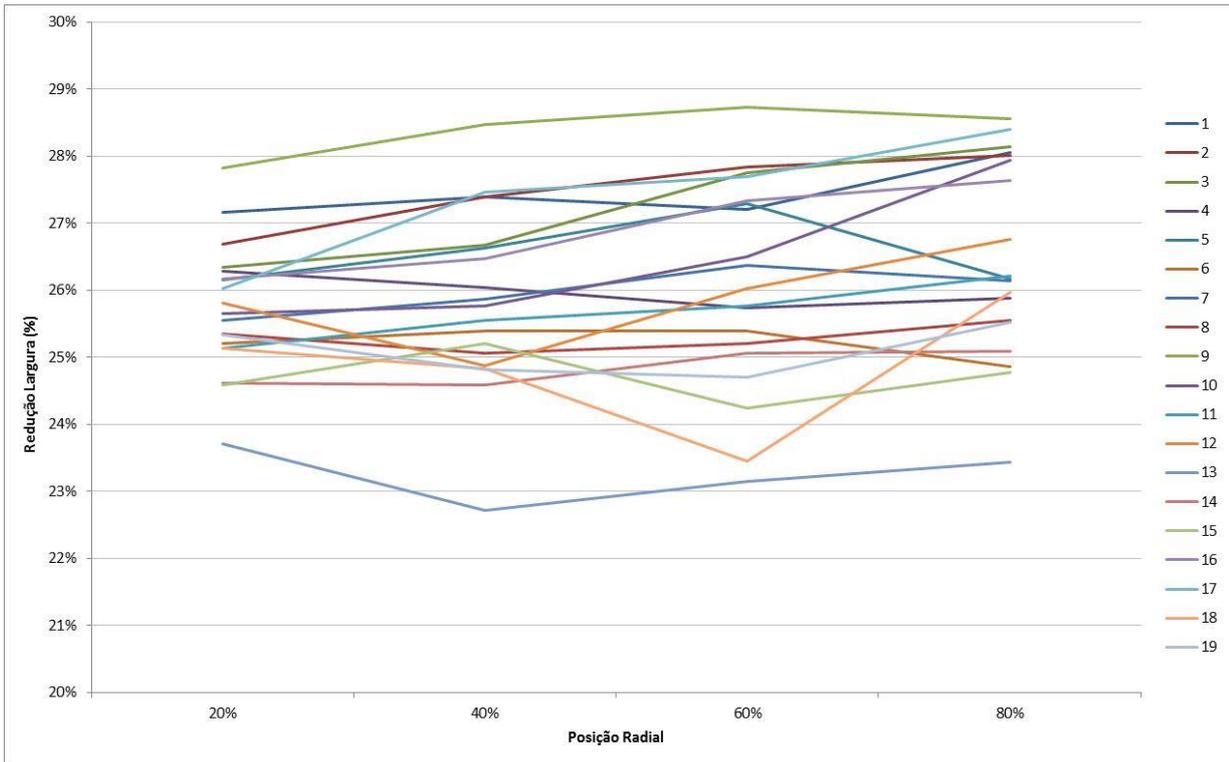


Figura 39 - Valores de redução da largura (%) do lenho para o carvão das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* em 4 posições radiais (20, 40, 60 e 80%) (média de 3 árvores e 6 posições base - topo)

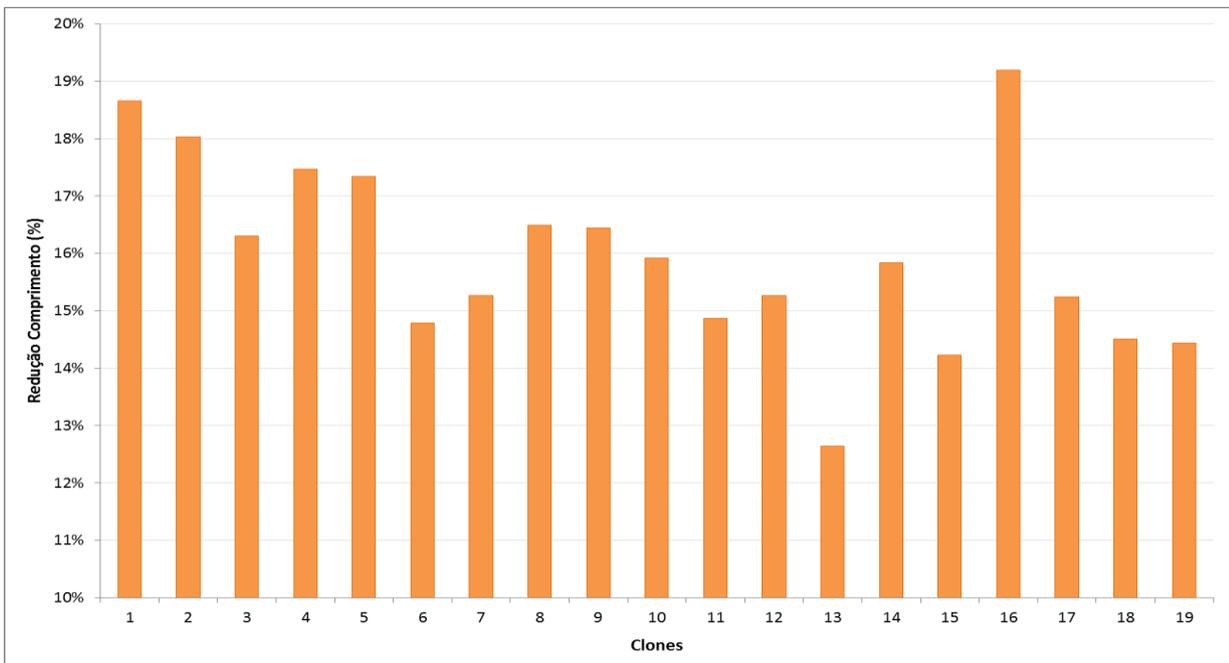


Figura 40 - Valores de redução do comprimento (%) - contração radial - do lenho para o carvão das árvores dos clones das espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Segundo Oliveira (1998) é fundamental o conhecimento das propriedades higroscópicas da madeira para a sua utilização com embasamento técnico, sendo

que a madeira seca a um teor de umidade igual (ou próximo) do equilíbrio com as condições de uso irá minimizar os problemas de rachaduras, etc. Ainda, Silva e Oliveira (2003) analisando a madeira de *E. saligna*, de 10 anos observaram que os parâmetros de retratibilidade são elevados se comparados com o da madeira de outras espécies na mesma faixa de densidade.

A diferença da retratibilidade tangencial e radial é explicada, segundo Kollman e Côté (1968), pela influência restritiva dos raios na direção radial e pelo arranjo helicoidal das microfibrilas diferenciado nas paredes tangenciais e radiais das células. Masseran e Mariaux (1985) relataram que, para a madeira das folhosas, a diferença da retratibilidade tangencial em relação à radial, é atribuída às suas características anatômicas, com o volume dos raios, a dimensão radial das fibras e a diferenciação química entre a parede radial e tangencial sendo responsáveis pela anisotropia da madeira. Hillis e Brown (1978) relataram que a madeira das árvores de eucalipto de maior taxa de crescimento na Austrália apresenta, normalmente, contração excessiva e defeitos de secagem (empenamentos e fendilhamentos) mais intensa nas de menor densidade (<650 kg/m³).

Corroborando essa afirmação, Tsoumis (1991) e Vital e Trugilho (1997) afirmam que a variação dimensional da madeira é, normalmente maior, nas árvores das espécies de maior densidade, pela maior massa de substância madeira por unidade de volume; as madeiras de maior densidade (mesmo teor de umidade), contêm mais água na parede celular, contribuindo para as variações dimensionais.

A carbonização da madeira de árvores de *Quercus variabilis*, 41 anos, à 450° C, realizada por Kwon et al. (2009) resultou em contração tangencial superior a 7,6x em relação à radial. Para o lenho das árvores dos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* a contração tangencial foi 1,6x em relação à radial devido, provavelmente, às diferenças anatômicas da madeira e à idade das árvores.

As Figuras 41 e 42 expressam a diferença entre a contração tangencial (azul - linha esquerda) e a radial (vermelha - linha direita) nas diferentes posições base-topo (eixo y) do tronco das árvores dos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*. Na contração radial do lenho observa-se um pequeno aumento no sentido base-topo do tronco da maioria dos clones e, na tangencial, um aumento até a altura do tronco na posição 25% - 50%, decréscimo até a posição 100%, onde o valor da contração tangencial se aproxima do valor da radial.

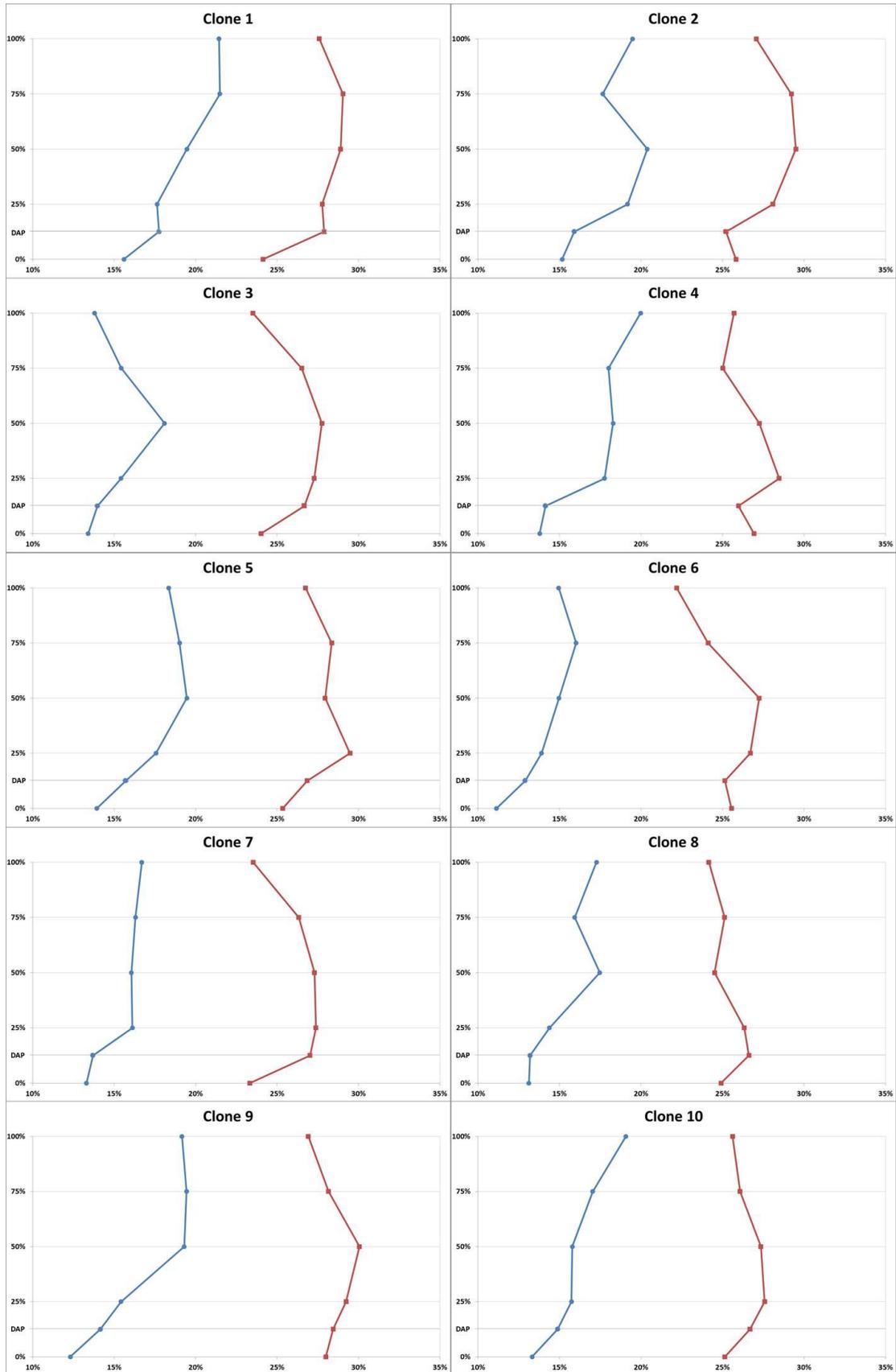


Figura 41 - Contração/Redução tangencial (azul - direita) e radial (vermelha - esquerda) - eixo x - do lenho dos clones 1-10 de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*, no sentido longitudinal (base-topo) do tronco das árvores (eixo y)

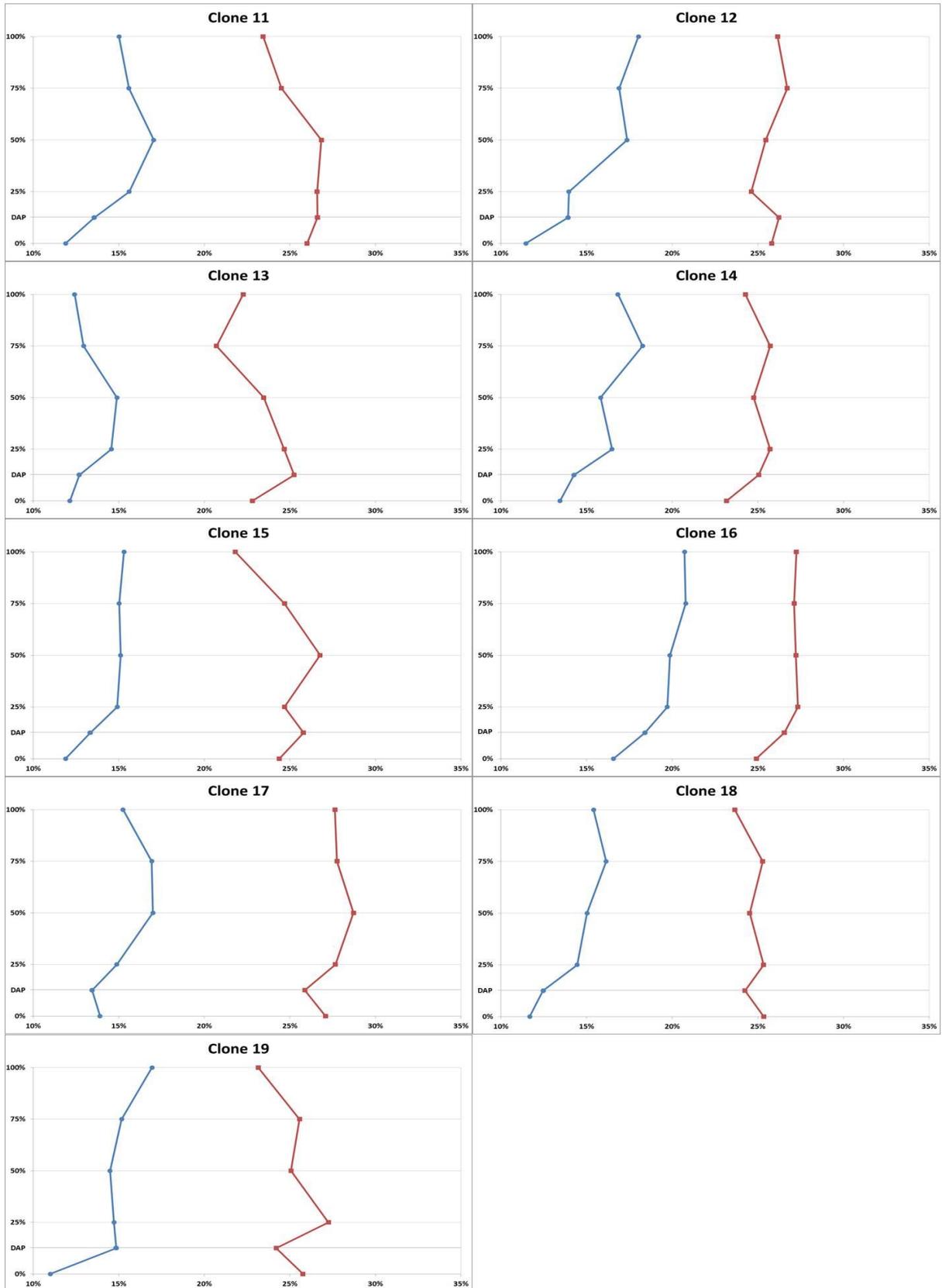


Figura 42 - Contração/Redução tangencial (azul - direita) e radial (vermelha - esquerda) - eixo x - do lenho dos clones 11-19 de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia*, no sentido longitudinal (base-topo) do tronco das árvores (eixo y) (cont.)

5 CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que:

1. A análise da **anatomia comparada da madeira e do carvão** dos clones de espécies e híbridos de *Eucalyptus* e *Corymbia* possibilitou determinar as variações induzidas no processo de carbonização, sendo que (i) os clones 4 (*E. urophylla*), 7 (*E. urophylla*) e 17 (*E. cloesiana*) apresentaram menor frequência de vasos e os clones 16 (*C. citriodora*), 18 (*E. urophylla* Flores) e 10 (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) maior frequência; (ii) os clones 4 (*E. urophylla*), 18 (*E. urophylla* Flores) e 3 (*E. urophylla*) tiveram maior diâmetro dos vasos e os clones 16 (*C. citriodora*), 17 (*E. cloesiana*) e 7 (*E. urophylla*) menor diâmetro dos vasos; (iii) foram observadas alterações na morfologia e frequência dos vasos, na ampliação utilizada; (iv) a estrutura anatômica do carvão mantém-se praticamente inalterada, com potencial para a identificação das espécies;

2. A análise da **densidade aparente comparada da madeira e do carvão** possibilitou (i) determinar uma correlação entre as densidades aparentes da madeira e do carvão com a frequência-diâmetro dos vasos, sendo maior no carvão; (ii) a variação radial da densidade aparente da madeira e do carvão indica um aumento no sentido medula-casca; (iii) a maior densidade aparente da madeira e do carvão foi determinada para os clones de *C. citriodora*; *C. toreliana* x *C. citriodora*; *E. camaldulensis* x *E. grandis*; a menor densidade aparente para os clones de *E. urophylla* e de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*); (iv) a variação longitudinal da densidade aparente da madeira e do carvão indica menor valor no DAP e o maior valor na base e a 100% do tronco; é menor na região próxima da medula e na parte inferior do tronco, na maioria dos clones; (v) a densidade aparente do carvão é cerca de 50% da densidade da madeira;

3. A análise da **redução/contração comparada da madeira e do carvão** possibilitou (i) determinar que a contração ocorre na sua largura e comprimento; (ii) os valores médios totais de contração foram de 25,72; 25,88; 26,12 e 26,51% nas posições 20, 40, 60 e 80% do tronco, respectivamente; (iii) a contração tangencial é

menor na região do lenho próximo à medula e maior no lenho próximo à casca, com valor de 15,94% na contração radial;

4. Os clones indicados com potencial para a produção de carvão de qualidade são o de *Corymbia citriodora* e de *C. torellina* x *C. citriodora*.

REFERÊNCIAS

- ADAMOPOULOS, S.; KARAGEORGOS, A.; PASSIALIS, C.; CHAVENETIDOU, M. Mathematical approach for defining juvenile-mature wood transition zone in black locust and chestnut. **Wood and Fiber Science**, Monona, v. 43, n. 3, p. 336-342, 2011.
- ALBUQUERQUE, A.R. **Anatomia comparada do lenho e do carvão aplicada na identificação de 75 espécies da floresta Amazônica, no estado do Pará, Brasil**. 2012. 250 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- ALMEIDA, G.; LECLERC, S.; PERRE, P.; ALMEIDA, G. NMR imaging of fluid pathways during drainage of softwood in a pressure membrane chamber. **International Journal of Multiphase Flow**, Amsterdam, v. 34, p. 312-321, 2008.
- ALMEIDA, G.A.; BRITO, J.O.; PERRÉ, P. Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed on micro-samples of three *Eucalyptus* species. **Holzforschung**, Berlin, v. 63, p. 80-88, 2009.
- ALMEIDA, M.R.; REZENDE, M.E.A. O processo de carbonização contínua da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.143-156.
- ALZATE, S.B.A.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S.M.S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 87-95, 2005.
- AMARAL, A.C.B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira**. 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
- APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; GUERREIRO, S.M.C. **Anatomia vegetal**. Viçosa: UFV, 2003. 438 p.
- ARANGO, B.; TAMAYO, L. Densidad de la madera en clones de *Eucalyptus* por densitometría de rayos X. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, Medellín, n. 45, p. 87-99, set. 2008.
- ARANTES, M.D.C. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 137 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MINAS GERAIS. O eucalipto no Brasil e em Minas. **O Eucalipto**, Belo Horizonte, p. 9-15, maio 2004. Disponível em: <http://www.almg.gov.br/opencms/export/sites/default/consulte/publicacoes_assembléia/cartilhas_manuais/arquivos/pdfs/o_eucalipto/brasil_minas.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2013.

ASSIS, M.R.; PROTÁSIO, T.P.; ASSIS, C.O.; TRUGILHO, P.F.; SANTANA, W.M.S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Embrapa, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291, set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2011**. Brasília, 2012. 145 p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF12/ABRAF12-BR.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2013.

_____. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2012**. Brasília, 2013. 142 p. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Florestas energéticas no Brasil: demanda e disponibilidade**. 2009. Disponível em: <http://www.silvimirinas.com.br/Publicacao/Arquivos/publicacao_585.pdf> Acesso em: 02 jul. 2013.

_____. **Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.silvimirinas.com.br/>>. Acesso em: 02 abr. 2013.

BACHA, C.J.C.; BARROS, A.L.M. Reflorestamento no Brasil: evolução recente e perspectiva para o futuro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.66, p.191-203, 2004.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O.; MIGLIORINI, A.J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 726-731, jan./fev.1983.

BISSET, I.J.W.; ELLWOOD, E.L. The relation of differential collapse and shrinkage to wood anatomy in *Eucalyptus regnans* and *E.gigantea*. **Australian Journal of Applied Science**, Melbourne, v. 2, p. 17-26, 1951.

BOTREL, M.C.G.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n.3, p.391-398, 2007.

BRAADBAART, F.; POOLE, I. Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts. **Journal of Archaeological Science**, Amsterdam, v. 35, n. 9, p. 2434-2445, 2008.

BRITO, J.O. **Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *E. citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise**. 1992. 92 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

_____. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 1-9, 2007.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2. Densidade da madeira x densidade do carvão, **IPEF**, Piracicaba, n. 20, p. 101-113, jun.1980.

BRITO, J.O.; SILVA, F.G.; LEÃO, M.M.; ALMEIDA, G.A. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 99, n. 18, p. 8545-8548, Dec. 2008.

BROWNING, B.L. **The chemistry of wood**. New York: John Wiley, 1963. 689 p.

BULCKEA, J.V.; MASSCHAELEB, B.; DIERICKB, M.; ACKERA, J.V.; STEVENSA, M.; HOOREBEKE, L.V. Three dimensional imaging and analysis of infested coated wood with X-ray submicron CT. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Amsterdam, v. 61, n. 3, p. 278–286, Apr. 2008.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.154 p.

BUSNARDO, C.A.; FOELKEL, C.E.B. Estudos comparativos da qualidade da madeira de algumas espécies de eucaliptos tropicais. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 11., 1978, São Paulo. **Trabalhos técnicos...** São Paulo: ABCP, 1978. p. 221-232.

CALONEGO, F.W.; SEVERO, E.T.D.; ASSI, P.P. Mensuração do comprimento das fibras para a determinação da madeira juvenil em *Eucalyptus citriodora*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 68, p. 113-121, 2005.

CAMPOS, A.C.M. **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR**. 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

CARVALHO, A. **Madeira de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.), estudos, ensaios e observações**. Lisboa: Direcção-Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas, 1962. 159 p.

CARVÃO vegetal: o eucalipto na indústria de carvão vegetal. **Revista da Madeira**, v. 13, n. 75, 2003. Disponível em: <<http://www.remad.com.br>>. Acesso em: 02 abr. 2013.

CASTRO, R.R.; SILVA, M.L.; LEITE, H.G.; OLIVEIRA, M.L.R. Rentabilidade econômica e risco na produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 353-359, out./dez. 2007.

CHAGAS, M.P. **Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais**: avaliação temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de Paulínia, São Paulo. 2013. 160 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

CHAGAS, M.P.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOYA, R.A.; ARAUJO, A.L.L. Variação da densidade básica da madeira, no sentido base topo, de árvores de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla*. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 13., 2005, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: USP, 2005. 1p.

COSTA, V.E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla***. 2006. 99 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2006.

COUTINHO, A.R. **Qualidade do carvão vegetal correlacionada com as características da madeira de *Eucalyptus saligna* e temperatura de carbonização**. 1984. 76 p. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

COUTINHO, C.A.; FERRAZ, E.S.B. Determinação da densidade do carvão vegetal por atenuação da radiação gama. **Circular IPEF**, Piracicaba, n. 39, p. 17-20, ago.1988.

DIAS-LEME, C.L.; CARTWRIGHT, C.; GASSON, P. Anatomical changes to the wood of *Mimosa ophthalmocentra* and *Mimosa tenuiflora* when charred at different temperatures. **IAWA Journal**, Leiden, v. 31, n. 3, p. 333-351, 2010.

DOUNGPEP, M. **Environment and genetic effects on wood quality of *Populus***. 2005. 263 p. Dissertation (Doctor of Philosophy) - North Carolina State University, Raleigh, 2005.

DREW, D.M.; DOWNES, G.M.; BATTAGLIA, M. CAMBIUM, a process-based model of daily xylem development in *Eucalyptus*. **Journal of Theoretical Biology**, Amsterdam, n. 264, p. 395-406, 2010.

O EUCALIPTO na indústria de carvão vegetal, **Revista da Madeira**, Caxias do Sul, n. 75, p.1-9, ago. 2003.

EVANGELISTA, W.; SILVA, J.; AGOSTINI, M.E.; XAVIER, B. Caracterização anatômica quantitativa da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 273-284, 2010.

EVANS II, J.W.; SENFT, J.F., GREEN, D.W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 7/8, p. 75-87, 2000.

FAXITRON. **MX20 Digital Radiography System**. Disponível em: <<http://www.faxitron.com/sites/default/files/pdf/MX20-Datasheet-WEB.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2013.

FERRAZ, E.S.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Uso de métodos nucleares nos estudos da qualidade da madeira. **Revista Silvicultura**, São Paulo, n. 14, p. 14-17, 1978.

FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Científica Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 36-41, 2008.

FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 4, p. 65-89, 1972.

_____. Escolha de espécies de eucalipto. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 47, p. 1-30, 1979.

FERREIRA, O.C. Emissões de gases de efeito estufa na produção e no uso do carvão vegetal. **Economia e Energia**, n. 20, maio/jun. 2000. Disponível em: <<http://www.ecen.com/eee20/emiscarv.htm>>. Acesso em: 02 jul. 2013.

FLORSHEIM, S.M.B.; COUTO, H.T.Z.; SPEGIORIN, L.; ROCHA, F.T. Variação da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* aos 7 anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 179-191, dez. 2000.

FOELKEL, C. **Elementos de vaso e celuloses de eucalipto**. 2007. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT04_vasos.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2013.

FOELKEL, C.E.B.; BUSNARDO, C.A.; DIAS, C.; SCHMIDT, C.; SILVA, R.M.R. da; VESZ, J.B.V. Variabilidade radial da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 726-731, fev.1983. Anais... Apresentado no CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1983, São Paulo.

FRANKLIN, G.L. Permanent preparations of macerated wood fibers. **Tropical Woods**, Yale, n. 49, p. 21-22, 1937.

FREDERICO, P.G.U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

GOLFARI, L.; CASER, R.L.; MOURA, V.P.G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil**. Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal do Cerrado, 1978. 66 p.

GOMES, M.T.M. **Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsa de mercadorias**. 2006. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

GOMES, P.A.; OLIVEIRA, J.B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W.R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 27-41.

GONÇALVES, T.A.P. **Anatomia do lenho e carvão de espécies arbóreas em áreas de cerrado do Estado de São Paulo**. 2010. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2010.

GONÇALVES, T.A.P.; MARCATI, C.R.; SCHEEL-YBERT, R. The effect of carbonization on wood structure of *Dalbergia violacea*, *Stryphnodendron polyphyllum*, *Tapirira guianensis*, *Vochysia tucanorum*, and *Pouteria torta* from the Brazilian cerrado. **IAWA Journal**, Leiden, v. 33, n. 1, p. 73-90, 2012.

GONZAGA, J.V. **Qualidade da madeira e da celulose Kraft de treze espécies de Eucalyptus**. 1983. 119p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1983.

HEIN, P.R.G. **Genetic and environmental control of microfibril angle on Eucalyptus wood: its effects on wood traits and implication for selection**. 2011. 168 p. These (Docteur de L'Universite Montpellier) - Universite Montpellier, Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 2011.

HIGUCHI, T. **Biochemistry and molecular biology of wood**. Berlin: Springer, 1997. 362 p.

HILLIS, W.E.; BROWN, A.G. **Eucalypts for wood production**. Melbourne: CSIRO, 1978. 434 p.

HOADLEY, R.B. **Identifying wood: accurate results with simple tools**. New York: Taunton Press, 1990. 240 p.

HUDSON, I.; WILSON, L.; VAN BEVEREN, K. Vessel distribution at two percentage heights from pith to bark in a seven year old *Eucalyptus globulus* tree. **Appita Journal**, Melbourne, n. 50, p. 495-500, 1997.

_____. Vessel and fiber property variation in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*: some preliminary results. **IAWA Journal**, Leiden, v. 19, p. 111-130, 1998.

IAWA COMMITTEE. IAWA List of microscope features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 221-332, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2010**. v. 25. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pevs/2010/pevs2010.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. **Chave de Identificação de Espécies Florestais (CIEF)**. Piracicaba, 2004. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/cief/lista.asp>>. Acesso em: 02 abr. 2013.

JESUS, R.M.; VITAL, B.R. Comparação entre densidade de matrizes e de clones de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 82-90, 1986.

JUVILLAR, J.B. O carvoejamento da madeira e seus reflexos na qualidade do carvão: qualidade da madeira. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 64, p. 1-6, 1979.

KEECH, O.; CARCAILLET, C.; NILSSON, M.C. Adsorption of allelopathic compounds by wood-derived charcoal: the role of wood porosity. **Plant and Soil**, Berlin, v. 272, n. 1, p. 291-300, 2005.

KOGA, M.E.T. Matérias-primas fibrosas. In: PHILIP, P.; ALMEIDA, M.L.O. (Ed.). **Celulose e papel: tecnologia da fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: IPT; SENAI, 1988. v. 1, p. 15-44.

KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ, W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 592 p.

KUMAR, M.; GUPTA, R.C. Scanning electron microscopic study of acacia and eucalyptus wood chars. **Journal of Materials Science**, New York, v. 30, n. 2, p. 544-551, jan. 1995.

KWON, S.M.; KIM, N.H.; CHA, D.S. An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization. **Wood Science and Technology**, New York, v. 43, n. 5/6, p. 487-498, 2009.

LIMA, C.K.P.; MORI, F.A.; MENDES, L.M.; CARNEIRO, A.C.O. Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 123-129, abr./jun. 2007.

LIMA, I.L.; LONGUI, E.L.; SANTINI Jr., L.; GARCIA, J.N.; FLORSHEIM, S.M.B. Effect of fertilization on cell size in wood of *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 465-472, out./dez. 2010.

LORENZI, H.; SOUZA, H.M.; TORRES, M.A.V.; BACHER, L.B. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Plantarum, 2003. 173 p.

MARTÍNEZ-CABRERA, H.; ESTRADA-RUIZ, E.; CASTAÑEDA-POSADAS, C.; WOODCOCK, D. Wood specific gravity estimation based on wood anatomical traits: Inference of key ecological characteristics in fossil assemblages. **Review of Palaeobotany and Palynology**, Amsterdam, v.187, p. 1-10, 2012.

- MARTINI, A.J. **O plantador de eucaliptos: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade.** 2004. 320 p. Dissertação (Mestrado em História Social) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- MASSERANN, C.; MARIAUX, A. Anisotropic de retrait et structure du bois. Recherche de l'influence des caracteres morphologiques transverses des fibres. **Bois et Forêts des Tropiques**, Montpellier, n. 209, p. 35-47, 1985.
- MEGRAW, R.A. **Wood quality factors in loblolly pine.** Atlanta: TAPPI Press, 1985. 89 p.
- MIRANDA, I.; ALMEIDA, M.H.; PEREIRA, H. Influence of provenance, subspecies and site on wood density in *Eucalyptus globulus* labill. **Wood and Fiber Science**, Monona, v. 33, p. 9-15, 2001.
- MOREIRA, W.S. **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira.** 1999. 107 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.
- MOTA, F.C.M. **Análise da cadeia produtiva do carvão vegetal oriundo de *Eucalyptus* sp. no Brasil.** 2013. 169 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- MOTHE, F.; SCIAMA, D.; LEBAN, J.M.; NEPVEU, G. Localisation de la transition bois initial - bois final dans un cerne de chêne par analyse microdensitométrique. **Annales des Sciences Forestières**, Champenoux, v. 4, n. 55, p. 437-449, 1998.
- MOUTINHO, V.H.P. **Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão.** 2013. 164 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- MUÑIZ, G.I.B.; NISGOSKI, S.; FRANÇA, R.F.; SCHARDOSIN, F.Z. Anatomia comparativa da madeira e carvão de *Cedrelinga catenaeformis* Ducke e *Enterolobium schomburgkii* Benth. para fins de identificação. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 94, p. 291-297, jun. 2012a.
- MUÑIZ, G.I.B.; NISGOSKI, S.; SHARDOSIN, F.Z.; FRANÇA, R. Anatomia do carvão de espécies florestais. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 471-477, jul./set. 2012b.
- NEVES, T.A.; PROTÁSIO, T.P.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, V.O.; VIEIRA, C.M.M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319, maio 2011. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/275/231>>. Acesso em: 10 jul. 2013.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G.I.B.; FRANÇA, R.F.; RODRIGUES, F.; BATISTA, R. Anatomia do lenho carbonizado de *Copaifera* cf. *langsдорffii* Desf. e *Dipteryx odorata* (Aubl.) Wild. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 3, n. 2, p. 66-79, nov. 2012.

NUGROHO, W.D.; MARSOEM, S. N.; YASUE, K.; FUJIWARA, T.; NAKAJIMA, T.; HAYAKAWA, M.; NAKABA, S.; YAMAGISHI, Y.; JIN, H.-O; KUBO, T.; FUNADA, R. Radial variations in the anatomical characteristics and density of the wood of *Acacia mangium* of five different provenances in Indonesia. **Japan Wood Research Society**, Tokyo, v. 58, p. 185-194, 2012.

OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; ALMEIDA, W.; CORRADI, P.; CARDOSO, M.T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B.R.; VALENTE, O.F.; GOMIDE, J.L. Efeito da qualidade da madeira sobre o rendimento e qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 13, n. 1, p. 85-97, 1989.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B.R.; PIMENTA, A.S.; DELLA LUCIA, R.M.; LADEIRA, A.M.M.; CARNEIRO, A.C.O. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (willd.) poir. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.

OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A.; ALMEIDA, M.R. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão vegetal**: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade. Belo Horizonte, 1982. p. 62-102.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 2 v. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo: USP, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1998. 52 p. (Boletim Técnico, 194).

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; SIMÕES, J.W.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1-avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 113-124, dez. 1999.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Text book of wood technology**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1970. 705 p.

PÁSZTOR, Y.P.C. Teste internacional de procedências de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 207-214, dez.1990.

PAULA, J.E.; SILVA JÚNIOR, F.G.; SILVA, A.P.P. Caracterização anatômica de madeiras nativas de matas ciliares do Centro-Oeste brasileiro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 58, p. 73-89, 2000.

PEREIRA, B.L.C.; OLIVEIRA, A.C.; CARVALHO A.M.M. L.; CARNEIRO, A.C.O. SANTOS, L.C.; VITAL, B.R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, Cairo, v. 2012, 8 p., 2012.

PEREIRA, B.L.C.; OLIVEIRA, A.C., CARVALHO, A.M.M. L.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; SANTOS, L.C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 217-225, jun. 2013.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p.

PIMENTA, A.S.; BARCELLOS, D.C. **Curso de atualização em carvão vegetal**. Viçosa, UFV, 2000. 76 p.

PINHEIRO, P.C.C.; VIANA, E.; REZENDE, M.E.A.; SAMPAIO, R.S. **A produção de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 2006. 103 p.

POLGE, H. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants: applications dans les domaines technologique et physiologique. **Annales des Sciences Forestières**, Paris, v. 23, n. 1, p. 1-206, 1966.

POUBEL, D.S.; GARCIA, R.A.; LATORRACA, J.V.F.; CARVALHO, A.M. Estrutura anatômica e propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 2, p. 117-126, 2011.

PROTÁSIO, T.P.; TRUGILHO, P.F.; NEVES, T.A.; VIEIRA, C.M.M.V. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, set. 2012.

PROTÁSIO, T.P.; SANTANA, J.D.P.; GUIMARÃES NETO, R.M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J.B.; TRUGILHO, P.F.; BISPO, I.B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011.

QUINTEK MEASUREMENT SYSTEMS. **QMS Tree Ring Analyzer Model QTRS-01X**: users guide. Knoxville, 1999. 72 p.

REZENDE, M.A.; SAGLIETTI, J.R.; CHAVES, R. Variação da massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade em função de diferentes níveis de produtividade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 53, p. 71-78, 1998.

ROCHA, F.T.; FLORSHEIM, S.M.B.; COUTO, H.T.Z. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden aos sete anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, jun. 2004.

ROCHA, G.N.; GONÇALVES, J.L.M.; MOURA, I.M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 623-629, jul./ago. 2004.

ROCHA, J.D. **O carvão vegetal no Brasil e a produção de aço verde**. Disponível em: < <http://www.embrapa.gov.br/imprensa/artigos/2011/o-carvao-vegetal-no-brasil-e-a-producao-de-aco-verde/>>. Acesso em: 02 abr. 2013.

ROCHA, M.F.V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

SAMPAIO, R.S. **Conversão da biomassa em carvão vegetal: situação atual com tendências 2025**. Belo Horizonte: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. 14 p.

SANTOS, I.D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SANTOS, R.C.; CARNEIRO, A.C.O.; CASTRO, A.F.M.; CASTRO, R.V.O.; BIANCHE, J.J.; CARDOSO, M.T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SANTOS JUNIOR, A.D. **Possibilidades e impactos da ampliação da siderurgia a carvão vegetal oriundo de florestas plantadas no Brasil**. 2011. 177 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Wood structure and environment**. Berlin: Springer, 2007. 279 p.

_____. Microtome sections of charcoal. **IAWA Journal**, Leiden, v. 33, n. 3, p. 327-328, 2012.

SCHWEINGRUBER, F.H.; BORNER, A.; SCHULZE, E.D. **Atlas of woody plant stems**. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 229 p.

SENF, J.F.; BENDTSEN, B.A.; GALLIGAN, W.L. Weak wood. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 83, p. 476-485, 1985.

SETTE JUNIOR, C.R. **Aplicação de potássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.** 2010. 153 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SETTE JUNIOR, C.R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C.T.S.; CHAGAS, M.P.; LACLAU, J.P. Efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill, aos 24 meses de idade. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 3, p. 535-546, 2009.

SEVERO, E.T.D.; CALONEGO, F.W.; SANSÍGOLO, C.A. Composição química da madeira de *Eucalyptus citriodora* em função das direcções estruturais. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 14, n. 1, p. 113-126, 2006.

SHASHIKALA, S.; VIJENDRA RAO, R. Radial and axial variation in specific gravity and anatomical properties of plantation grown *Eucalyptus citriodora* Hook. **The Journal of the Institute of Wood Science**, London, v. 19, n. 2, p. 84-90, 2009.

SHIMOYAMA, V.R.S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* spp.** 1990. 93 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SILVA, D.A. da; TRUGILHO, P.F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se a metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 56-65, 2003.

SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira.** 2002. 179 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, J.C.; OLIVEIRA, J.T.S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 233-239, abr. 2003.

SILVA, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J.T.S.; CASTRO, V.R. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1081-1090, 2007.

SILVA, J.C.; OLIVEIRA, J.T.S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JR., S.; MATOS, J.L.M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, jan./abr. 2004.

SILVESTRE, M.M.; TORRES, C.F. **Contribución al conocimiento tecnológico de la madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus urophylla* S.T Blake proveniente de plantaciones forestales comerciales de 7 años de edad de las Choapas**, 2003. 119 p. Tesis (Mestrado em Engenharia Forestal Industrial) - Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, 2003.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/estatisticas.htm>>. Acesso em: 02 abr. 2013.

SOUSA JÚNIOR, W.P. **Propriedades físicas, mecânicas e anatômicas das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* e de *Eucalyptus urophylla* oriundas dos municípios de Turmalina e de Paraopeba (MG)**. 2004. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

SOUZA, A.P.; DELLA LUCIA, R.M.; RESENDE, G.C. Estudo da densidade básica da madeira de *Eucalyptus microcorys* F. Muell, cultivado na região de Dionísio, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 3, n. 1, p. 16-27, 1979.

STEPPE, K.; CNUUDE, V.; GIRARD, C.; LEMEUR, R.; CNUUDE, J.P.; JACOBS, P., Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. **Journal of Structural Biology**, Amsterdam, v. 148, n. 1, p. 11-21, 2004.

TAVARES, D.R.; FERREIRA, A.T.B.; HENRIQUES, E.P.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp e de *Corymbia* sp "in natura" e carbonizada por densitometria de raios X. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 20., 2012, Pirassununga. **Anais...** Pirassununga: USP, 2012. p. 1-2.

TAZROUT, M.; ABADLIA, M.T.; MOTHE, F. Étude de la récupération du collapse par microdensitométrie avec du bois d'*Eucalyptus camaldulensis* Dehn provenant de Beghla en Algérie. **Bois et Forêts des Tropiques**, Montpellier, n. 312, p. 63-75, 2012.

THOMAS, D.S.; MONTAGU, K.D.; CONROY, J.P. Changes in wood density of *Eucalyptus camaldulensis* due to temperature - the physiological link between water viscosity and wood anatomy. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 157-165, 2004.

THOMAS, R.J. The characteristics of juvenile wood. In: SYMPOSIUM ON UTILIZATION CHANGES ON WOOD RESEARCH SOUTH US, 1985. **Proceedings...** Raleigh: North Carolina State University, 1985. p. 1-18.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **Circular IPEF**, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, abr.1985.

_____. Variação radial da densidade básica em estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides*. **Circular IPEF**, Piracicaba, n. 36, p. 35-42, ago.1987.

_____. **Formação e anatomia da madeira: exercícios práticos.** Piracicaba: ESALQ, 2002. 76 p.

_____. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis x urophylla*.** 2006. 135 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M.P.; OLIVEIRA, J.T.S.; BALLARIM, A.W.; BENJAMIN, C.A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalypt Wood. **Maderas: Ciência y Tecnología**, Concepción, v. 10, n. 2, p.139-14975, 2008.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C.R.; MELO, R.R.; STANGERLIN, D.M.; BELTRAME, R.; GATTO, D.A.; CALEGARI, L. Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 553-559, jul./set. 2008.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 1-15, 1996.

_____. Influência da idade nas características do eucalipto. **Revista da Madeira**, Brasília, n. 92, p. 82-88, out. 2005.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

TRUGILHO, P.F.; VITAL, B.R.; REGAZZI, A.J.; GOMIDE, J.L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.

TRUGILHO, P.F.; SIVAL, J.R.M.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M.; MENDES, L.F.B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial da amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, jan./jun. 2005.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties and utilization.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

VALE, A.T.; DIAS, I.S.; SANTANA, M.A.E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n.1, p. 137-145, jan./mar. 2010.

VALENTE, A.F.; LELLES, J.G. Carbonização da madeira de *Eucalyptus*. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, n. 141, p. 74-79, 1986.

VALVERDE, S.R.; SOARES, N.S.; SILVA, M.L.; JACOVINE, L.A.G.; NEIVA, S.A. O comportamento do mercado da madeira de Eucalipto no Brasil. **Biomassa & Energia**, Itu, v. 1, n. 4, p. 393-403, 2004.

VEENIN, T.; FUJITA, M.; NOBUCHI, T.; SIRIPATANADILOK, S. Radial variations of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. **IAWA Journal**, Leiden, v. 26, n.3, p. 353-361, 2005.

VILAS BÔAS, O.; MAX, J.C.M.; MELO, A.C.G. Crescimento comparativo de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* no município de Marília, SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 63-72, jun. 2009.

VITAL, B.R.; TRUGILHO, P.F. Variação dimensional e uso da madeira de *Eucalyptus*. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 18, n.186, p. 57-61, 1997.

VITAL, M.H.; PINTO, M.A. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 30, p. 237-297, 2009.

ZOBEL, B.J.; TALBERT, J. **Applied forest tree improvement**. New York: Wiley, 1984. 511 p.

ZOBEL, B.J.; VAN BUIJTENEN, J.P. **Wood variation: its causes and control**. New York: Springer-Verlag, 1989. 363 p.

ZOBEL, B.J.; KELLISON, R.C.; MATHIAS, M.F.; HATCHER, A.V. **Wood density of the southern pines**. Raleigh: North Carolina Agricultural Experiment Station, 1972. 56 p. (Technical Bulletin, 208).

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório síntese do Balanço Energético Nacional 2013**. Brasília, 2013. 55 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2013.

DAVIDSON, J. **Variation, association and inheritance of morphological and wood characters in an improvement programme for *Eucalyptus deglupta* Blume**. 1972. 263 p. Thesis (Doctor in Philosophy) - Australian University, Canberra. 1972.

DOWNES, G.M.; HUDSON, I.; RAYMOND, C.; DEAN, G.; MICHELL, A.; SCHMILECK, L.; EVANS, R.; MUNERI, A. **Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties**. Collingwood: CSIRO, 1997. 144 p.

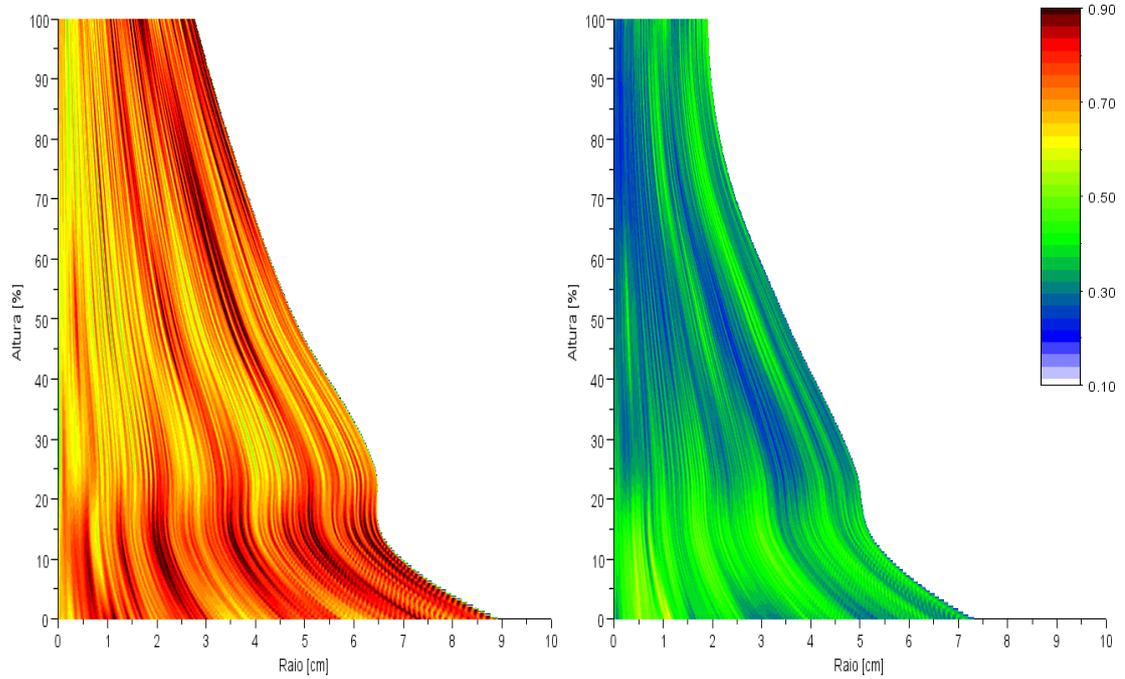
FERREIRA, A.T.B. **Caracterização da estrutura anatômica do lenho, dos anéis de crescimento e dos canais de resina de árvores de *Pinus caribaea* var *hondurensis* Barr. et. Golf**. 2009. 83 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PHILLPOTTS, E. **A shadow passes**. New York: Macmillan, 1919. 76 p.

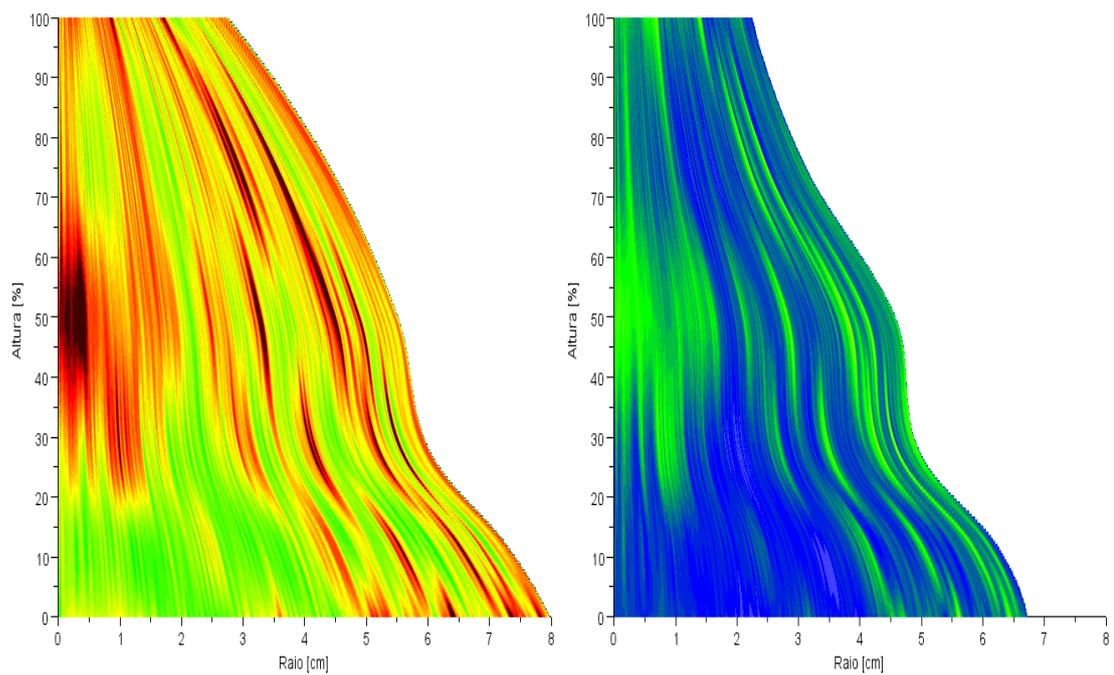
ANEXOS

ANEXO A – Gráficos de densidade aparente (g/cm^3) ao longo do tronco (madeira a esquerda e carvão a direita – 1 raio)

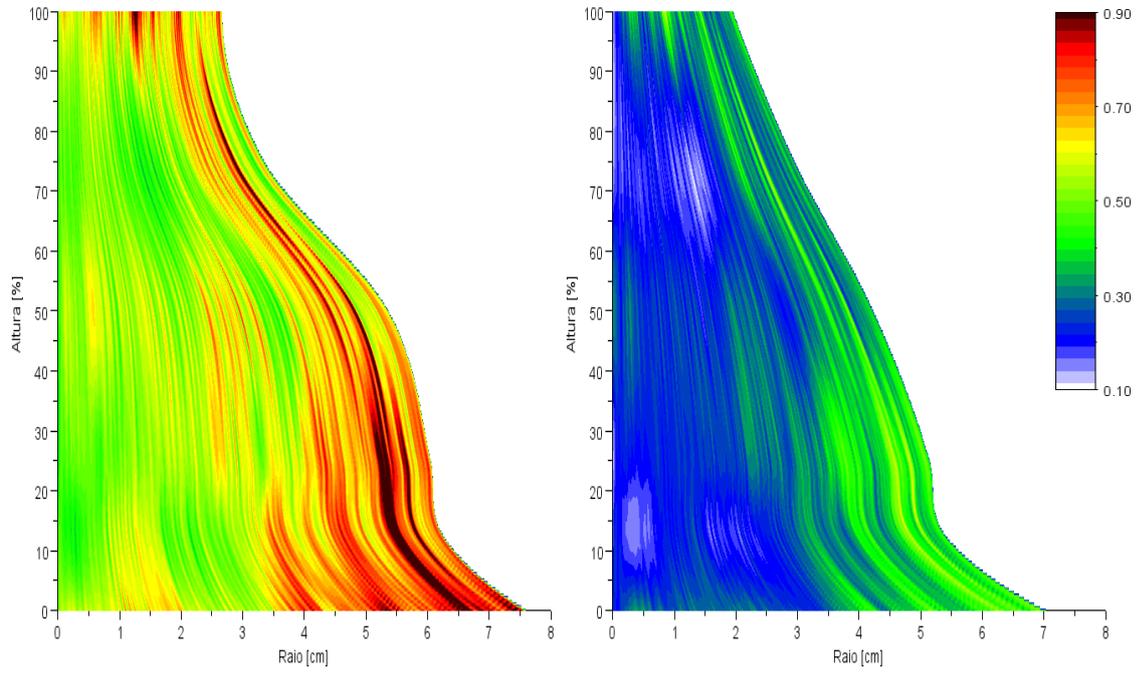
Clone 2



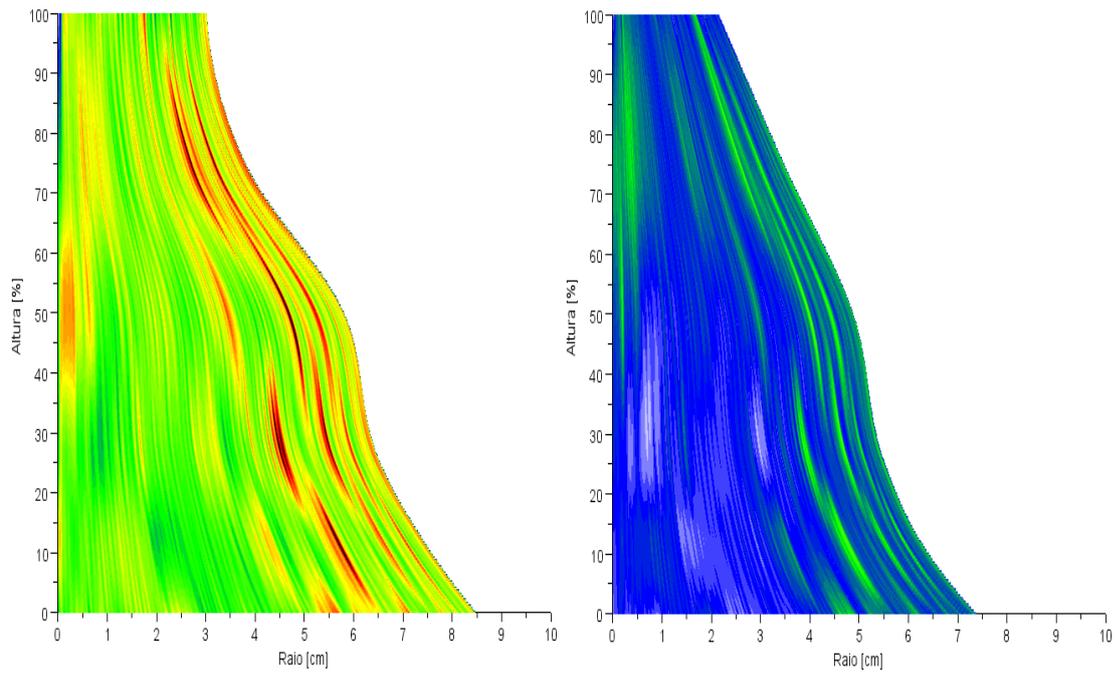
Clone 4



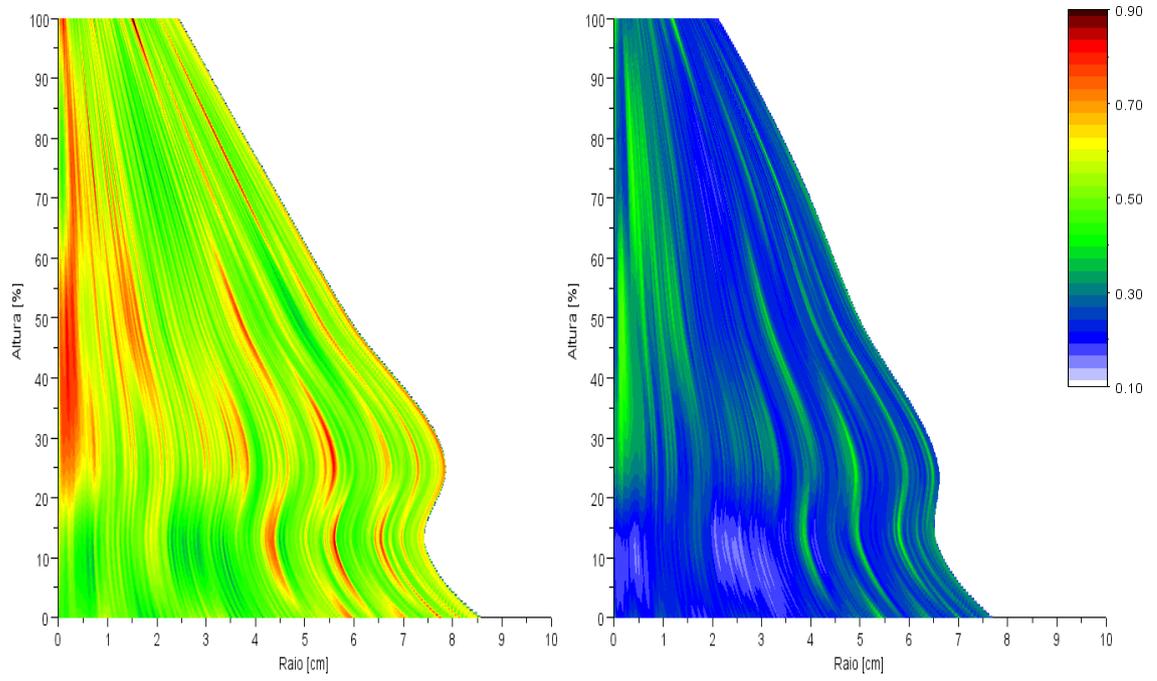
Clone 5



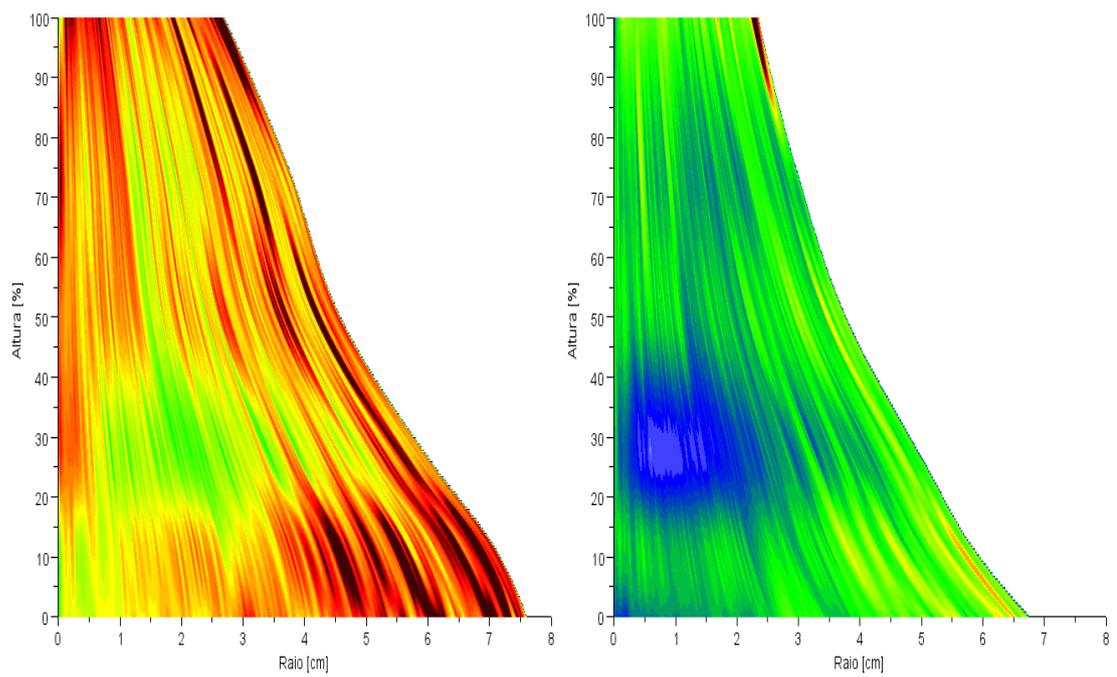
Clone 6



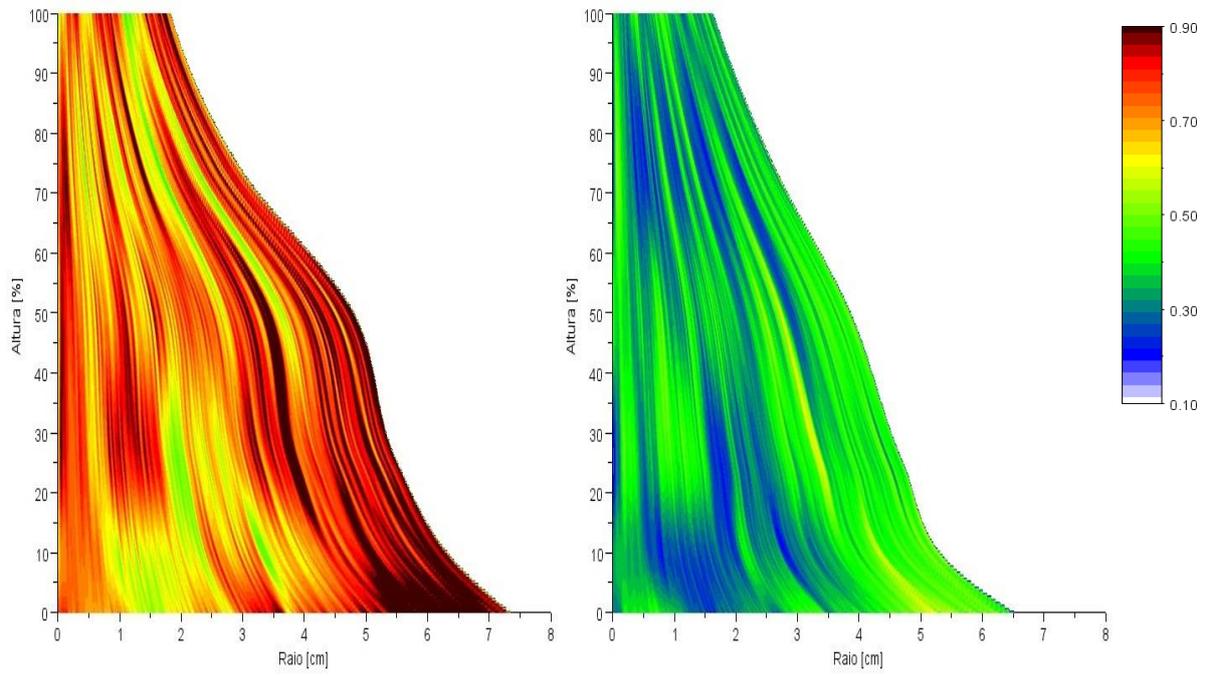
Clone 8



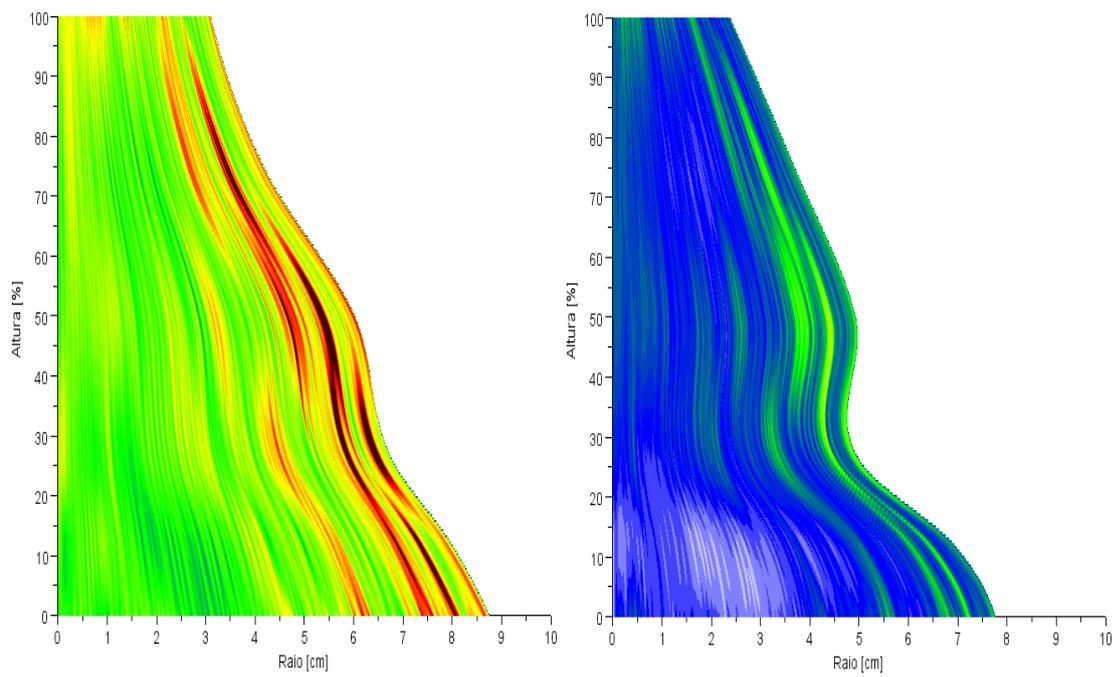
Clone 9



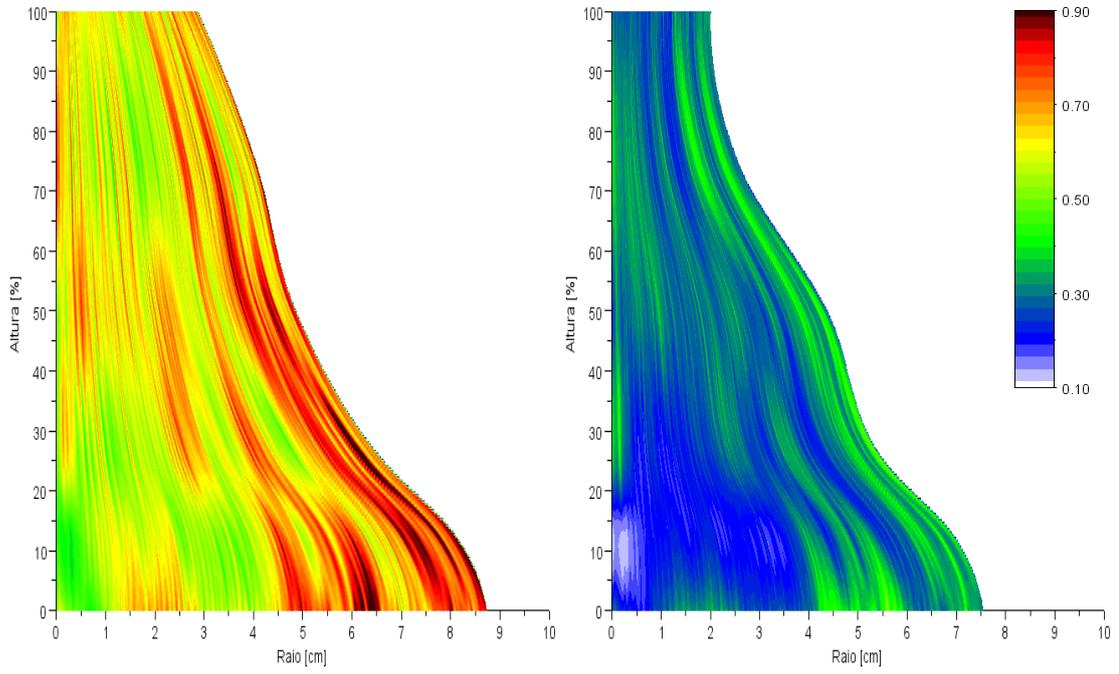
Clone 10



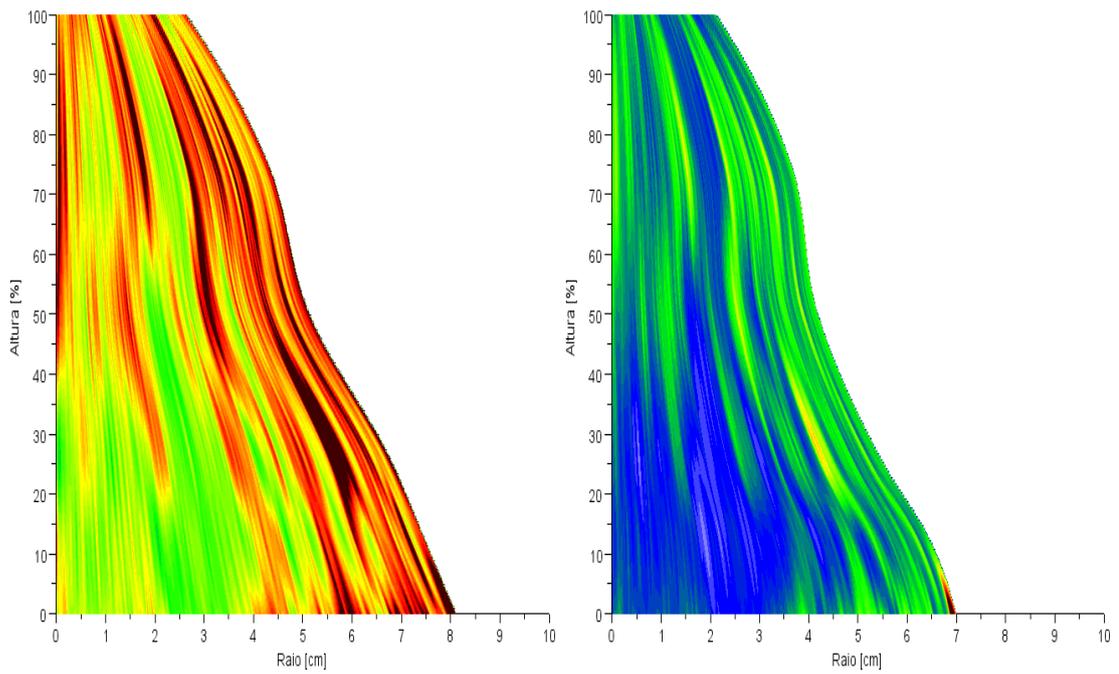
Clone 11



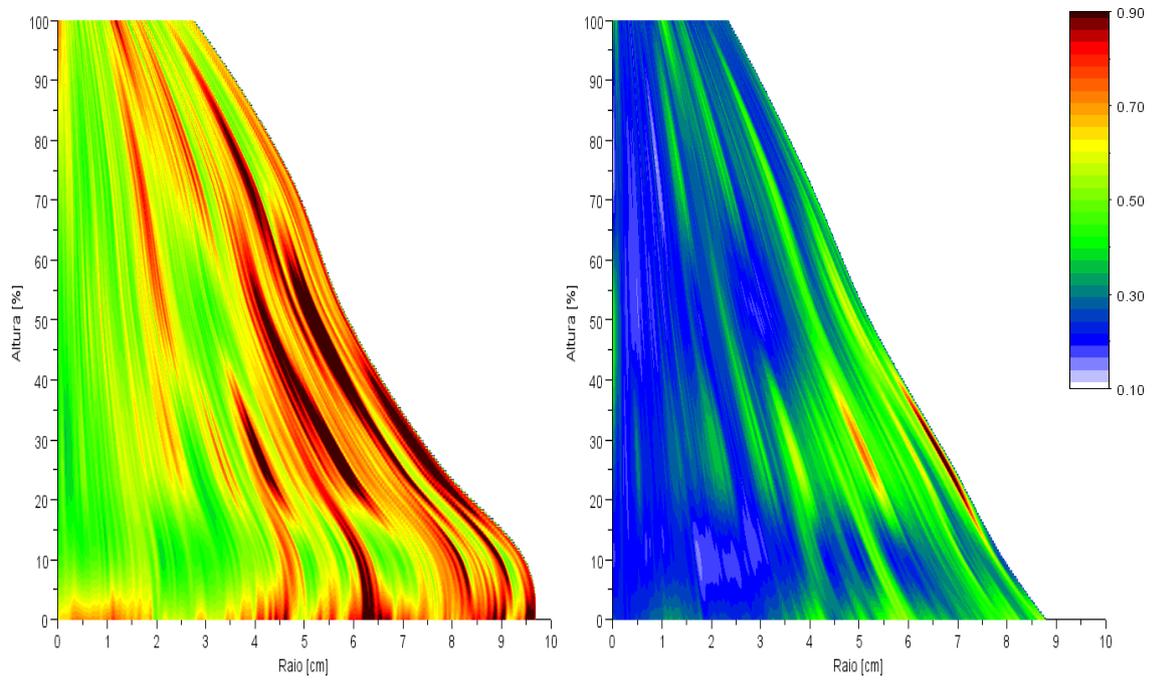
Clone 12



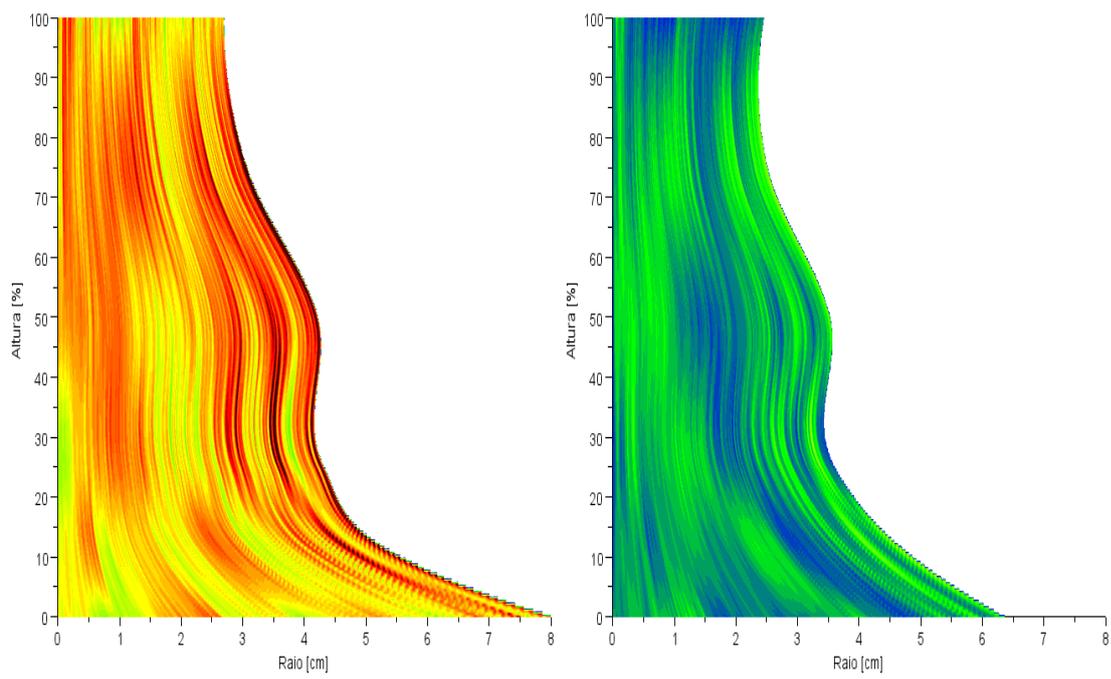
Clone 14



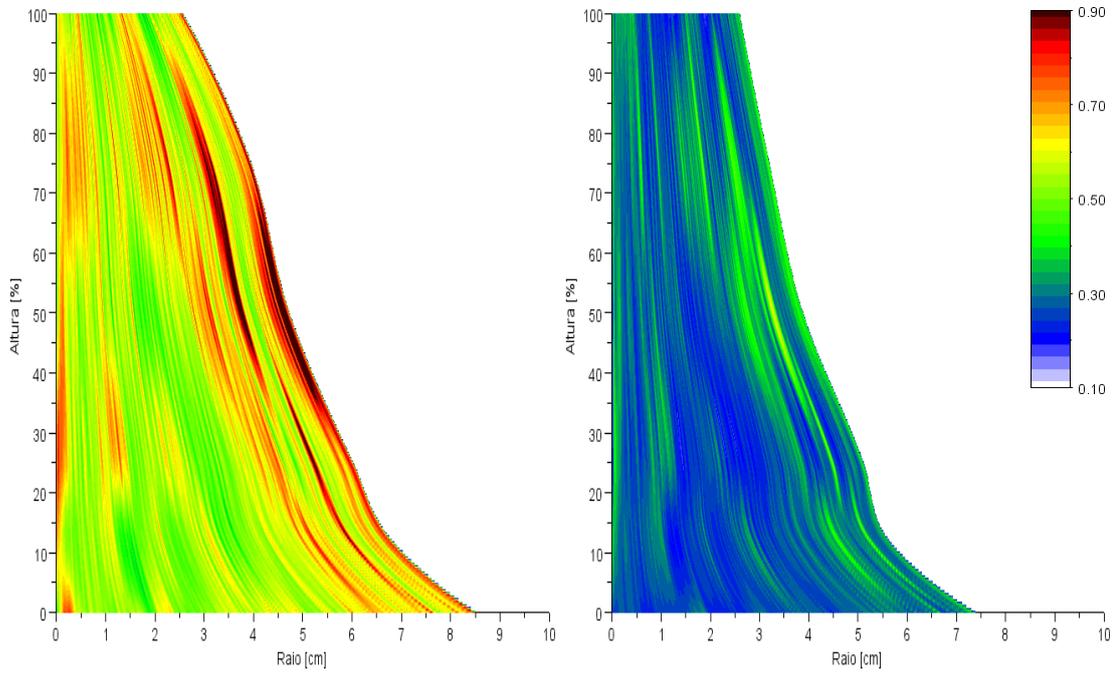
Clone 15



Clone 17



Clone 18



Clone 19

