

FILIPE VALADÃO DO PRADO CACAU

**INTERAÇÃO ARRANJO ESPACIAL DE PLANTIO E CLONES DE  
EUCALIPTO: CRESCIMENTO E DENSIDADE DE MADEIRA POR IMAGENS  
DIGITAIS DE RAIOS X**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2019

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C118i  
2019  
Cacau, Filipe Valadão do Prado, 1981-  
Interação arranjo espacial de plantio e clones de eucalipto:  
crescimento e densidade de madeira por imagens digitais de  
raios X / Filipe Valadão do Prado Cacau. – Viçosa, MG, 2019.  
x, 80f.: il. (algumas color.).

Orientador: Geraldo Gonçalves dos Reis.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2019.  
Inclui bibliografia.

1. Florestas - Espaçamento. 2. Clonagem. 3. Eucalipto.  
4. Produtividade. 5. Florestas - Medição. 6. Eucalipto -  
Distribuição geográfica. 7. Madeira - Densidade. 8. Imagens  
digitais. I. Reis, Geraldo Gonçalves dos, 1949-. II. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal.  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.923243

FILIPPE VALADÃO DO PRADO CACAU

**INTERAÇÃO ARRANJO ESPACIAL DE PLANTIO E CLONES DE  
EUCALIPTO: CRESCIMENTO E DENSIDADE DE MADEIRA POR IMAGENS  
DIGITAIS DE RAIOS X**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2019.

---

Marco Antonio Monte

---

Carlos Henrique Rodrigues de  
Oliveira

---

Maria das Graças Ferreira Reis  
(Coorientadora)

---

Helio Garcia Leite

---

Geraldo Gonçalves dos Reis  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua bondade e justiça.

À minha esposa Maressa, pela dedicação e todo amor empreendido até aqui, e por ser um exemplo de diligência em tudo que se propõe a realizar.

Aos meus amados filhos Tito e João, vocês são o motivo de tudo.

Aos meus pais Geraldo Cacau da Costa e Kátia Martins Valadão Cacau, por todo amor com que cuidaram de mim, e por terem me ensinado princípios tão valiosos.

À minha irmã Débora Valadão Cacau, pelo carinho e companheirismo ao longo de todos os anos.

A Jessé do Prado e Elisabeth Rocha do Prado, pela amizade e pelo exemplo de que são.

A todos meus familiares, em especial a vovó Cléo, Juju e família.

Aos professores Geraldo Gonçalves dos Reis e Maria das Graças Ferreira Reis, por todos os ensinamentos e grande amizade.

Ao professor Helio Garcia Leite, pela amizade, ajuda no desenvolvimento deste trabalho, e por ser um exemplo de profissional a ser seguido.

Ao professor Vinícius Resende de Castro, pela orientação e pelas contribuições valiosas na área da tecnologia da madeira.

Aos professores Marco Antonio Monte e Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira, pelas correções e contribuições indispensáveis na melhoria deste trabalho.

Ao professor Raul Guedes do departamento de entomologia pelo apoio e parceria na utilização do equipamento de raios X digital.

Em especial a Gláucio e Karen, que são grandes irmãos que encontrei nesta vida.

A Sérgio e Fabiana, pela amizade, mas principalmente por serem um exemplo de integridade, caráter e coragem em tudo que fazem. Vocês são uma fonte de inspiração.

A todos os amigos, Moises e Lilian, Fabão, Daniel, Polly e família, Millerson e Débora, Leozinho e Renatinha, Aldo e Nina, Andrezão, Marco Túlio e Marquione, Kalebe, Flávio e Jader.

À equipe de estudantes do Laboratório de Ecologia e Fisiologia Florestal do Departamento de Engenharia Florestal, pela amizade, confiança, pelo auxílio e esforço na coleta e no processamento dos dados, em especial a Ronan, Jônio, Diogo, Junio, Thales, Rodolfo, Cátia e Lydiane e, aos que passaram por este laboratório: Henrique, Marco, Ivan, Carlos Henrique, Jonathan, Luciana, Mila, Juvenal, Sumami, Felipe, Ernani, Hortênsia, Diêgo, Felipe e Cristina.

Aos colegas e funcionários do Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira (LPM), especialmente ao Vadinho e Paulinho.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal.

À Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Campus Aquidauana, especialmente aos colegas Edilson, Adriana, Natascha, Cristiane e Norton.

À KLABIN S.A. pelo apoio na realização da presente pesquisa, em especial, ao Gerente de Pesquisa e Qualidade Florestal Mário César Gomes Ladeira e, aos engenheiros Marco Aurélio Figura e Regiane Abjaud Estopa.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal (Chiquinho, Alexandre e Dilson). A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## BIOGRAFIA

Filipe Valadão do Prado Cacau, filho de Geraldo Cacau da Costa e Kátia Martins Valadão Cacau, nasceu em Ipatinga, Minas Gerais, em 27 de outubro de 1981.

Em março de 2000 ingressou no curso de Administração de Empresas na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, mas no ano de 2002 transferiu-se para o curso de Engenharia Florestal na mesma instituição, onde obteve o título de Engenheiro Florestal em outubro de 2006.

Em outubro de 2006 iniciou o Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, área de Silvicultura, na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, sob orientação do professor Geraldo Gonçalves dos Reis, concluindo os requisitos indispensáveis para obtenção do título de *Magister Scientiae* em abril de 2008.

Em agosto de 2008 foi admitido pela empresa Plantar S.A. para atuar no cargo de analista florestal, onde permaneceu até abril de 2011.

Em maio de 2011 ingressou na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul atuando como professor efetivo de dedicação exclusiva nesta instituição.

No mês de agosto de 2015 se afastou em tempo integral da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul para qualificação em nível de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, sob orientação do professor Geraldo Gonçalves dos Reis, concluindo os requisitos indispensáveis para obtenção do título de *Doctor Scientiae* em fevereiro de 2019.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
INTRODUÇÃO .....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	2
CAPÍTULO I .....	6
INTERAÇÃO ENTRE ARRANJO ESPACIAL DE PLANTIO E CLONES DE EUCALIPTO NO SUL DO BRASIL: EFEITO NO CRESCIMENTO .....	6
RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
1. INTRODUÇÃO .....	8
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	10
2.1. Descrição da Área de Estudo .....	10
2.2. Instalação do experimento .....	10
2.3. Altura total e volume individual .....	11
2.4. Crescimento e produção .....	12
3. RESULTADOS .....	13
4. DISCUSSÃO .....	20
5. CONCLUSÕES .....	23
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	24
CAPÍTULO II .....	29
DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS DE CLONES DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ARRANJOS ESPACIAIS .....	29
RESUMO .....	29
ABSTRACT .....	30
1. INTRODUÇÃO .....	31
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	32
2.1. Descrição da Área de Estudo .....	32

2.2. Instalação do experimento.....	32
2.3. Modelagem da distribuição de diâmetros .....	33
2.4. Avaliação da redistribuição teórica de diâmetros .....	34
3. RESULTADOS .....	35
4. DISCUSSÃO .....	41
5. CONCLUSÕES .....	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
CAPÍTULO III.....	48
DENSIDADE DA MADEIRA RADIAL E LONGITUDINAL POR IMAGENS DIGITAIS DE RAIOS X: CLONES DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ARRANJOS ESPACIAIS .....	48
RESUMO .....	48
ABSTRACT.....	49
1. INTRODUÇÃO .....	50
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	51
2.1. Descrição da Área de Estudo .....	51
2.2. Seleção e abate de árvores e coleta de amostras do tronco.....	52
2.3. Determinação das propriedades físicas do lenho .....	53
3. RESULTADOS.....	55
4. DISCUSSÃO .....	69
5. CONCLUSÕES .....	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
CONCLUSÕES GERAIS .....	80

## RESUMO

CACAU, Filipe Valadão do Prado, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Interação arranjo espacial de plantio e clones de eucalipto: crescimento e densidade da madeira por imagens digitais de Raios X.** Orientador: Geraldo Gonçalves dos Reis. Coorientadores: Maria das Graças Ferreira Reis e Vinícius Resende de Castro.

O crescimento, a distribuição de diâmetros e as densidades aparente (*DA*) e básica (*DBM*) da madeira foram avaliados para clones de eucalipto em diferentes arranjos espaciais. Os clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (A, B) e de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* (C, D) foram estabelecidos em três arranjos espaciais (3,75 x 2,40 m; 6,00 x 1,50 m e 4,00 x 3,00 m). A altura (*Ht*) e o diâmetro (*dap*) foram mensurados entre 27 e 88 meses, a cada 12 meses, em 430 parcelas permanentes (418-611 m<sup>2</sup>). As variáveis do povoamento foram estimadas pelo modelo de Gompertz. Os parâmetros da função Weibull foram correlacionados com características do povoamento no modelo de predição. No modelo de projeção, os parâmetros da distribuição de diâmetros, em idade futura (variável dependente), foram obtidos a partir desses parâmetros em idade atual (variável independente). Aos 92 meses de idade, as *DA* e *DBM* foram avaliadas no sentido radial e longitudinal do tronco a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (diâmetro de 8 cm) e, também, a 1,3 m de altura, pelos métodos de imagens digitais de raios X (*IDRX*) e de imersão (*I*). Aos 7 anos, a altura total e o diâmetro foram maiores para o clone B no arranjo espacial 4,00 x 3,00 m. A redução da distância entre árvores na linha de plantio (6,00 x 1,50 m), ou seja, maior retangularidade, resultou em *dap* menor do que nos demais arranjos. O volume por árvore foi maior no arranjo 4,00 x 3,00 m para todos os clones, porém o clone B, no arranjo espacial 3,75 x 2,40 m, apresentou a maior produtividade. A idade técnica de corte variou entre 54 e 82 meses, e foi menor nos tratamentos que apresentaram maior idade de máximo incremento corrente anual. Aos 84 meses de idade, foi observado maior número de árvores nas maiores classes de diâmetro no espaçamento mais amplo (12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>). O clone B apresentou a maior amplitude de distribuição de diâmetros em cada idade e o clone D apresentou a menor amplitude. A *DA* média a 25% da altura comercial das árvores, para os clones A, B e C foi de 0,65, 0,59 e 0,66 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente. A *DBM* foi maior ( $p \leq 0,05$ ) para o clone C (0,53 g cm<sup>-3</sup>), seguido pelos clones A (0,48 g cm<sup>-3</sup>) e B (0,45 g cm<sup>-3</sup>). A densidade básica da casca variou de 0,23 a 0,25 g cm<sup>-3</sup>. Os resultados permitem inferir que arranjos espaciais de plantio com maior retangularidade devem ser evitados, pois resultam em

menor produtividade e diâmetro. A função Weibull mostrou-se adequada para descrever a distribuição de diâmetros de clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais e, os modelos de projeção e predição geraram estimativas consistentes e precisas. De forma geral, a *DA* e a *DBM* apresentaram tendência de aumento no sentido base-topo e medula-casca. A *IDRX* se mostrou adequada para avaliar a variação da densidade entre clones e arranjo espacial, além de gerar informações qualitativas do lenho (fissuras, excentricidade da medula, podridão e anéis de coloração escura).

## ABSTRACT

CACAU, Filipe Valadão do Prado, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Tree planting spatial arrangement and eucalyptus clones interactions: growth and density of wood by digital image X-ray.** Adviser: Geraldo Gonçalves dos Reis. Co-Advisers: Maria das Graças Ferreira Reis and Vinícius Resende de Castro.

Growth, diameter distribution, and the wood apparent (*AD*) and basic (*BD*) densities were evaluated for the hybrid clones of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (A, B) and *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* (C, D) established in 3.75 x 2.40 m, 6.0 x 1.5 m 4.0 x 3.0 m planting arrangements. The total height (*Ht*) and diameter (*dbh*) were measured between 27 and 88 months, every 12 months, in 430 permanent plots (418-611 m<sup>2</sup>). The stand variables were estimated by the Gompertz model. The Weibull function parameters were correlated with stand characteristics in the prediction models and, in the projection model. The parameters of the diameter distribution in a future age (dependent variable) were obtained from the present age parameters (independent variable). The *AD* and *BD* were evaluated in the radial and longitudinal directions of the trunk at 0, 25, 50, 75 and 100% of the commercial height, and at 1.3 m height, by the methods of digital image X-ray (*IDRX*) and immersion (*I*), at the age of 92 months. At seven years, *Ht* and *dbh* were higher for clone B in the planting arrangement 4.00 x 3.00 m. The reduction of the distance between trees in the planting line (6.00 x 1.50 m) resulted in smaller *dbh* in relation to the arrangement 3.75 x 2.40 m, both with 9 m<sup>2</sup> per plant, as the result of increasing rectangularity. The volume per tree was the largest in the 4.00 x 3.00 m arrangement for all clones. Clone B showed the highest productivity in the planting arrangement of 3.75 x 2.40 m. The tree harvesting age varied between 54 and 82 months, being lower in the treatments with a greater age of maximum annual increment. The results demonstrated that the Weibull function describes the diameter distribution for eucalypt clones, in different planting arrangements. In addition, the prediction and projection models generated consistent and accurate estimates. At 84 months of age, a larger number of trees were observed in the largest diameter classes in the widest spacing (12 m<sup>2</sup> tree<sup>-1</sup>). Clone B presented the largest amplitude of the diameter distribution at each age, and clone D presented the smallest amplitude. The *AD* at 25% of the tree commercial height, for clones A, B, and C were 0.65, 0.59, and 0.66 g cm<sup>-3</sup>, respectively. The *BD* was higher ( $p \leq 0.05$ ) for clone C (0.53 g cm<sup>-3</sup>), followed by clones A (0.48 g cm<sup>-3</sup>) and B (0.45 g cm<sup>-3</sup>). The bark basic density ranged from 0.23 to 0.25 g cm<sup>-3</sup>. The results allow inferring that the tree planting arrangements with greater rectangularity should be

avoided, as they result in lower productivity and diameter. The Weibull function proved to be adequate to describe the diameter distribution of eucalypt clones in different planting arrangements. The prediction and projection models generated consistent and accurate estimates. In general, the *AD* and *BD* showed a tendency to increase in the base-top and pith-bark directions. The *IDRX* was adequate to evaluate the variation of density between clones and planting arrangements, besides generating qualitative information of the wood, such as fissures, pith excentricity, rot and dark colored rings.

## INTRODUÇÃO

O Brasil possui 5,6 milhões de hectares de eucalipto, totalizando 72% da área plantada com espécies arbóreas no País; desses, 34% com eucalipto (IBÁ, 2017). Os produtos extraídos desses plantios florestais têm grande relevância para os mercados interno e externo. Tem chamado à atenção, também, o avanço expressivo na produtividade de plantios de eucalipto, principalmente nas últimas décadas. Entre 1970 e 1990, os plantios de eucalipto no Brasil apresentavam produtividade média abaixo de  $26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (FANTUZZI NETO, 2012; GONÇALVES et al., 2013). Esta produtividade média nacional cresceu substancialmente, tendo atingido  $36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , em 2016 (IBÁ, 2017).

A produtividade de povoamentos florestais depende do genótipo, da capacidade produtiva do sítio, do preparo do solo, da adubação, dentre outros (GONÇALVES et al., 2013). O silvicultor, manipulando a densidade e a distribuição espacial das plantas no povoamento, indiretamente, altera a disponibilidade de recursos de crescimento às plantas (água, luz e nutrientes) o que afeta a produtividade dos plantios florestais (BERNARDO et al., 1998; LELES et al., 2001; BINKLEY et al., 2004; HARRINGTON et al., 2009; LIN et al., 2013). O espaçamento afeta o ritmo de crescimento das árvores (HARRINGTON et al., 2009), principalmente em diâmetro (PINKARD e NEILSEN, 2003; HARRINGTON et al., 2009; PAULA et al., 2013; PACHECO et al., 2015), forma do fuste (NOGUEIRA et al., 2008; INOUE et al., 2011; SOUZA et al., 2016), densidade da madeira (ROCHA, 2011; MOULIN et al., 2017), produtividade (MELIDO, 2012; PACHECO et al., 2015), dentre outros.

Escolhido o espaçamento, é possível estabelecer diferentes distâncias entre as linhas de plantio e entre plantas nas linhas, ou seja, arranjos espaciais distintos. A razão entre a maior e a menor distância é denominada retangularidade (PAULA et al., 2013). Arranjos espaciais com maior retangularidade proporcionam maior custo de manutenção, menor produtividade, menor idade técnica de corte (MELIDO, 2012) e menor produção de biomassa de tronco (ASSIS et al., 1999). Por outro lado, plantios com maior retangularidade apresentam menor custo de preparo de solo e facilidade na colheita de madeira (GONÇALVES et al., 2004; MELIDO, 2012). Apesar dos vários estudos sobre o espaçamento de plantio (HARRINGTON et al., 2009; PAULA et al., 2013; PACHECO et al., 2015; MOULIN et al., 2017), ainda há carência de estudos específicos sobre o efeito do arranjo espacial sobre genótipos em sítios distintos.

O crescimento dos povoamentos florestais pode ser estudado por meio de modelos de crescimento e produção em nível de povoamento (MNP), modelos de distribuição de diâmetros (MDD) e modelos de árvores individuais (MAI). Os MNP permitem gerar estimativas precisas do crescimento e da produção volumétrica (SOARES et al., 2003; AZEVEDO et al., 2016), enquanto os MDD e MAI geram estimativas do crescimento e a produção por classe de diâmetro (BINOTI et al., 2012; LEITE et al., 2013). Os MDD permitem quantificar o volume de madeira por classe de diâmetro, e são essenciais quando há interesse em estimar multiprodutos da madeira (SOARES et al., 2003; CASTRO et al., 2011; CAMPOS; LEITE, 2017).

As densidades básica e aparente da madeira, usualmente, podem ser obtidas por métodos de imersão (ABNT NBR 7190, 1997; ABNT NBR 11941, 2003). A densitometria de raios X (*DRX*) tem sido utilizada, ultimamente, por meio de filmes radiográficos, leitura direta e imagens digitais de raios X (SURDI et al., 2014; JACQUIN et al., 2017), para avaliar a densidade da madeira, com elevada acurácia. Através desta técnica, é possível determinar as variações de densidade intra e inter-anéis de crescimento, a partir de perfis radiais do lenho (FREYBURGER et al., 2009; CASTRO et al., 2014; RIDDER et al., 2011; JACQUIN et al., 2017). Também, a *DRX* possibilita a análise dos efeitos de tratamentos silviculturais e de danos ambientais como os causados pelo vento (SETTE JUNIOR et al., 2009; ZANUNCIO, 2016) e permite, também, a seleção precoce de genótipos para a produção de madeira de densidades específicas (HENRIQUES et al., 2017).

O crescimento dos clones de eucalipto foi estudado por meio de modelos e a densidade por imagens digitais de raios X (*IDRX*) com o objetivo de avaliar o efeito do arranjo espacial sobre o crescimento de clones em nível de povoamento e modelos de distribuição de diâmetros e, a densidade da madeira utilizando a densitometria de raios X (*DRX*).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 6p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma NBR 7190**: Projetos de estrutura da madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997, 107p.

ASSIS, R. L.; FERREIRA, M. M.; MORAIS, E. J.; FERNANDES, L. A. Produção de biomassa de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, sob diferentes espaçamentos na região do cerrado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 151-156, 1999.

AZEVEDO, G. B.; OLIVEIRA, E. K. B.; AZEVEDO, G. T. D. O. S.; BUCHMANN, H. M.; MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 383-392, 2016.

BERNARDO, A. L.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; HARRISON, R. B.; FIRME, D. J. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 104, n. 1-3, p. 1-13, 1998.

BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G. Thinking about resource use efficiency in forests. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 5-16, 2004.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; SILVA, A.; SANTOS, A. C. A. Modelagem da distribuição diamétrica em povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste utilizando autômatos celulares. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 931-939, 2012.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5 ed. Viçosa: UFV, 2017. 636p.

CASTRO, R. V. O.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; SOARES, C. P. B.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; CASTRO, A. F. N. M.; CRUZ, J. P.; SANTOS, F. L.; SOUZA, C. C. Avaliação econômica de um povoamento de eucalipto desbastado e destinado a multiprodutos de madeira. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p. 351-357, 2011.

CASTRO, V. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; SURDI, P. G. Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de *Pinus (Pinus caribaea var. hondurensis* Barr. et Golf.) por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 353-360, 2014.

FANTUZZI NETO, H. **Qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft**. 2012. 105f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FREYBURGER, C.; LONGUETAUD, F.; MOTHE, F.; CONSTANT, T.; LEBAN, J. M. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. **Annals of Forest Science**, v. 66, p. 804, 2009.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; SMETHURST, P.; GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Holanda, v. 193, p. 45-61, 2004.

GONÇALVES, J. L. D.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. D.; LIMA, W. D. P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013.

HARRINGTON, T. B.; HARRINGTON, C. A.; DEBELL, D. S. Effects of planting spacing and site quality on 25-year growth and mortality relationships of Douglas-fir

(*Pseudotsugamenziesii* var. *menziesii*). **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 1, p. 18–25, 2009.

HENRIQUES, E. P.; MORAES, C.; SEBBENN, A. M.; TOMAZELLO FILHO, M.; MORAES, M.; MORI, E. S. Estimativa de parâmetros genéticos para caracteres silviculturais e densidade do lenho em teste de progênies de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 105-113, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – Ibá. **Relatório 2017**. Brasília, 2017.

INOUE, M. T; FIGUEIREDO FILHO A.; LIMA R. Influência do espaço vital de crescimento na altura e diâmetro de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, v.39, n.91, p.377-385, 2011.

JACQUIN P.; LONGUETAUD F.; LEBAN J. M.; MOTHE F. X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. **Dendrochronologia**, v. 42, p. 42–50, 2017.

LEITE, H. G.; ALCÂNTARA, A. E. M.; BINOTI, D. H. B.; OLIVEIRA NETO, R. R.; SILVA, M. L. M. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Árvore**, v. 37, n. 2, p. 321-328. 2013.

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Crescimento, produção e alocação de *Eucalyptus camaldulensis* e *pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, v. 59, n. 59, p. 77-87, 2001.

LIN, Y.; YANG, H.; IVKOVIĆ, M.; GAPARE, W. J.; MATHESON, A. C.; WU, H. X. Effect of genotype by spacing interaction on radiata pine genetic parameters for height and diameter growth. **Forest Ecology and Management**, v.304, p.204-211, 2013.

MELIDO, R. C. N. **Avaliação técnica e econômica de dois projetos florestais com eucalipto para fins energéticos**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; OLIVEIRA, J. G. L., CAMPINHOS, E.; GOMES, F.; VIDAURRE, G. B. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1–10, 2017.

NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; REIS, G. G.; MOREIRA, A. M. Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 855-860, 2008.

PACHECO J. M.; FIGUEIREDO FILHO A. F.; DIAS N. A.; MACHADO A. S.; LIMA R. Efeito da densidade inicial no crescimento de *Pinus taeda* L. na região Centro Sul do Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v.43, n.106, p.353-365, 2015.

PAULA, R. R.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H. G.; MELIDO, R. C. N.; LOPES, H. N. S.; SOUSA, F. C. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, v. 87, n. 6, p. 1285-1307, 2013.

PINKARD, E. A.; NEILSEN, W. A. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. **Forest Ecology and**

**Management**, Amsterdam, v. 172, n. 2-3, p. 215-227, 2003.

RIDDER, M.; VAN DEN BULCKE, J.; VANSTEENKISTE, D.; VAN LOO, D.; DIERICK, M.; MASSCHAELE, B.; WITTE, Y.; MANNES, D.; LEHMANN, E.; BEECKMAN, H. High-resolution proxies for wood density variations in *Terminalia superba*. **Annals of Botany**, v. 107, n. 2, p. 293–302, 2011.

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. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SETTE JÚNIOR, 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. **Floresta**, v. 39, n. 3, p. 535-546, 2009.

SOARES, T. S.; VALE, A. B.; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, v. 27, n. 6, p. 811-820, 2003.

SOUZA, R. R.; NOGUEIRA, G. S.; JÚNIOR, L. S. M.; PELLI, E.; DE OLIVEIRA, M. L. R.; ABRAHÃO, C. P.; LEITE, H. G. Forma de fuste de árvores de *Eucalyptus* em plantios com diferentes densidades iniciais. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109: 33-40, 2016.

SURDI, P. G. et al. Perfil de densidade do lenho utilizando métodos radiográficos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 102, p. 229–236, 2014.

ZANUNCIO, A. J. V. **Avaliação de clones de eucalipto sujeitos a danos pelos ventos e utilização de sua madeira na indústria florestal**. 2016. 67f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

## CAPÍTULO I

### INTERAÇÃO ENTRE ARRANJO ESPACIAL DE PLANTIO E CLONES DE EUCALIPTO NO SUL DO BRASIL: EFEITO NO CRESCIMENTO

#### RESUMO

Os povoamentos de eucalipto no Brasil têm sido explorados em rotações curtas ( $\leq 7$  anos) e são altamente produtivos como resultado da seleção de genótipos para locais específicos e do uso de técnicas silviculturais apropriadas. O presente estudo foi desenvolvido visando avaliar clones e arranjos espaciais para cultivo de eucalipto na região sul do Brasil. Clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (A, B) e de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* (C, D) foram estabelecidos em arranjos espaciais de 3,75 x 2,40 m; 6,00 x 1,50 m e 4,00 x 3,00 m. A altura total (*Ht*) e o diâmetro (*dap*) foram mensuradas entre 27 e 88 meses, a cada 12 meses, em 430 parcelas permanentes (418-611 m<sup>2</sup>). As variáveis do povoamento foram estimadas pelo modelo de Gompertz. Aos 7 anos de idade, a *Ht* e o *dap* foram maiores para o clone B no arranjo espacial 4,00 x 3,00 m. A redução da distância entre árvores na linha de plantio (6,00 x 1,50 m), com crescente retangularidade, resultou em *dap* menores em relação ao arranjo 3,75 x 2,40 m, ambos com 9 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup> e, o volume individual foi maior no arranjo 4,00 x 3,00 m para todos os clones. Aos 7 anos, o clone B, no arranjo espacial 3,75 x 2,40 m, apresentou a maior produtividade. O clone B apresentou o maior incremento médio anual na idade técnica de corte, para rotações regulatórias de 5, 6 e 7 anos. Os resultados permitem inferir que arranjos espaciais de plantio com maior retangularidade devem ser evitados, pois resultam em menor produtividade e diâmetro.

Palavras-chave: Espaçamento, clones de eucalipto, produtividade florestal

## ABSTRACT

Eucalypt stands in Brazil have been exploited at short rotations ( $\leq 7$  years), and are highly productive due to genotype selection for specific sites and the use of appropriate silvicultural techniques. The present study aimed at the selection of genotypes and tree planting arrangements to obtain high productivity in plantations in the Brazilian southern region. Hybrid clones of *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* (A, B) and *E. urophylla* x *E. globulus* (C, D) were established in the planting arrangements 3.75 x 2.40 m; 6.00 x 1.50 m and 4.00 x 3.00 m. The total height (*Ht*) and diameter (*dbh*) were measured between 27 and 88 months, every 12 months, in 430 permanent plots (418-611 m<sup>2</sup>). The stand variables were estimated by Gompertz model. The *Ht* and *dbh* were the highest for clone B in the planting arrangement 4.00 x 3.00 m. The reduction of the distance between trees in the planting line (6.00 x 1.50 m), leading to increasing rectangularity, resulted in smaller *dbh* in relation to the arrangement 3.75 x 2.40 m, both with 9 m<sup>2</sup> tree<sup>-1</sup> and, the individual volume was the largest in the 4.00 x 3.00 m arrangement, for all clones. Clone B showed the highest yield in the planting arrangement 3.75 x 2.40 m. Clone B presented the largest annual mean increase in tree harvesting age. The regulatory rotation at 5, 6 and 7 years should be adopted. The results allow inferring that the tree planting arrangements with greater rectangularity should be avoided because they result in lower productivity and diameter. Wider spacing are more adequate to produce logs of larger diameter.

Key words: Spacing, eucalypt genotypes, forest productivity

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui plantios de eucalipto altamente produtivos e que são manejados em rotação curta, o que confere ao País a posição de destaque como competidor mundial na produção dessa madeira (IBÁ, 2017). Esses elevados níveis de produtividade foram atingidos, dentre outros, com a clonagem e a hibridação, com os genótipos selecionados para sítios e usos específicos (SANTOS et al., 2006; BELTRAME et al., 2012; XAVIER et al., 2013). Vários estudos foram realizados com genótipos de eucalipto para avaliar a produtividade, alocação de biomassa, relações hídricas, adubação, espaçamento e arranjo espacial (BERNARDO et al., 1998; LELES et al., 2001; MAGALHÃES et al., 2007; STAPE et al., 2008; OLIVEIRA NETO et al. 2010; JESUS et al., 2012; LEITE et al., 2013; PAULA et al., 2013; ALVES et al., 2017; HAKAMADA et al., 2017, HODECKER et al., 2018; SCOLFORO et al., 2019). Entretanto, apesar das informações sobre o efeito do espaçamento na produtividade de povoamentos de eucalipto, ainda há carência de estudos que relacionem o arranjo espacial e a produtividade para diferentes genótipos em sítios distintos.

A escolha adequada do espaçamento e do arranjo espacial é determinante para a obtenção de elevada produtividade, uma vez que a distância na linha e entrelinha de plantio pode acentuar a competição por recursos de crescimento (BERNARDO et al., 1998; LELES et al., 2001; OLIVEIRA NETO et al. 2003; BINKLEY et al., 2004; LEITE et al., 2006a). A partir de um mesmo espaçamento é possível estabelecer arranjos espaciais distintos e, assim, alterar a demanda por recursos de crescimento (HARRINGTON et al., 2009; LIN et al., 2013). Arranjos espaciais com maior retangularidade proporcionam maior custo de manutenção, menor produtividade, menor idade técnica de corte (MELIDO, 2012) e menor da produção de biomassa de tronco (ASSIS et al., 1999). Apresentam, também, menor custo de preparo de solo e maior facilidade na colheita de madeira (GONÇALVES et al., 2004; MELIDO, 2012).

De forma geral, o espaçamento e o arranjo espacial não afetam significativamente o crescimento em altura, principalmente quando a avaliação é feita com base em árvores dominantes e codominantes (CLUTTER et al., 1983; PINKARD e NEILSEN, 2003; MAGALHÃES et al., 2007; PAULA et al., 2013; PACHECO et al., 2015). Campos e Leite (2017) relatam que o crescimento em altura das árvores mais altas é pouco afetado pela competição. Em espaçamentos muito reduzidos, a competição por luz pode estimular o crescimento em altura das árvores (PEREIRA et al., 1982; VALERA; KAGEYAMA, 1988; INOUE et al., 2011). Usualmente, menor crescimento em altura ocorre em árvores

isoladas ou em elevadas densidades de plantio (GERRAND e NEILSEN 2000; LELES et al. 2001).

Espaçamentos amplos proporcionam o maior crescimento em diâmetro de plantas (LELES et al., 2001; RONDON, 2002; PINKARD e NEILSEN, 2003; LEITE et al., 2006a, KRUCHEWSKY et al., 2007; MAGALHÃES et al., 2007; PAULA et al., 2013; PACHECO et al., 2015; RIBEIRO et al., 2017). Em contrapartida, plantas em menores espaçamentos produzem maior área basal e maior produção por área (LEITE et al., 2006a, KRUCHEWSKY et al., 2007; MAGALHÃES et al., 2007; OLIVEIRA et al. 2009; PAULA et al., 2013 PACHECO et al., 2015).

Em povoamentos adensados, a máxima taxa de crescimento ocorre em idades mais jovens, quando comparado a povoamentos estabelecidos em espaçamentos amplos (CLUTTER et al., 1983; HARRINGTON et al., 2009) e a estagnação do crescimento é antecipada em sítios de elevada capacidade produtiva (CLUTTER et al., 1983; DIAS et al., 2005; DEMOLINARI et al., 2007). Ou seja, povoamentos adensados estabelecidos em sítios de elevada capacidade produtiva deverão apresentar menor idade técnica de corte, em relação a povoamentos em espaçamentos amplos, em locais de baixo potencial produtivo. Plantios em espaçamentos amplos quase sempre são indicados para a produção de madeira de maiores dimensões, principalmente, para uso como postes, madeira para serraria, dentre outros (HARRINGTON et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2009; PAULA et al., 2013).

O espaçamento, também, afeta a forma do fuste (NOGUEIRA et al., 2008; INOUE et al., 2011; SOUZA et al., 2016), as propriedades físicas da madeira (WARREN et al., 2009) e sua composição química (MOULIN et al., 2015; ROCHA et al., 2016). Esses efeitos decorrem de diferenças no ritmo de crescimento das árvores. Desta forma, um dos principais desafios é escolher o genótipo e o arranjo espacial que proporcionem o melhor aproveitamento da capacidade produtiva do local, gerando produtos com características adequadas.

Este estudo teve como objetivo avaliar o crescimento e a produção dos clones dos híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* e de *E. urophylla* x *E. globulus*, em diferentes espaçamentos e arranjos espaciais para o município de Congonhinhas – PR.

As hipóteses de trabalhos foram:

H<sub>0</sub>(1): O adensamento de plantio entre covas, para um mesmo espaçamento, não afeta a produtividade média em idades de 5 a 7 anos;

H<sub>0</sub>(2): A idade técnica de corte independe da taxa inicial de crescimento;

H<sub>0</sub>(3): A produtividade média em idades de 5 a 7 anos foi menor para os espaçamentos com maior retangularidade;

H<sub>0</sub>(4): O diâmetro médio independe do arranjo espacial, para um mesmo espaçamento.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Descrição da Área de Estudo**

O estudo foi realizado no município de Congonhinhas PR (23°35'11"S e 50°32'33"W, altitude de 753 m). A temperatura média anual no local foi de 20,0°C e a precipitação média anual foi de 1.400 a 1.600 mm, com chuvas concentradas no verão, mas sem estação seca definida. A classe de solo predominante é o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, com horizonte A moderado ou A proeminente de textura argilosa ou muito argilosa. O relevo é suave ondulado.

### **2.2. Instalação do experimento**

Dois clones de *E. urophylla* x *E. grandis* (A, B) e dois de *E. urophylla* x *E. globulus* (C, D) foram plantados em julho de 2009, nos espaçamentos de 9 e 12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>, em três arranjos espaciais: 3,75 x 2,40 m; 6,00 x 1,50 m (1.111 árvores ha<sup>-1</sup>) e 4,00 x 3,00 m (833 árvores ha<sup>-1</sup>), com retangularidade de 1,56, 4,00 e 1,33, respectivamente.

O preparo do solo incluiu aplicação de 1,5 toneladas de calcário dolomítico, por hectare, em área total, com subsequente subsolagem a 50 cm de profundidade na linha de plantio. A adubação foi de 250 kg/ha de NPK 06-30-06, aos 10 dias após o plantio e, de 250 kg/ha de NPK 15-05-30, quatro meses após o plantio.

O delineamento foi o inteiramente casualizado (DIC) no esquema fatorial 4 x 3 (4 clones e 3 arranjos espaciais). Foram instaladas aleatoriamente 430 parcelas permanentes de 418-611 m<sup>2</sup>, mensuradas nas idades entre 27 e 88 meses (6 medições), com intervalos de, aproximadamente, 12 meses. Em cada parcela foram medidas a circunferência a 1,3 m de altura de todas as árvores e a altura total das dez primeiras árvores e de 4 a 6 árvores dominantes. Essas árvores dominantes foram definidas conforme Assmann (1970).

### 2.3. Altura total e volume individual

Para estimar as alturas das árvores foi ajustado o modelo (1).

$$LnHt = \beta_0 + \beta_1 dap^{-1} + \beta_2 LnHd + \beta_3 I + \varepsilon_i \quad (1)$$

em que:  $Ht$  = altura da árvore (m),  $Hd$  = altura dominante (m),  $dap$  = diâmetro a 1,3 m de altura (cm),  $I$  = idade em meses,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  = parâmetros do modelo e  $\varepsilon_i$  = erro aleatório,  $\varepsilon \sim NID(0, \sigma^2)$ :

O modelo volumétrico ajustado por classe de diâmetro foi o polinômio do 5º grau (2) (Tabela 1):

$$\frac{di}{dap} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{hi}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{hi}{ht}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{hi}{ht}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{hi}{ht}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{hi}{ht}\right)^5 + \varepsilon_i \quad (2)$$

em que:  $di$  = diâmetro ao longo do fuste (cm),  $dap$  = diâmetro a 1,30 m (cm),  $ht$  = altura total (m),  $hi$  = altura ao longo do fuste (m),  $\hat{v}_i$  = volume de qualquer seção da árvore,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  e  $\beta_5$  = parâmetros do modelo e  $\varepsilon_i$  = erro aleatório,  $\varepsilon \sim NID(0, \sigma^2)$ .

O volume individual das árvores foi obtido pela integral do polinômio (3):

$$\hat{v}_i = \frac{\pi}{40000} \int_{h1}^{h2} dap^2 \delta ht \quad (3)$$

A aplicação da integral foi conforme equação (4):

$$\begin{aligned} \hat{v}_i = & (\beta_0^2 hi + \beta_0 \beta_1 hi^2 / ht + (\beta_1^2 + 2\beta_0 \beta_2) 3hi^3 / (3ht^2) + (\beta_0 \beta_3 + \beta_1 \beta_2) hi^4 / \\ & (2ht^3) + (2\beta_0 \beta_4 + 2\beta_1 \beta_3 + \beta_2^2) hi^5 / (5ht^4) + (\beta_0 \beta_5 + \beta_1 \beta_4 + \beta_2 \beta_3) hi^6 / (3ht^5) + \\ & (2\beta_1 \beta_5 + 2\beta_2 \beta_4 + \beta_3^2) hi^7 / (7ht^6) + (\beta_2 \beta_5 + \beta_3 \beta_4) hi^8 / (4ht^7) + (2\beta_3 \beta_5 + \\ & \beta_4^2) hi^9 / (9ht^8) + \beta_4 \beta_5 hi^{10} / (5ht^9) + \beta_5^2 hi^{11} / (11ht^{10})) \pi dap^2 / 40000 \end{aligned} \quad (4)$$

Tabela 1 - Estimativas dos parâmetros do modelo de *taper* (polinômio do 5º grau) para clones de eucalipto, em Congonhinhas, PR

Tratamento	Clone	Classe de dap (cm)	Parâmetros					
			$\beta_0^{(1)}$	$\beta_1^{(1)}$	$\beta_2^{(1)}$	$\beta_3^{(1)}$	$\beta_4^{(1)}$	$\beta_5^{(1)}$
1 a 6	Clones A e B	0,0-9,9	1,2581	-3,8725	16,5596	-38,7933	40,5173	-15,6610
1 a 6	Clones A e B	10,0-16,9	1,2234	-4,1180	18,7136	-43,9771	45,4519	-17,2930
1 a 6	Clones A e B	17,0-50,0	1,2051	-4,2508	19,2071	-44,1668	44,8923	-16,8902
7 a 12	Clones C e D	0,0-7,9	1,5526	-6,5677	26,1682	-56,0193	55,3889	-20,5183
7 a 12	Clones C e D	8,0-11,9	1,3810	-5,8127	25,0359	-55,9092	56,4908	-21,1839
7 a 12	Clones C e D	12,0-16,9	1,3017	-5,5148	24,4325	-55,0802	55,7502	-20,8897
7 a 12	Clones C e D	17,0-50,0	1,2673	-5,6319	24,8736	-54,9928	54,6891	-20,2035

<sup>(1)</sup> Coeficientes estimados.

## 2.4. Crescimento e produção

O crescimento das plantas em altura total ( $Ht$ ), altura dominante ( $Hd$ ), diâmetro a 1,30 m ( $dap$ ), volume individual ( $V_{ind}$ ), área basal ( $B$ ) e produção ( $Vha$ ) foram estimados por meio de análise de regressão não linear, utilizando o modelo de Gompertz (4):

$$Y_i = \alpha e^{-e^{\beta-\gamma} I_i} + \varepsilon_i; \quad (4)$$

em que:  $Y_i$  = variável dependente,  $I_i$  = idade do povoamento, em meses,  $\alpha$  = valor assintótico,  $\beta$  = parâmetro de locação, sem interpretação biológica,  $\gamma$  = taxa de expansão do crescimento e  $\varepsilon_i$  = erro aleatório,  $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ .

Após o ajuste do modelo (3), para cada tratamento, as equações foram comparadas pelo teste de identidade de modelos (REGAZZI e SILVA, 2004, 2010).

A idade técnica de corte (ITC) e os incrementos médio (IMA) e corrente (ICA) anuais foram calculados para a variável volume em todas as parcelas de cada tratamento.

### 3. RESULTADOS

As equações de altura total apresentaram coeficientes de determinação ajustados igual ou superior a 0,91 e erro-padrão residual inferior a 1,28 m para todos os clones e arranjos espaciais (Tabela 2).

Tabela 2 - Estimativa dos parâmetros do modelo  $LnHt = \beta_0 + \beta_1dap^{-1} + \beta_2LnHd + \beta_3I + \varepsilon_i$ , para a altura total, para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

Tratamento	Clone	Espaçamento (m <sup>2</sup> árvore <sup>-1</sup> )	Arranjo espacial (m x m)	Parâmetros				$R^2_{aj}^{(2)}$	$S_{yx}^{(3)}$
				$\beta_0^{(1)}$	$\beta_1^{(1)}$	$\beta_2^{(1)}$	$\beta_3^{(1)}$		
1	A	9	3,75x2,40	0,8621	-6,5812	0,8459	-0,0004	0,95	1,43
2	A	9	6,00x1,50	0,8260	-7,8513	0,9273	-0,0029	0,98	0,97
3	A	12	4,00x3,00	1,1897	-7,2248	0,7253	0,0007	0,97	1,39
4	B	9	3,75x2,40	1,3438	-10,7134	0,7614	-0,0012	0,94	1,61
5	B	9	6,00x1,50	1,9186	-11,4724	0,5448	0,0013	0,89	2,09
6	B	12	4,00x3,00	2,1251	-15,4157	0,5288	0,0015	0,91	2,00
7	C	9	3,75x2,40	0,9980	-6,0380	0,7728	0,0006	0,96	1,16
8	C	9	6,00x1,50	1,3766	-7,0478	0,6647	0,0011	0,96	1,16
9	C	12	4,00x3,00	1,7528	-8,4493	0,5361	0,0025	0,95	1,18
10	D	9	3,75x2,40	0,7269	-4,8110	0,8642	-0,0005	0,98	0,70
11	D	9	6,00x1,50	0,6266	-3,5349	0,8740	-0,0007	0,95	0,86
12	D	12	4,00x3,00	0,7616	-4,9048	0,8435	-0,0004	0,98	0,75

<sup>(1)</sup>Coefficientes estimados; <sup>(2)</sup>Coefficientes de determinação ajustados; <sup>(3)</sup>Erro-padrão residual, em metros.

As tendências de crescimento para altura total, altura dominante, diâmetro e volume individual, quando submetidas ao teste de identidade de modelos, diferiram ( $p \leq 0,05$ ) entre todos os tratamentos, ou seja, essas características foram afetadas pelo clone e pelo arranjo espacial. Por outro lado, as tendências de crescimento em área basal foram iguais para os tratamentos 2 e 3 e, também, para 5 e 6 ( $p > 0,05$ ). Para a produção (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), não houve diferença entre os tratamentos 2 e 3 e 11 e 12. Essa similaridade nas tendências de crescimento ocorreu sempre entre os arranjos 6,00 x 1,50 m e 4,00 x 3,00 m (Tabela 3, Figuras 1 e 2).

Tabela 3 – Estimativa dos parâmetros do modelo de Gompertz ajustados para altura total, altura dominante, diâmetro a 1,30 m, área basal, volume individual e produção, para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

Trat.	Parâmetros					Trat.	Parâmetros				
	$\alpha^{(1)}$	$\beta^{(1)}$	$\gamma^{(1)}$	$R_{\hat{y}y}^{(2)}$	$S_{yx}^{(3)}$		$\alpha^{(1)}$	$\beta^{(1)}$	$\gamma^{(1)}$	$R_{\hat{y}y}^{(2)}$	$S_{yx}^{(3)}$
Altura total (m)						Altura dominante (m)					
1	33,3220	1,0598	0,0380	0,96	1,84	1	35,3077	0,9211	0,0340	0,99	0,96
2	29,6785	1,4744	0,0506	0,93	2,53	2	34,4300	1,1071	0,0375	0,99	0,92
3	34,1636	1,1712	0,0378	0,98	1,50	3	36,2261	1,0667	0,0347	0,99	0,88
4	29,7685	1,1790	0,0484	0,86	3,37	4	35,5045	1,0889	0,0417	0,99	0,76
5	30,1180	0,9984	0,0398	0,84	3,58	5	35,7340	1,0163	0,0379	0,99	0,89
6	33,1869	1,0832	0,0409	0,87	3,53	6	37,2502	1,1195	0,0405	1,00	0,71
7	30,0079	1,0254	0,0386	0,93	2,19	7	32,1463	1,0509	0,0396	0,98	1,26
8	29,2813	0,9034	0,0361	0,91	2,25	8	31,3083	0,9604	0,0384	0,98	1,14
9	30,4185	0,8359	0,0340	0,93	2,03	9	30,2064	0,9277	0,0403	0,99	0,71
10	22,5961	1,7276	0,0720	0,97	1,14	10	23,4422	1,5536	0,0666	0,98	0,98
11	22,6245	0,8931	0,0503	0,92	1,53	11	24,2885	0,7497	0,0434	0,95	1,24
12	22,7125	1,4143	0,0632	0,95	1,41	12	23,5820	1,3298	0,0609	0,96	1,17
Diâmetro (cm)						Volume individual (m <sup>3</sup> )					
1	20,9514	0,6673	0,0455	0,82	1,99	1	0,5821	1,7827	0,0372	0,87	0,08
2	20,4269	0,7121	0,0428	0,77	2,46	2	0,5392	1,8860	0,0379	0,86	0,08
3	22,7836	0,8247	0,0447	0,89	1,77	3	0,7021	1,9150	0,0369	0,91	0,08
4	20,3453	0,3152	0,0469	0,53	3,43	4	0,5126	1,7039	0,0433	0,66	1,45
5	20,1728	0,4822	0,0488	0,57	3,37	5	0,5132	1,6758	0,0397	0,67	1,41
6	22,8223	0,5321	0,0527	0,63	3,11	6	0,6950	1,7382	0,0421	0,74	1,58
7	17,7241	0,4858	0,0486	0,63	2,41	7	0,3342	1,5953	0,0383	0,08	0,05
8	17,0849	0,4334	0,0461	0,64	2,27	8	0,2923	1,5575	0,0378	0,77	0,06
9	19,5687	0,4202	0,0424	0,73	2,12	9	0,4003	1,4686	0,0329	0,83	0,06
10	17,0644	0,8223	0,0593	0,86	1,27	10	0,2110	2,2846	0,0670	0,91	0,03
11	16,7915	0,5392	0,0503	0,75	1,75	11	0,2137	1,6332	0,0476	0,83	0,04
12	19,2930	0,5513	0,0462	0,84	1,61	12	0,2658	1,8460	0,0514	0,90	0,03
Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )						Produção (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )					
1	36,3881	1,3242	0,0439	0,99	1,24	1	593,8834	1,7873	0,0375	0,99	17,91
2	35,6934	1,3418	0,0398	0,99	0,86	2	540,4518	1,8980	0,0384	1,00	13,16
3	34,9256	1,4548	0,0423	0,99	1,11	3	583,2837	1,9158	0,0370	0,99	17,22
2+3	35,3061	1,3996	0,0411	1,00	0,99	2+3	562,1500	1,9045	0,0376	0,99	15,76
4	35,2207	1,0852	0,0499	0,96	1,91	4	521,7628	1,7558	0,0460	0,98	25,79
5	33,2361	1,1419	0,0466	0,96	1,80	5	505,8985	1,6745	0,0396	0,98	23,86
6	32,8950	1,2145	0,0516	0,99	1,11	6	537,7351	1,7480	0,0426	1,00	12,48
5+6	33,0377	1,1767	0,0491	1,51	0,97	7	350,2935	1,5543	0,0371	0,99	12,20
7	27,1876	1,0944	0,0455	0,99	0,85	8	293,4042	1,5569	0,0382	0,98	13,53
8	23,9259	1,0735	0,0445	0,97	1,19	9	339,8788	1,4688	0,0329	0,98	14,40
9	26,5825	1,0426	0,0393	0,97	1,27	10	225,3630	2,2283	0,0648	0,97	16,27
10	24,5990	1,4391	0,0561	0,97	1,26	11	208,2802	1,6299	0,0476	0,96	14,86
11	22,1598	1,1821	0,0482	0,96	1,25	12	219,3219	1,8117	0,0499	0,97	14,37
12	24,1577	1,2051	0,0448	0,98	1,07	11+12	213,7887	1,7233	0,0488	0,97	14,75

<sup>(1)</sup> $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  = Parâmetros do modelo de Gompertz na forma  $y = \alpha e^{-e^{\beta-\gamma} t_i} + \varepsilon_i$ ; <sup>(2)</sup> $R_{\hat{y}y}$  = Coeficiente de correlação <sup>(3)</sup> $S_{yx}$  = Erro padrão residual. 1 = Clone A (3,75 x 2,40 m); 2 = Clone A (6,00 x 1,50 m); 3 = Clone A (4,00 x 3,00 m); 4 = Clone B (3,75 x 2,40 m); 5 = Clone B (6,00 x 1,50 m); 6 = Clone B (4,00 x 3,00 m); 7 = Clone C (3,75 x 2,40 m); 8 = Clone C (6,00 x 1,50 m); 9 = Clone C (4,00 x 3,00 m); 10 = Clone D (3,75 x 2,40 m); 11 = Clone D (6,00 x 1,50 m); 12 = Clone D (4,00 x 3,00 m).

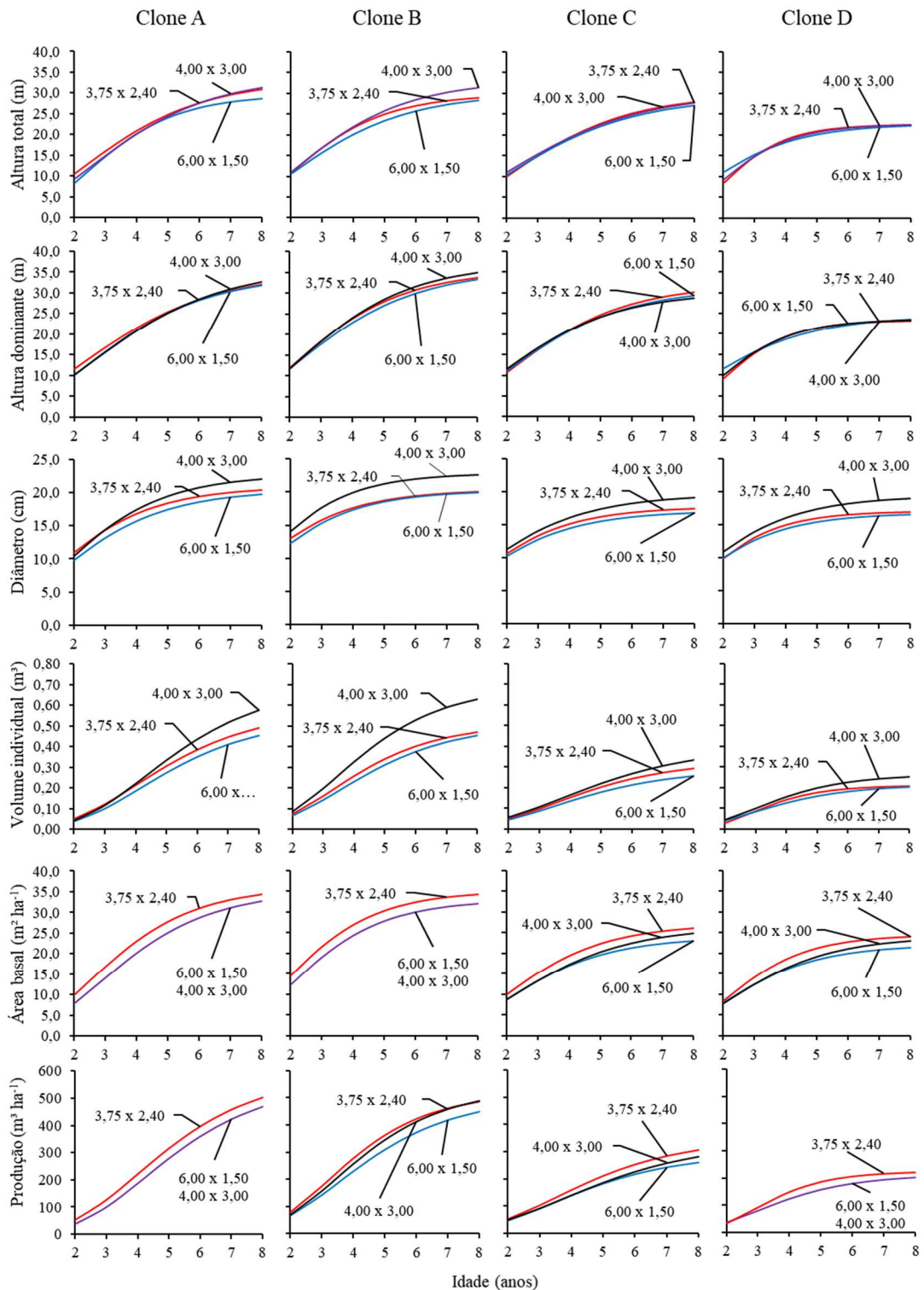


Figura 1 – Estimativa do crescimento em altura total e dominante, diâmetro, área basal, volume individual e produção, para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR. Curvas representando mais de um arranjo espacial, indica que não houve diferenças ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos pelo teste de identidade de modelos.

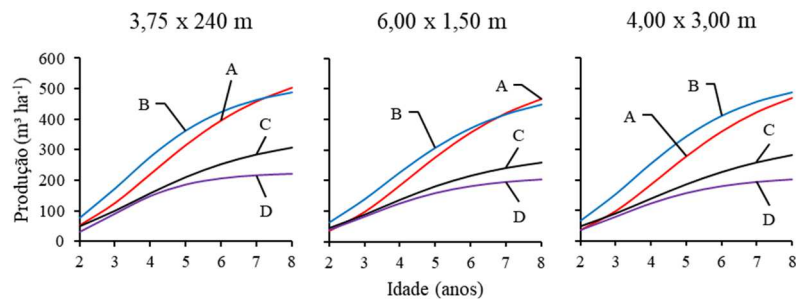


Figura 2 – Curvas de produção ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR.

Os valores assintóticos (parâmetro  $\alpha$ ) (Tabela 3) do modelo de Gompertz ocorrem em idade tendendo ao infinito, o que dificulta a comparação direta entre tratamentos. Desta forma, foi fixada a idade de 7 anos, que é usual em rotação regulatória, para a comparação entre os clones e arranjos espaciais, em relação as variáveis  $Ht$ ,  $Hd$ ,  $dap$ ,  $B$ ,  $V_{arv}$  e  $Vha$ .

O clone B, no arranjo 4,00 x 3,00 m, apresentou maior altura total (30,2 m) e dominante (33,6 m). As menores estimativas de altura total foram observadas no arranjo 6,00 x 1,50 m, independente do clone. A maior variação de altura total foi de 24%, entre os clones B e D. Entre arranjos espaciais, foi observada maior variação de altura total, para o clone B (2,8 m, 9,8%) e a menor para o clone D (0,4 m, 1,8%). Em relação à altura dominante, a maior variação entre os arranjos espaciais foi observada para o clone B (1,5 m, 4,8%) e a menor para o clone D (0,1 m, 0,3%) (Figura 1).

A partir do terceiro ano, as maiores estimativas de diâmetro foram observadas no arranjo espacial 4,00 x 3,00 m, independente do clone. Aos 7 anos, o maior diâmetro (22,4 cm) ocorreu para o clone B, no arranjo 4,00 x 3,00 m, e o menor diâmetro (16,4 cm) foi observado para o clone D, no arranjo 6,00 x 1,50 m (Figura 1).

O maior volume individual ( $0,5892 \text{ m}^3$ ) foi observado para o clone B, no arranjo 4,00 x 3,00 m, e o menor ( $0,1945 \text{ m}^3$ ) foi para o clone D, no arranjo 6,00 x 1,50 m, ou seja, seguiu a mesma tendência das variáveis altura total e diâmetro (Figura 1).

O clone B, no arranjo 3,75 x 2,40 m, apresentou a maior área basal ( $33,68 \text{ m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) e produção ( $462,30 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), enquanto o clone D apresentou a menor área basal ( $20,94 \text{ m}^2 \text{ha}^{-1}$ ) e produção ( $194,84 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), nos arranjos 6,00 x 1,50 m e 4,00 x 3,00 m. As maiores estimativas de área basal e produção foram observadas no arranjo 3,75 x 2,40 m, independente do clone (Tabela 4, Figura 1 e 2).

Tabela 4 – Produção ( $m^3 ha^{-1}$ ), incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA) para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

Idade (anos)	Tratamento													
	1	2	3	2 e 3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	11 e 12
	Produção ( $m^3 ha^{-1}$ )													
2	52,2	37,9	35,6	36,8	76,7	64,5	68,0	50,3	44,1	47,4	31,7	40,9	34,6	37,7
3	126,0	101,1	97,0	99,1	173,1	140,6	155,5	101,1	88,5	90,2	91,5	83,1	79,6	81,3
4	220,8	187,7	184,5	186,0	276,5	228,3	255,4	158,1	137,6	139,0	148,9	124,0	125,7	124,8
5	316,0	277,3	278,7	277,9	362,1	308,6	344,0	210,5	181,8	186,2	186,3	155,4	161,5	158,5
6	397,1	354,7	363,1	358,9	422,8	372,1	411,3	252,8	216,8	226,6	206,5	176,5	185,4	181,0
7	459,4	414,4	430,3	422,4	462,3	418,0	457,8	284,2	242,3	258,7	216,5	189,7	200,0	194,8
8	504,1	457,0	479,9	468,6	486,7	449,3	488,3	306,4	260,0	282,8	221,2	197,6	208,5	203,0
	IMA ( $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ )													
2	26,12	18,97	17,80	18,42	38,36	32,23	34,00	25,16	22,03	23,69	15,85	20,46	17,31	18,83
3	41,98	33,70	32,32	33,02	57,71	46,87	51,83	33,70	29,50	30,05	30,50	27,70	26,52	27,11
4	55,21	46,92	46,11	46,50	69,13	57,08	63,85	39,52	34,39	34,76	37,23	30,99	31,41	31,21
5	63,19	55,46	55,73	55,58	72,42	61,71	68,80	42,09	36,35	37,23	37,26	31,08	32,30	31,69
6	66,18	59,12	60,52	59,81	70,47	62,01	68,55	42,13	36,13	37,77	34,41	29,42	30,90	30,16
7	65,62	59,19	61,47	60,34	66,04	59,71	65,41	40,61	34,61	36,95	30,93	27,10	28,57	27,83
8	63,02	57,13	59,98	58,57	60,83	56,16	61,03	38,30	32,50	35,35	27,65	24,70	26,06	25,38
	ICA ( $m^3 ha^{-1}$ )													
2	73,72	63,18	61,37	62,22	96,40	76,16	87,49	50,79	44,44	42,77	59,79	42,18	44,94	43,66
3	94,88	86,58	87,48	86,96	103,41	87,71	99,91	56,97	49,04	48,89	57,42	40,87	46,10	43,50
4	95,12	89,60	94,20	91,89	85,54	80,25	88,59	52,37	44,21	47,12	37,37	31,42	35,86	33,63
5	81,11	77,43	84,45	80,98	60,75	63,52	67,30	42,32	35,01	40,43	20,19	21,14	23,88	22,50
6	62,31	59,63	67,22	63,49	39,48	45,89	46,55	31,47	25,53	32,07	10,00	13,18	14,59	13,88
7	44,77	42,68	49,55	46,19	24,37	31,33	30,42	22,18	17,67	24,12	4,76	7,87	8,49	8,18
8	30,81	29,17	34,76	32,02	14,60	20,64	19,22	15,10	11,83	17,50	2,22	4,59	4,82	4,70

1 = Clone A (3,75 x 2,40 m); 2 = Clone A (6,00 x 1,50 m); 3 = Clone A (4,00 x 3,00 m); 4 = Clone B (3,75 x 2,40 m); 5 = Clone B (6,00 x 1,50 m); 6 = Clone B (4,00 x 3,00 m); 7 = Clone C (3,75 x 2,40 m); 8 = Clone C (6,00 x 1,50 m); 9 = Clone C (4,00 x 3,00 m); 10 = Clone D (3,75 x 2,40 m); 11 = Clone D (6,00 x 1,50 m); 12 = Clone D (4,00 x 3,00 m).

O incremento médio máximo variou de 31,34 a 72,42  $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ . Destaca-se que o IMA máximo ocorre na idade técnica de corte (ITC). O maior IMA foi observado para o clone B no arranjo espacial 3,75 x 2,40 m, aos cinco anos de idade (Tabela 5). Contudo, independente da rotação regulatória de 5, 6 ou 7 anos, o clone de maior produtividade foi o B, e o clone D apresentou a menor produtividade. Também, para qualquer clone, a maior produtividade foi observada no espaçamento 3,75 x 2,40 m, e o adensamento na linha de plantio (6,00 x 1,50) resultou em menores incrementos (Figura 3).

Tabela 5 – Idade técnica de corte, incrementos médios e diferença percentual entre incrementos médios entre idades IMA<sub>7</sub>-IMA<sub>2</sub>, IMA<sub>7</sub>-IMA<sub>3</sub>, IMA<sub>7</sub>-IMA<sub>4</sub>, IMA<sub>7</sub>-IMA<sub>5</sub> e IMA<sub>7</sub>-IMA<sub>6</sub> (anos), para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

Tratamento	Clone	Arranjo espacial (m x m)	ITC <sup>(1)</sup>	IMA <sub>ITC</sub> <sup>(2)</sup>	Imax <sub>ICA</sub> <sup>(3)</sup>	IMA <sub>maxICA</sub> <sup>(4)</sup>	IMA <sub>7</sub> -IMA <sub>maxICA</sub>	IMA <sub>7</sub> -IMA <sub>2</sub>	IMA <sub>7</sub> -IMA <sub>3</sub>	IMA <sub>7</sub> -IMA <sub>4</sub>	IMA <sub>7</sub> -IMA <sub>5</sub>	IMA <sub>7</sub> -IMA <sub>6</sub>
							(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	A	3,75x2,40	75	66,31	47	54,29	11,33	151,26	56,31	18,87	3,85	-0,83
2	A	6,00x1,50	78	59,51	49	47,83	11,36	212,06	75,63	26,15	6,73	0,12
3	A	4,00x3,00	82	61,52	51	48,98	12,50	245,39	90,19	33,31	10,31	1,58
2+3	A	6,00x1,50/4,00x3,00	80	60,48	50	48,36	11,97	227,66	82,75	29,75	8,56	0,88
4	B	3,75x2,40	60	72,42	38	60,24	5,80	72,16	14,44	-4,47	-8,80	-6,28
5	B	6,00x1,50	67	62,30	42	52,68	7,03	85,29	27,40	4,61	-3,25	-3,71
6	B	4,00x3,00	65	69,19	41	57,73	7,67	92,35	26,19	2,43	-4,93	-4,59
7	C	3,75x2,40	66	42,36	41	36,53	4,07	61,39	20,48	2,75	-3,53	-3,61
8	C	6,00x1,50	64	36,47	40	31,47	3,14	57,09	17,32	0,66	-4,78	-4,19
9	C	4,00x3,00	70	37,79	44	33,44	3,52	55,99	22,97	6,30	-0,75	-2,15
10	D	3,75x2,40	54	37,82	34	28,51	2,42	95,07	1,39	-16,94	-17,00	-10,13
11	D	6,00x1,50	54	31,34	34	26,76	0,35	32,45	-2,16	-12,56	-12,80	-7,88
12	D	4,00x3,00	57	32,36	36	26,52	2,05	65,10	7,74	-9,06	-11,56	-7,54
11+12	D	6,00x1,50/4,00x3,00	56	31,83	35	26,57	1,27	47,79	2,67	-10,81	-12,17	-7,71

<sup>(1)</sup>ITC - Idade técnica de corte; <sup>(2)</sup>IMA<sub>ITC</sub> - Incremento médio anual na idade técnica de corte; <sup>(3)</sup>Imax<sub>ICA</sub> - Idade de máximo incremento corrente anual;

<sup>(4)</sup>IMA<sub>maxICA</sub> - Incremento médio anual no máximo incremento corrente anual.

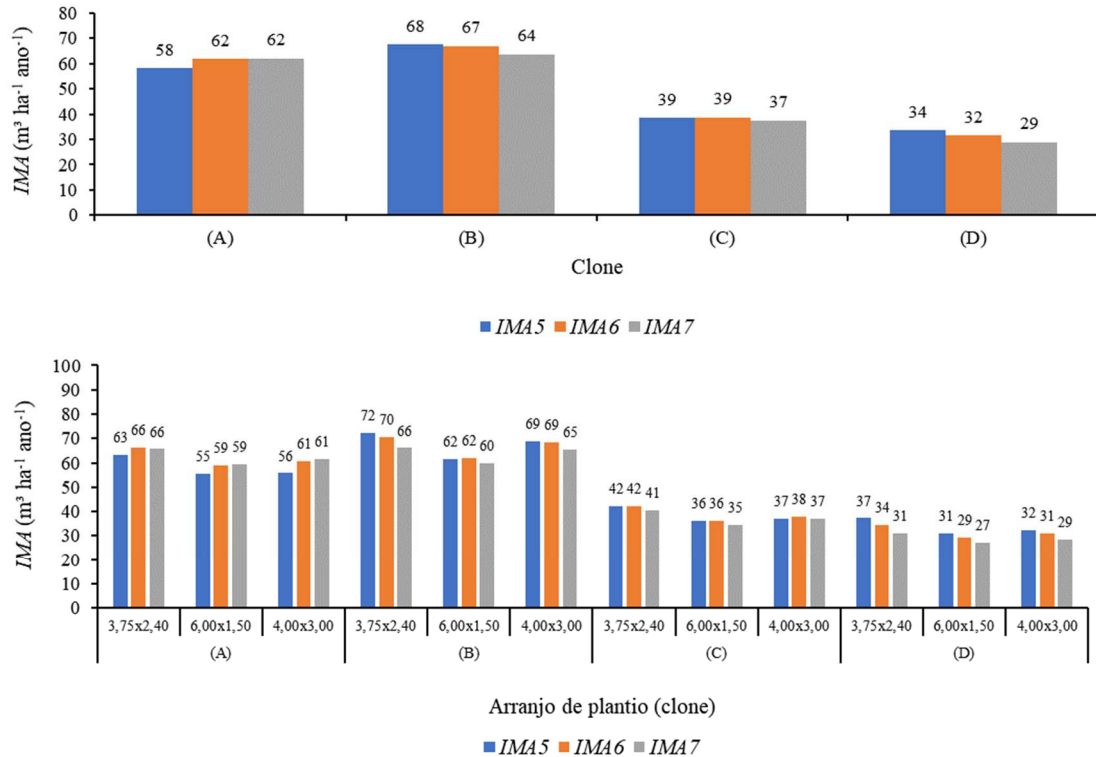


Figura 3 – Incremento médio anual (IMA) para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR. IMA<sub>5</sub>, IMA<sub>6</sub> e IMA<sub>7</sub> = IMA aos 5, 6 e 7 anos de idade, respectivamente.

A ITC variou de 54 a 82 meses e foi afetada pelo clone e pelo arranjo espacial (Tabela 5). De forma geral, observou-se que a maior taxa de crescimento inicial (idade de máximo ICA) resultou em menor ITC, e o acréscimo de um mês na idade de máximo ICA resultou em aumento de 1,63 meses na ITC (Figura 4).

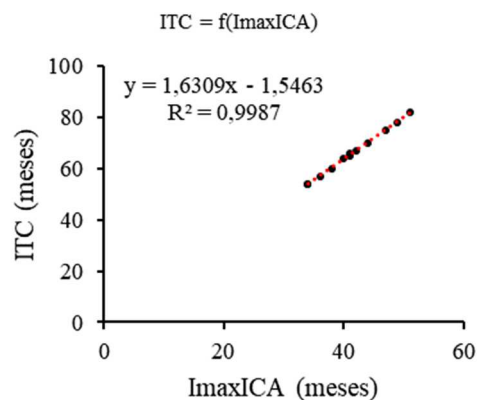


Figura 4 – Idade técnica de corte (ITC) em função da idade de máximo incremento corrente anual (ImaxICA) para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR.

Para os clones A, B e D, quanto maior a taxa de expansão do crescimento (parâmetro  $\gamma$ ) menor a idade de máximo ICA. Matematicamente, quanto maior o valor de  $\gamma$  mais cedo ocorrerá o ponto de inflexão, ou seja, quanto maior a taxa de expansão do crescimento menor a idade de máximo ICA. Para o clone C, essa consistência não foi verificada devido a alguma peculiaridade da equação ajustada (Figura 5).

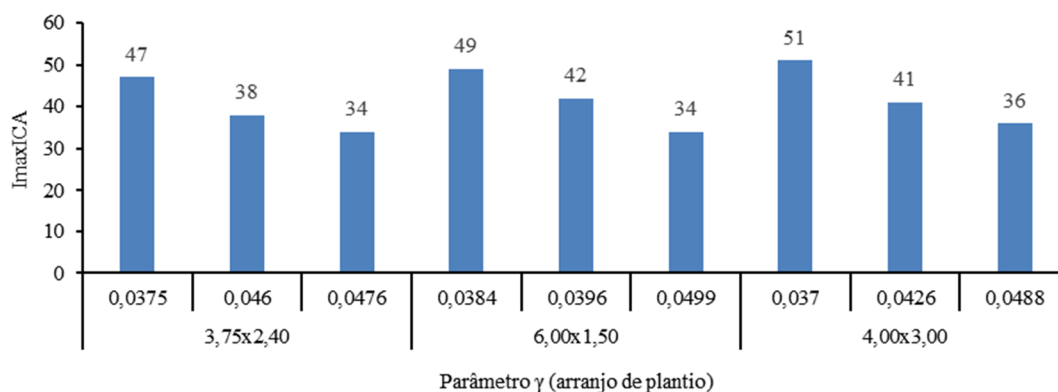


Figura 5 – Idade de máximo incremento corrente anual ( $I_{maxICA}$ ) em função da taxa de expansão do crescimento (parâmetro  $\gamma$ ), para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR.

#### 4. DISCUSSÃO

O espaçamento afeta o crescimento das árvores individualmente e do povoamento florestal. Em espaçamentos adensados, as taxas de utilização de recursos de crescimento (água, luz e nutrientes) são elevadas, resultando em antecipação dos picos de incrementos médios, e árvores médias menores (STAPE e BINKLEY, 2010; FORRESTER et al. 2013). Bernardo et al. (1998) relataram menor crescimento em altura no espaçamento mais reduzido (3,00 x 1,50 m), para *E. camaldulensis*, mas não observaram efeito do espaçamento sobre o crescimento em altura para *E. pellita* e *urophylla*. Gerrand e Neilsen (2000) relataram menor crescimento em altura em espaçamentos muito fechados (2,00 x 2,00 m) e, muito amplos (6,00 x 6,00 m), para *E. nitens*. O aumento do crescimento em altura com o aumento do arranjo espacial e espaçamento tem sido relatado por vários autores (LELES et al., 2001; RONDON, 2002; LEITE et al., 2006a; HARRINGTON et al., 2009; CROUS et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2016).

O efeito do adensamento na linha de plantio, reduzindo estimativas de altura total, foi relatado por Bernardo et al. (1998), para *E. camaldulensis*, em espaçamento 3,00 x 1,50 m. A menor altura média das árvores em plantios adensados pode estar relacionada à presença de árvores dominadas, ocorrendo de forma intensa e precoce (BALLONI e

SIMÕES, 1980; OLIVEIRA NETO et al., 2010). Porém, em outros estudos, não tem sido observada influência do arranjo espacial ou espaçamento sobre a altura (PINKARD e NEILSEN, 2003; MAGALHÃES et al., 2007; PAULA et al., 2013; PACHECO et al., 2015). Esses resultados podem estar relacionados aos genótipos e idades de avaliação.

A altura dominante, que foi afetada pelo genótipo e pelo espaçamento, corrobora com os resultados obtidos por Crous et al. (2013), que relataram maior crescimento em altura dominante para o híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*, no espaçamento de 3,5 x 3,5 m, em comparação com 2,5 x 2,5 m, e 2,2 x 2,2 m. Por outro lado, em alguns estudos não tem sido relatado efeito do espaçamento sobre o crescimento em altura dominante (BALLONI e SIMÕES, 1980; PAULA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2016). Para Campos e Leite (2017), a altura das árvores dominantes praticamente não é afetada pela competição, quando se considera um mesmo sítio.

Vários autores relatam, de forma consistente, que os espaçamentos mais amplos favorecem o crescimento em diâmetro das árvores (LELES et al., 2001; RONDON, 2002; PINKARD e NEILSEN, 2003; LEITE et al., 2006a; MAGALHÃES et al., 2007; HARRINGTON et al., 2009; OLIVEIRA NETO et al., 2010; INOUE et al., 2011; CROUS et al., 2013; LIN et al., 2013; PAULA et al., 2013; PACHECO et al., 2015). Os resultados do presente estudo mostram, também, que o maior crescimento em diâmetro foi observado no maior espaçamento (12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>), independentemente do clone.

O efeito do genótipo e do espaçamento sobre o crescimento em diâmetro das árvores, de forma individual e interativa, foi relatado por Magalhães et al. (2007). Crous et al. (2013) observaram maior diâmetro com o decréscimo da densidade de plantio, exceto para *E. sideroxylon*. Gerrand e Neilsen, (2000) observaram aumento de diâmetro de 11 cm para 18 cm, quando houve redução no *stand* de plantio, de 2500 para 500 árvores por hectare. Para estes autores, a variação na retangularidade de 1 a 3 não afetou o crescimento de *E. nitens*. Porém, Paula et al. (2013) relataram que distâncias reduzidas entre plantas na linha de plantio resultaram em maior número de indivíduos nas menores classes de diâmetro. Para Leite et al. (2006a), os espaçamentos mais amplos, além de proporcionar maior crescimento em diâmetro, também resultam em maior número de indivíduos nas maiores classes de diâmetro.

O volume individual é o resultado do crescimento em diâmetro e em altura das árvores (LEITE et al., 2006a). Existe consenso de que maiores espaçamentos resultam em maior volume por árvore e, também, que o genótipo pode afetar o crescimento em volume individual (MAGALHÃES et al., 2007; CROUS et al., 2013). Crous et al. (2013)

observaram maior volume individual com o aumento do espaçamento para *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. grandis* x *E. camaldulensis*, exceto para *E. sideroxylon*. Magalhães et al. (2007) observaram maior crescimento em volume individual apenas para três genótipos, dentre oito avaliados, com o maior valor (0,3835) observado no maior espaçamento (6,0 x 4,0 m). Paula et al. (2013) relataram que o volume individual no espaçamento de 9,0 x 3,0 m (370 árvores ha<sup>-1</sup>) foi 155% superior ao observado em 3,6 x 2,5 m (1.111 árvores ha<sup>-1</sup>), para o híbrido natural de *E. camaldulensis*. Pinkard e Neilsen (2003) observaram redução do volume individual de 0,31 m<sup>3</sup> para 0,15 m<sup>3</sup>, com o aumento da densidade de plantio (500-1.667 árvores ha<sup>-1</sup>), para *E. nitens*, aos 7 anos de idade. Pacheco et al. (2015) relataram que a diferenciação no volume individual entre os espaçamentos ocorreu a partir dos cinco anos de idade, para *Pinus taeda*.

A área basal é uma medida de densidade de plantio e reflete a ocupação da área pelos fustes das árvores no povoamento florestal. Desta forma, quanto menor for o espaçamento, maior será o número de árvores e, conseqüentemente, maior será a área basal, em povoamentos não desbastados (INOUE et al., 2011). Os resultados do presente estudo indicaram que o arranjo 3,75 x 2,40 m (9 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>) proporcionou a maior área basal para todos os clones. Contudo, com o adensamento na linha de plantio, mantendo-se 9 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>, houve menor crescimento da área basal para os clones C e D. Paula et al. (2013) relataram que a distância entre plantas na linha de plantio afetou mais o crescimento em área basal do que a distância entre linhas. Os clones A e B apresentaram o comportamento esperado, ou seja, menor área basal no arranjo espacial (4,00 x 3,00 m, 12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>).

Dentro de certos limites, quanto maior a densidade inicial de plantio maior será a produção do povoamento (CLUTTER et al., 1983; LEITE et al., 2006a; MAGALHÃES et al., 2007; PACHECO et al., 2015). Porém, há que se considerar o arranjo espacial de plantio quando estes apresentam o mesmo espaçamento, porque, no menor espaçamento (9 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>), com o arranjo 3,75 x 2,40 m, ocorreu a maior produção, sendo que no arranjo 6,00 x 1,50 m, com o mesmo espaçamento, a produção foi a mais baixa para os clones A, C e D. Magalhães et al. (2007) observaram maior produção (253,10 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) no espaçamento 3,00 x 2,00 m (6 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>) quando comparado à produção de 136,72 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no espaçamento 6,00 x 4,00 m (24 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>). Paula et al. (2013) observaram que a produção foi 38,3% superior em povoamentos com 833-1111 árvores ha<sup>-1</sup>, quando comparado com 370 a 556 árvores ha<sup>-1</sup>.

A ITC ocorre quando o IMA se iguala ao ICA e indica a idade mais adequada para a colheita, sob o ponto de vista de produtividade (DIAS et al., 2005). De forma geral, locais com maior capacidade produtiva devem apresentar menor ITC (DEMOLINARI et al., 2007). Assim, a menor ITC, também, deve ocorrer em espaçamentos reduzidos em comparação com espaçamentos amplos uma vez que, em espaçamentos reduzidos, a taxa de crescimento é mais acelerada (MELIDO 2012; OLIVEIRA 2014). Ou seja, quanto maior a área basal inicial, menor a ITC. Paula et al. (2013) relataram que, independentemente do arranjo espacial (3,6 x 2,5 m; 3,3 x 3,3 m; (2 x 2) + 10 m; (3 x 3) + 9 m; 9 x 3 m), a ITC ocorreu aos 48 meses, para *E. camaldulensis*, ou seja, apesar de proporcionar produção diferenciada, o espaçamento não afetou o ritmo de crescimento das árvores do povoamento. As diferenças entre taxas de crescimento inicial (ImaxICA), para os quatro clones indicaram que, além do espaçamento ou arranjo espacial, o clone, também, afetou a ITC.

## 5. CONCLUSÕES

A análise do crescimento de clones de eucalipto em diferentes arranjos espaciais de plantio constituiu-se em importante ferramenta para auxiliar na tomada de decisões sobre o melhor arranjo para o plantio dos clones mais produtivos. O clone B (híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis*), no arranjo 3,75 x 2,40 m, foi o mais produtivo e, o clone D (híbrido de *E. urophylla* x *E. globulus*), no arranjo 6,00 x 1,50, foi o menos produtivo nas condições em que o estudo foi realizado. A distância entre plantas na linha de plantio foi determinante para condicionar a redução de produtividade do povoamento. Plantas no arranjo 6,00 x 1,50 m apresentaram redução de produtividade na rotação regulatória de 5, 6 ou 7 anos, para todos os clones. Também, a idade técnica de corte foi maior nos tratamentos com menor taxa de crescimento inicial e maior idade de máximo incremento corrente anual. Os resultados, tomados em conjunto, indicam que os arranjos espaciais com maior retangularidade devem ser evitados, pois resultam em maior competição entre plantas, resultando em indivíduos com menor diâmetro médio e povoamentos de menor produtividade.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSMANN, E., **The principles of forest yield study**. New York: Pergamon Press, 1970. 506p.
- BELTRAME, R.; BISOGNIN, D. A.; MATTOS, B. D.; CARGNELUTTI FILHO, A.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; SANTOS, G. A. Desempenho silvicultural e seleção precoce de clones de híbridos de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 6, p. 791-796, 2012.
- BERNARDO, A. L.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; HARRISON, R. B.; FIRME, D. J. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 104, n. 1-3, p. 1-13, 1998.
- BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G. Thinking about resource use efficiency in forests. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 5-16. 2004.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5.ed. Viçosa: UFV, 2017. 636p.
- CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAYLEY, R. L. **Timber management: A quantitative approach**. New York: John Wiley e Sons, 1983. 333p.
- CROUS, J.; BURGER, L.; SALE, G. Growth response at age 10 years of five *Eucalyptus* genotypes planted at three densities on a drought-prone site in KwaZulu-Natal, South Africa. **Southern Forests**, v. 75, n. 4, p. 189–198, 2013.
- DEMOLINARI, R. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado (PA). **Revista Árvore**, v. 31 p. 503-512, 2007.
- DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, p. 731-739, 2005.
- FORRESTER, D. I.; WIEDEMANN, J. C.; FORRESTER, R. I.; BAKER, T. G. Effects of planting density and site quality on mean tree size and total stand growth of *Eucalyptus globulus* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 43, p. 846-851, 2013.
- GERRAND, A. M.; NEILSEN, W. A. Comparing square and rectangular spacings in *Eucalyptus nitens* using a Scotch plaid design. **Forest Ecology and Management**, v. 129, n. 1-3, p. 1-6, 2000.
- HARRINGTON, T. B.; HARRINGTON, C. A.; DEBELL, D. S. Effects of planting spacing and site quality on 25-year growth and mortality relationships of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*). **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 1, p. 18–25, 2009.
- HAKAMADA, R. H. R. M.; FERRAZ, S.; STAPE, J. L.; LEMOS, C. Biomass production and potential water stress increase with planting density in four highly

productive clonal *Eucalyptus* genotypes. **Southern Forests: Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 251-257, 2017.

HODECKER, B. E. R.; PITA-BARBOSA, A.; BARROS, N. F.; MERCHANT, A. Water availability preceding long-term drought defines the tolerance of *Eucalyptus* to water restriction. **New Forests**, v. 49, n. 2, p. 173-195, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – Ibá. **Relatório 2017**. Brasília, 2017.

INOUE, M. T.; FIGUEIREDO FILHO A.; LIMA R. Influência do espaço vital de crescimento na altura e diâmetro de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p. 377-385, 2011.

JESUS, G. L.; BARROS, N. F.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; HENRIQUES, E. P.; LIMA, V. C.; FERNANDES, L.V.; SOARES, E. M. B. Doses e fontes de nitrogênio na produtividade do eucalipto e nas frações da matéria orgânica em solo da região do cerrado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 201-214, 2012.

KRUSCHEWSKY, G. C.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; OLIVEIRA, T. K. Arranjo estrutural e dinâmica de crescimento de *Eucalyptus* spp., em sistema agroflorestal no Cerrado. **Cerne**, v. 13, p. 360-367, 2007.

LEITE, E. S.; MINETTE, L. J.; FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P.; AMARAL, E. J.; LAERCIO, E. G. Desempenho do harvester na colheita de eucalipto em diferentes espaçamentos e declividades. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 000-000, 2014.

LEITE, F. P.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SANS, L. M. A.; FABRES, A. S. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. **Revista Árvore**, v. 21, n. 3, p. 313-321, 1997.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 603-612, 2006a.

LEITE, H. G.; GAMA, J. R. V.; CRUZ, J. P.; SOUZA, A. L. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (ROLL.) WARB. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 99-106, 2006b.

LEITE, H. G.; OLIVEIRA-NETO, R. R.; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M.; BINOTI, M. L. M. S.; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, v. 39, p. 53-59, 2011.

LEITE, H. G.; ALCANTARA, A. E. M. D.; BINOTI, D. H. B.; OLIVEIRA NETO, R. R.; SILVA, M. L. M. D. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Árvore**, v. 37, p.321-328, n. 2, 2013.

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Crescimento, produção e alocação de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, n. 59, p. 77-87, 2001.

- LIN, Y.; YANG, H.; IVKOVIĆ, M.; GAPARE, W. J.; MATHESON, A. C.; WU, H. X. Effect of genotype by spacing interaction on radiata pine genetic parameters for height and diameter growth. **Forest Ecology and Management**, v. 304, p. 204-211, 2013.
- MAGALHÃES, W. M.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; HIGASHIKAWA, E. M.; JUNIOR, M. Y. Desempenho silvicultural de clones e espécies/procedências de *Eucalyptus* na região noroeste de Minas Gerais. **Revista Cerne**, v. 13, n. 4, p. 368- 375, 2007.
- MARTINS, R. J.; SEIXAS, F.; STAPE, J. L. Avaliação técnica e econômica de um harvester trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 253-263, 2009.
- MELIDO, R. C. N. **Avaliação técnica e econômica de dois projetos florestais com eucalipto para fins energéticos**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília.
- MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Variation of heartwood and sapwood in 18-year-old *Eucalyptus globulus* trees grown with different spacings. **Trees**, v. 23, n. 2, p. 367-372, 2009.
- MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 199-208, 2015.
- NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; REIS, G. G.; MOREIRA, A. M. Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 855-860, 2008.
- OLIVEIRA, C. H. R. **Produção de eucalipto em alto fuste e talhadia e de braquiária em sistemas silvipastoris com diferentes arranjos espaciais**. 2014. 106 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; NEVES, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, v. 27, n. 1, p. 15-23, 2003.
- OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; NEVES, J. C. L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. **Floresta**. Curitiba, v. 40, n. 4, p. 755-762, 2010.
- OLIVEIRA, T. K.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; HIGASHIKAWA, E. M. Desempenho silvicultural e produtivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema agrossilvipastoril. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 60, p. 1-9, 2009.
- PACHECO J. M.; FIGUEIREDO FILHO A. F.; DIAS N. A.; MACHADO A. S.; LIMA R. Efeito da densidade inicial no crescimento de *Pinus taeda* L. na região Centro Sul do Paraná. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 106, p. 353-365, 2015.
- PAULA, R. R.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H. G.; MELIDO, R. C. N.; LOPES, H. N. S.; SOUSA, F. C. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, v. 87, n. 6, p. 1285-1307, 2013.

PEREIRA, A. R.; MORAIS, E. J.; NASCIMENTO FILHO, M. B. Implantação de florestas de ciclos curtos sob novos modelos de espaçamentos. **Silvicultura**, v. 8, n. 28, p. 429-432, 1982.

PINKARD, E. A.; NEILSEN, W. A. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. **Forest Ecology and Management**, v. 172, n. 2-3, p. 215-227, 2003.

REGAZZI, A. J.; SILVA, C. H. O. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. I. Dados no delineamento inteiramente casualizado. **Revista de Matemática e Estatística**, v. 22, n. 3, p. 33-45, 2004.

REGAZZI, A. J.; SILVA, C. H. O. Testes para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear em dados de experimento com delineamento em blocos casualizados. **Revista Ceres**, v. 57, n. 3, p. 315-320, 2010.

REIS, G. G.; FREITAS, F. A.; REIS, M. G. F.; SOUZA, F. C.; BAIERO, D. S.; CACAU, F. V.; FARIA, R. S. Dieback, leaf area index and yield of young eucalypt clones plantation in the Brazilian savannah region. **Revista Árvore**, v. 41, n. 3, e410309 2017.

RIBEIRO, M. D. S. B.; JORGE, L. A. B.; MISCHAN, M. M.; SANTOS, A. L.; BALLARIN, A.W. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 31-45, 2017.

ROCHA, M. F. V.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARDOSO, M. T.; HEIN, P. R. G. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 28, n. 3, p. 243-248, 2016.

RONDON, E. V. Produção de biomassa e crescimento de árvores de *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke sob diferentes espaçamentos na região da mata. **Revista Árvore**, v. 26, n. 5, p. 573-576, 2002.

SANTOS, G. A.; XAVIER, A.; LEITE, H. G. Desempenho silvicultural de clones de *Eucalyptus grandis* em relação às árvores matrizes. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 737-747, 2006.

SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; CAMPOS, O.; STAPE, J. L. Yield pattern of eucalypt clones across tropical Brazil: an approach to clonal grouping. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 30-39, 2019.

SOUZA, R. R.; NOGUEIRA, G. S.; JÚNIOR, L. S. M.; PELLI, E.; DE OLIVEIRA, M. L. R.; ABRAHÃO, C. P.; LEITE, H. G. Forma de fuste de árvores de *Eucalyptus* em plantios com diferentes densidades iniciais. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 33-40, 2016.

SOUZA, T. D. S.; RAMALHO, M. A. P.; LIMA, B. M.; REZENDE, G. D. S. P. Performance of *Eucalyptus* clones according to environmental conditions. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 601-610, 2017.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 3-4, p. 920-930, 2008.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D. Insights from full-rotation Nelder spacing trials with *Eucalyptus* in São Paulo, Brazil. **Southern Forests**, v. 72, n. 2, p. 91-98, 2010.

VALERA, F. P.; KAGEYAMA, P. Y. Interação genótipo x espaçamento em progênies de *Eucalyptus saligna* Smith. **IPEF**, v. 39, p. 5-16, 1988.

WARREN, E.; SMITH, R. G. B.; APIOLAZA, L. A.; WALKER, J. C. Effect of stocking on juvenile wood stiffness for three *Eucalyptus* species. **New Forests**, v. 37, n. 3, p. 241-250, 2009.

XAVIER, A.; WENDLING, I.; SILVA, R. L. **Silvicultura clonal: princípios e técnicas**. Viçosa, MG: 2 ed. UFV, 272 p., 2013.

## CAPÍTULO II

### DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS DE CLONES DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ARRANJOS ESPACIAIS

#### Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do arranjo espacial (3,75 x 2,40 m; 6,00 x 1,50 m e 4,00 x 3,00 m) sobre a distribuição de diâmetros de clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (A, B) e de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* (C, D), empregando modelos de predição e de projeção. Os dados de diâmetro foram provenientes de 430 parcelas permanentes (418-611 m<sup>2</sup>), mensuradas entre 27 e 88 meses. Os parâmetros da função Weibull em uma idade qualquer ( $I_2$ ) foram correlacionados com características do povoamento (modelos de predição e de projeção) e, também, com os parâmetros na idade anterior ( $I_1$ ),  $I_1 < I_2$  (modelo de projeção). O ajuste do modelo de predição resultou em  $RQEM_\beta = 0,269$ ,  $RQEM_\gamma = 1,000$ ,  $R\hat{y}_{y\beta} = 0,999$  e  $R\hat{y}_{y\gamma} = 0,993$ , e o modelo de projeção apresentou  $RQEM_\beta = 0,351$ ,  $RQEM_\gamma = 1,013$ ,  $R\hat{y}_{y\beta} = 0,999$  e  $R\hat{y}_{y\gamma} = 0,993$ . Aos 84 meses de idade, houve maior número de árvores nas maiores classes de diâmetro, no espaçamento mais amplo (12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>). As distribuições de diâmetros ao longo das idades foram mais dependentes do clone do que do arranjo espacial. A função Weibull permitiu descrever a distribuição de diâmetros de clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, e os modelos de predição resultaram em exatidão semelhante à de modelos de projeção, considerando que as estimativas dos parâmetros sejam corrigidas pelos valores observados em idade anterior à de predição.

Palavras-chave: Distribuição de diâmetros, espaçamento, clones de eucalipto.

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of the planting arrangement (3,75 x 2,40 m; 6,00 x 1,50 m and 4,00 x 3,00 m) on the diameter distribution of hybrid clones of *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* (A, B) and *E. urophylla* x *E. globulus* (C, D), through prediction and projection models. The diameter data came from 430 permanent plots (418-611 m<sup>2</sup>), measured between 27 and 88 months. The parameters of the Weibull function, at any age ( $I_2$ ), were correlated with stand characteristics (prediction and projection models), and with the parameters in the previous age ( $I_1$ ),  $I_1 < I_2$  (projection model). In the projection model, the parameters of the diameter distribution in a future age (dependent variable) were obtained from these parameters in the current age (independent variable). The fit of the prediction model presented  $RQEM_\beta = 0.269$ ,  $RQEM_\gamma = 1.000$ ,  $R\hat{y}_{y\beta} = 0.999$  and  $R\hat{y}_{y\gamma} = 0.993$  and the projection model showed  $RQEM_\beta = 0.351$ ,  $RQEM_\gamma = 1.013$ ,  $R\hat{y}_{y\beta} = 0.999$  and  $R\hat{y}_{y\gamma} = 0.993$ . At 84 months of age, there was a larger number of trees in the largest diameter classes in the widest spacing (12 m<sup>2</sup> tree<sup>-1</sup>). The diameter distribution over age was more dependent on clone than on planting arrangement. The Weibull function allowed describing the diameter distribution of eucalypt clones in different planting arrangements. The prediction models resulted in accuracy similar to the projection models provided the correction of the parameter estimates by the values observed at the previous age of the prediction.

Key words: Diameter distribution, spacing, eucalypt clones.

## 1. INTRODUÇÃO

Os modelos de distribuição de diâmetros (MDD) permitem estimar o crescimento e a produção por classe de diâmetro (BINOTI et al., 2012; LEITE et al., 2013a). A partir desses modelos, é possível obter a distribuição de diâmetros de árvores em classes de diâmetro superiores para povoamentos desbastados (NOGUEIRA et al., 2005; LEITE et al., 2010), simular desbastes (BINOTI et al., 2012), projetar a distribuição de diâmetros para povoamentos desbastados e não desbastados e correlacionar o crescimento com variáveis ambientais (SANQUETTA et al., 2014). Ainda, fornecem subsídios para a avaliação econômica de povoamentos florestais, sendo essenciais quando há interesse em estimar multiprodutos da madeira (SOARES et al., 2003; CASTRO et al., 2011; CAMPOS; LEITE, 2017). Uma característica dos modelos de distribuição de diâmetros é o uso de uma função de densidade de probabilidade (CAMPOS; LEITE, 2017). Dentre as funções de densidade de probabilidade, destaca-se a função Weibull, que tem sido amplamente utilizada para caracterizar distribuições diamétricas de povoamentos florestais (ABREU et al. 2002; CAO, 2004; NOGUEIRA et al., 2006; SOARES et al., 2010; SANQUETTA et al., 2014; CASTRO et al., 2016; SCHMIDT et al., 2019).

A estimativa da distribuição de diâmetros do povoamento pode ser obtida por meio de modelos de predição ou de projeção (SOARES et al., 2011; LEITE et al., 2013a; BINOTI et al., 2014a). Para modelos de predição, os parâmetros da função densidade de probabilidade são correlacionados com características do povoamento por meio de regressão, incluindo a variável independente idade (CAMPOS; LEITE, 2017). No caso de modelos de projeção, os parâmetros da distribuição em uma idade futura são obtidos a partir desses mesmos parâmetros em idades atual e futura (LEITE et al., 2013a; BINOTI et al., 2014a), além de outros atributos do povoamento, na idade atual.

A escolha do espaçamento ou do arranjo espacial adequada para o plantio de espécies arbóreas é importante para a obtenção de povoamentos de alta produtividade, uma vez que a distância entre plantas na linha e entrelinha influenciam o uso de recursos de crescimento e, conseqüentemente, a produção florestal (BERNARDO et al., 1998; LELES et al. 2001; OLIVEIRA NETO et al. 2003; BINKLEY et al., 2004; PAULA et al., 2013). Espaçamentos mais amplos proporcionam menor competição por água, luz e nutrientes favorecendo a formação de plantas com maior diâmetro e (KRUCHEWSKY et al., 2007; MAGALHÃES et al., 2007; OLIVEIRA et al. 2009; PAULA et al., 2013; RIBEIRO et al., 2017; SCHMIDT et al., 2019). Portanto, uma análise importante é o estudo da distribuição de diâmetros, que pode ser feita com emprego de MDD.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do arranjo espacial sobre a distribuição de diâmetros de clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais de plantio, empregando modelo de distribuição de diâmetros. Desta forma, foram formuladas as seguintes hipóteses de trabalho:

H<sub>0(1)</sub>: Para um mesmo arranjo espacial, a distribuição de diâmetros ao longo das idades independe do clone.

H<sub>0(2)</sub>: A amplitude da distribuição de diâmetros em cada idade independe do arranjo espacial.

H<sub>0(3)</sub>: A amplitude da distribuição de diâmetros em cada idade independe do clone.

H<sub>0(4)</sub>: A amplitude da distribuição de diâmetros em cada idade independe do arranjo espacial e do clone.

H<sub>0(5)</sub>: O ingresso de árvores em sucessivas classes de diâmetro ao longo da idade independe do clone.

H<sub>0(6)</sub>: O ingresso de árvores em sucessivas classes de diâmetro ao longo da idade independe do arranjo espacial.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Descrição da Área de Estudo**

O estudo foi realizado no município de Congonhinhas PR (23°35'11"S e 50°32'33"W, altitude de 753 m). A temperatura média anual no local é de 20,0°C; e a precipitação média anual foi de 1.400 a 1.600 mm, com chuvas concentradas no verão, mas sem estação seca definida. A classe de solo predominante é o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, com horizonte A moderado ou A proeminente de textura argilosa ou muito argilosa. O relevo é suave ondulado.

### **2.2. Instalação do experimento**

O plantio foi realizado em julho de 2009 utilizando dois clones de *E. urophylla* x *E. grandis* (A, B) e dois de *E. urophylla* x *E. globulus* (C, D). Os espaçamentos utilizados foram os de 9 m<sup>2</sup> e 12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>, em três arranjos espaciais: 3,75 x 2,40 m; 6,00 x 1,50 m e 4,00 x 3,00 m, com retangularidades de 1,56, 4,00 e 1,33, respectivamente.

Antes do preparo do solo, aplicou-se 1,5 toneladas de calcário dolomítico, por hectare, em área total. O preparo do solo consistiu de subsolagem a 50 cm de profundidade na linha de plantio. A adubação foi de 250 kg/ha de NPK 06-30-06, aos 10 dias após o plantio, e 250 kg/ha de NPK 15-05-30, quatro meses após o plantio.

Foram instaladas aleatoriamente 430 parcelas permanentes de 418-611 m<sup>2</sup> aos dois anos de idade e mensuradas nas idades entre 27 e 88 meses (6 medições), com intervalos de aproximadamente, 12 meses, para medição da circunferência a 1,3 m de altura.

### 2.3. Modelagem da distribuição de diâmetros

A frequência diamétrica estimada foi obtida a partir dos dados da distribuição de diâmetros observada em cada parcela, nas seis idades de avaliação. A função de densidade de probabilidade utilizada foi a de Weibull de dois parâmetros, que possui a seguinte relação funcional:

$$f(X) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{x}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} e^{-\left( \frac{x}{\beta} \right)^\gamma} \right. \quad (1)$$

em que  $\beta$  = parâmetro de escala;  $\gamma$  = parâmetro de forma; e  $x$  = centro de classe de diâmetro.

Para cada um dos 430 ajustes realizados, foi aplicado o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov, para testar a hipótese de aderência à distribuição Weibull ( $\alpha=5\%$ ).

O modelo de predição dos parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  ajustados para cada tratamento (combinação clone e arranjo espacial) foi definido por:

$$\beta = e^{(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{I})} + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$\gamma = \alpha_0 + \alpha_1 I + \varepsilon_i \quad (3)$$

Para redistribuição dos diâmetros foram empregadas as seguintes transformações:

$$\beta_2 = \beta_1 e^{\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{I_2}} / e^{\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{I_1}} + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 (\alpha_0 + \alpha_1 I_2) / (\alpha_0 + \alpha_1 I_1) + \varepsilon_i \quad (5)$$

em que  $I_1$  e  $I_2$  são as idades atual e futura, respectivamente.

O modelo de projeção da distribuição de diâmetros foi uma adaptação do modelo de Nogueira et al. (2005), definido por: (6 e 7):

$$\beta_2 = \beta_1 e^{(-\alpha_0(I_2^{\alpha_1} - I_1^{\alpha_1}))} + \varepsilon_i \quad (6)$$

$$e \gamma_2 = \gamma_1 e^{(-\alpha_0(I_2^{\alpha_1} - I_1^{\alpha_1}))} + \varepsilon_i \quad (7)$$

em que  $I_1$  e  $I_2$  = idades atual e futura em meses;  $\beta_1$  e  $\beta_2$  = parâmetros de escala em idade atual e futura;  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  = parâmetros de forma em idade atual e futura;  $\alpha_0$  e  $\alpha_1$  = parâmetros.

O ajuste dos modelos foi feito pelo método de mínimos quadrados (Quase Newton) no software *Statistica 13* (STATSOFT, Inc., 2018).

#### 2.4. Avaliação da redistribuição teórica de diâmetros

A capacidade dos MDD em estimar os parâmetros da função Weibull em idades futuras foi avaliada por meio do cálculo da raiz quadrada do erro quadrático médio (*RQEM*) (8) entre os valores observados e estimados para os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$ , análise gráfica dos resíduos e frequência dos erros relativos percentuais (*ER%*) (9) por classe de diâmetro. Também, foram calculadas a média das diferenças (*MD*) (10), média das diferenças percentuais (*MDP*) (11) e o coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados para a idade futura  $I_2$  ( $R\hat{y}y$ ) (12):

$$RQEM = \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (8)$$

$$ER\% = 100 \left( \frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i} \right) \quad (9)$$

$$MD = n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (10)$$

$$MDP = 100 n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) Y_i \quad (11)$$

$$R\hat{y}y = \frac{n^{-1} \left( \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m) (Y_i - \bar{Y}) \right)}{\sqrt{\left( n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_m)^2 \right) \left( n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right)}} \quad (12)$$

em que  $Y_i$  = valor observado da variável em análise;  $\hat{Y}_i$  = valor estimado da variável em análise;  $\hat{Y}_m$  = média das estimativas de  $Y$ ;  $\bar{Y}$  = média aritmética de  $Y$  e  $n$  = número de observações.

A distribuição de diâmetros foi projetada para as idades exatas de 24, 36, 48, 60, 72 e 84 meses para todos os tratamentos.

### 3. RESULTADOS

Todos os 430 ajustes da função Weibull resultaram em aderência pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ( $p > 0,05$ ).

As equações para estimar os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$ , referente ao modelo de predição apresentaram  $R\hat{y}y$  variando de 0,9581 a 0,9896 para o parâmetro  $\beta$ , e  $R\hat{y}y$  variando de 0,0543 a 0,7641 para o parâmetro  $\gamma$ . Os baixos valores de  $R\hat{y}y$  para o parâmetro  $\gamma$  estão relacionados à ausência de uma tendência bem definida desse parâmetro ao longo das idades de avaliação. Entretanto, o modelo de predição resultou em exatidão quando as estimativas dos parâmetros foram corrigidas pelos valores observados em idade anterior à de predição (Forma de aplicação) (Tabela 1).

O ajuste do modelo de projeção por tratamento não foi eficiente, possivelmente devido a limitação dos dados para o ajuste não linear quando se fez a estratificação por tratamento. Dessa forma, para projeção, foi ajustado um único modelo, que apresentou  $R\hat{y}y = 0,9863$  para o parâmetro  $\beta$ , e  $R\hat{y}y = 0,9627$  para o parâmetro  $\gamma$  (Tabela 1).

Tabela 1 – Equações de predição e projeção dos parâmetros da função Weibull, para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

Clone	Espaçamento (m)	Equação	R <sup>2</sup> y	Forma de aplicação
Modelo de predição				
A	3,75 x 240	$\hat{\beta} = e^{3,33470-22,35838 I^{-1}}$	0,9896	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,33470-22,35838 I_f^{-1}} / e^{3,33470-22,35838 I_a^{-1}}$
A	3,75 x 240	$\hat{\gamma} = 19,62039 - 0,14600 I$	0,4973	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(19,62039 - 0,14600 I_f)(19,62039 - 0,14600 I_a)^{-1}$
A	6,00 x 1,50	$\hat{\beta} = e^{3,34348-24,45337 I^{-1}}$	0,9612	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,34348-24,45337 I_f^{-1}} / e^{3,34348-24,45337 I_a^{-1}}$
A	6,00 x 1,50	$\hat{\gamma} = 14,13888 - 0,08607 I$	0,2804	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(14,13888 - 0,08607 I_f)(14,13888 - 0,08607 I_a)^{-1}$
A	4,00 x 3,00	$\hat{\beta} = e^{3,44307-26,34755 I^{-1}}$	0,9890	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,44307-26,34755 I_f^{-1}} / e^{3,44307-26,34755 I_a^{-1}}$
A	4,00 x 3,00	$\hat{\gamma} = 20,28106 - 0,09641 I$	0,3063	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(20,28106 - 0,09641 I_f)(20,28106 - 0,09641 I_a)^{-1}$
B	3,75 x 240	$\hat{\beta} = e^{3,26728-15,70535 I^{-1}}$	0,9855	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,26728-15,70535 I_f^{-1}} / e^{3,26728-15,70535 I_a^{-1}}$
B	3,75 x 240	$\hat{\gamma} = 10,26451 - 0,07711 I$	0,5993	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(10,26451 - 0,07711 I_f)(10,26451 - 0,07711 I_a)^{-1}$
B	6,00 x 1,50	$\hat{\beta} = e^{3,27459-17,16665 I^{-1}}$	0,9688	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,27459-17,16665 I_f^{-1}} / e^{3,27459-17,16665 I_a^{-1}}$
B	6,00 x 1,50	$\hat{\gamma} = 9,42949 - 0,05456 I$	0,5271	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(9,42949 - 0,05456 I_f)(9,42949 - 0,05456 I_a)^{-1}$
B	4,00 x 3,00	$\hat{\beta} = e^{3,39913-16,82811 I^{-1}}$	0,9847	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,39913-16,82811 I_f^{-1}} / e^{3,39913-16,82811 I_a^{-1}}$
B	4,00 x 3,00	$\hat{\gamma} = 12,94493 - 0,09863 I$	0,6419	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(12,94493 - 0,09863 I_f)(12,94493 - 0,09863 I_a)^{-1}$
C	3,75 x 240	$\hat{\beta} = e^{3,12142-16,19436 I^{-1}}$	0,9581	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,12142-16,19436 I_f^{-1}} / e^{3,12142-16,19436 I_a^{-1}}$
C	3,75 x 240	$\hat{\gamma} = 9,73873 - 0,03838 I$	0,1822	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(9,73873 - 0,03838 I_f)(9,73873 - 0,03838 I_a)^{-1}$
C	6,00 x 1,50	$\hat{\beta} = e^{3,07848-16,48989 I^{-1}}$	0,9721	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,07848-16,48989 I_f^{-1}} / e^{3,07848-16,48989 I_a^{-1}}$
C	6,00 x 1,50	$\hat{\gamma} = 7,40077 - 0,00247 I$	0,0210	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(7,40077 - 0,00247 I_f)(7,40077 - 0,00247 I_a)^{-1}$
C	4,00 x 3,00	$\hat{\beta} = e^{3,21620-18,57072 I^{-1}}$	0,9595	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,21620-18,57072 I_f^{-1}} / e^{3,21620-18,57072 I_a^{-1}}$
C	4,00 x 3,00	$\hat{\gamma} = 14,66947 - 0,07188 I$	0,2681	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(14,66947 - 0,07188 I_f)(14,66947 - 0,07188 I_a)^{-1}$
D	3,75 x 240	$\hat{\beta} = e^{3,09751-18,10338 I^{-1}}$	0,9803	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,09751-18,10338 I_f^{-1}} / e^{3,09751-18,10338 I_a^{-1}}$
D	3,75 x 240	$\hat{\gamma} = 18,85753 - 0,05956 I$	0,3709	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(18,85753 - 0,05956 I_f)(18,85753 - 0,05956 I_a)^{-1}$
D	6,00 x 1,50	$\hat{\beta} = e^{3,07010-17,51616 I^{-1}}$	0,9846	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,07010-17,51616 I_f^{-1}} / e^{3,07010-17,51616 I_a^{-1}}$
D	6,00 x 1,50	$\hat{\gamma} = 16,46632 - 0,09823 I$	0,7641	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(16,46632 - 0,09823 I_f)(16,46632 - 0,09823 I_a)^{-1}$
D	4,00 x 3,00	$\hat{\beta} = e^{3,20480-18,90314 I^{-1}}$	0,9666	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{3,20480-18,90314 I_f^{-1}} / e^{3,20480-18,90314 I_a^{-1}}$
D	4,00 x 3,00	$\hat{\gamma} = 14,68339 - 0,01384 I$	0,0543	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a(14,68339 - 0,01384 I_f)(14,68339 - 0,01384 I_a)^{-1}$
Modelo de projeção				
Geral	Geral	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{30,16589(I_f^{-1,161514} - I_a^{-1,161514})}$	0,9863	$\hat{\beta}_f = \beta_a e^{30,16589(I_f^{-1,161514} - I_a^{-1,161514})}$
Geral	Geral	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a e^{0,002388(I_f^{2,16432} - I_a^{2,16432})}$	0,9627	$\hat{\gamma}_f = \gamma_a e^{0,002388(I_f^{2,16432} - I_a^{2,16432})}$

O modelo de predição apresentou desempenho similar ao modelo de projeção, o que é corroborado pelos valores do coeficiente de determinação para os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$ .

Também, a partir da análise de resíduos foram observadas estimativas precisas e não tendenciosas para os dois modelos (Figuras 1 e 2).

A partir da análise gráfica da distribuição de frequência por classe de ER%, foi observada uma distribuição tendendo a distribuição normal para os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  (Figuras 1 e 2) tanto para os modelos de predição quanto para os de projeção.

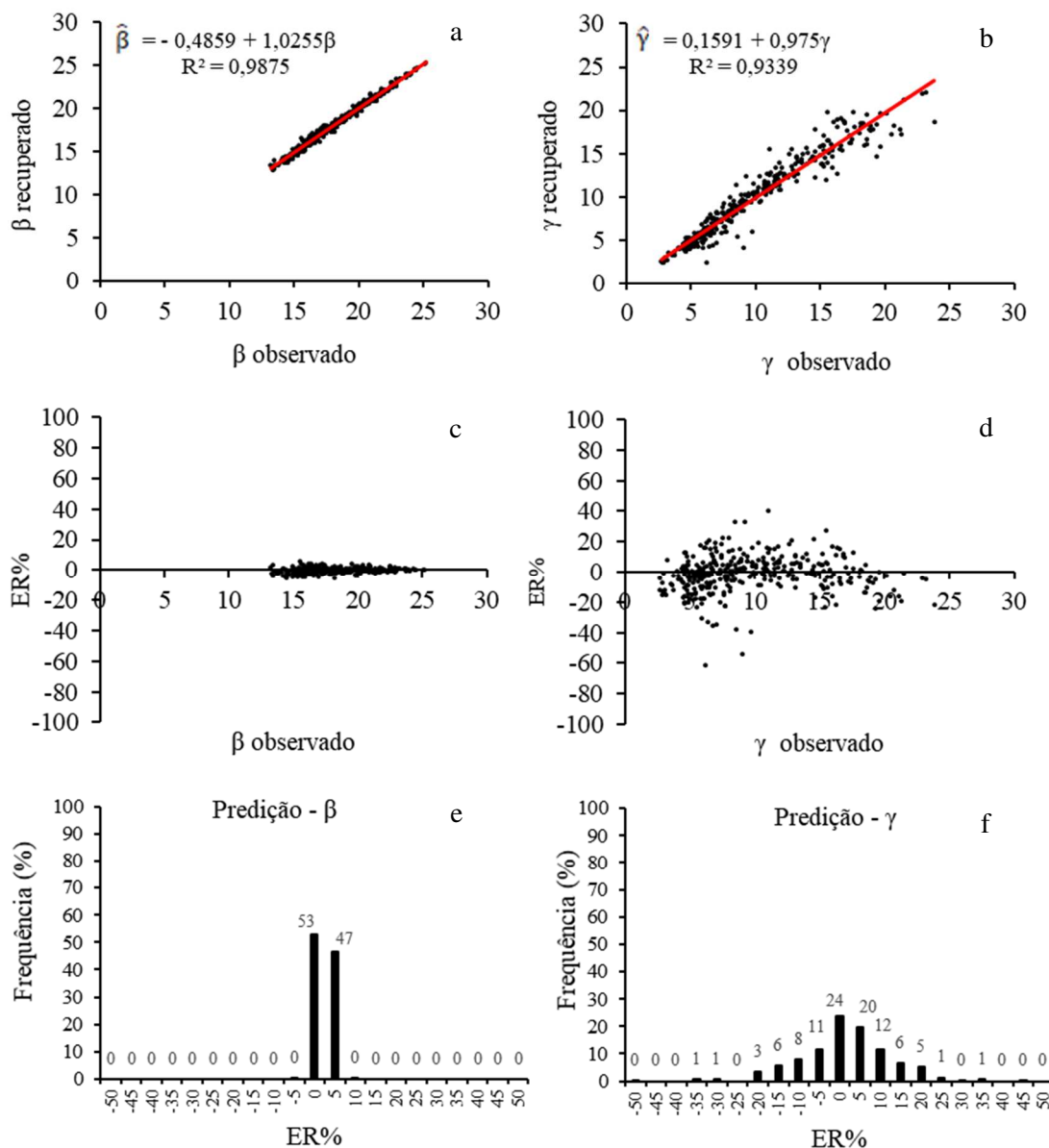


Figura 1 – Valores observados e recuperados dos parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  da função Weibull (a, b); distribuição dos desvios percentuais (ER%) (c, d), sendo  $ER\% = 100(\beta_{recuperado} - \beta_{observado}) / \beta_{observado}$ ; distribuição das classes de erro por frequência, em porcentagem dos parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  (e, f); aplicação dos sistemas de equação para modelos de predição (a, b, c, d, e, f), para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

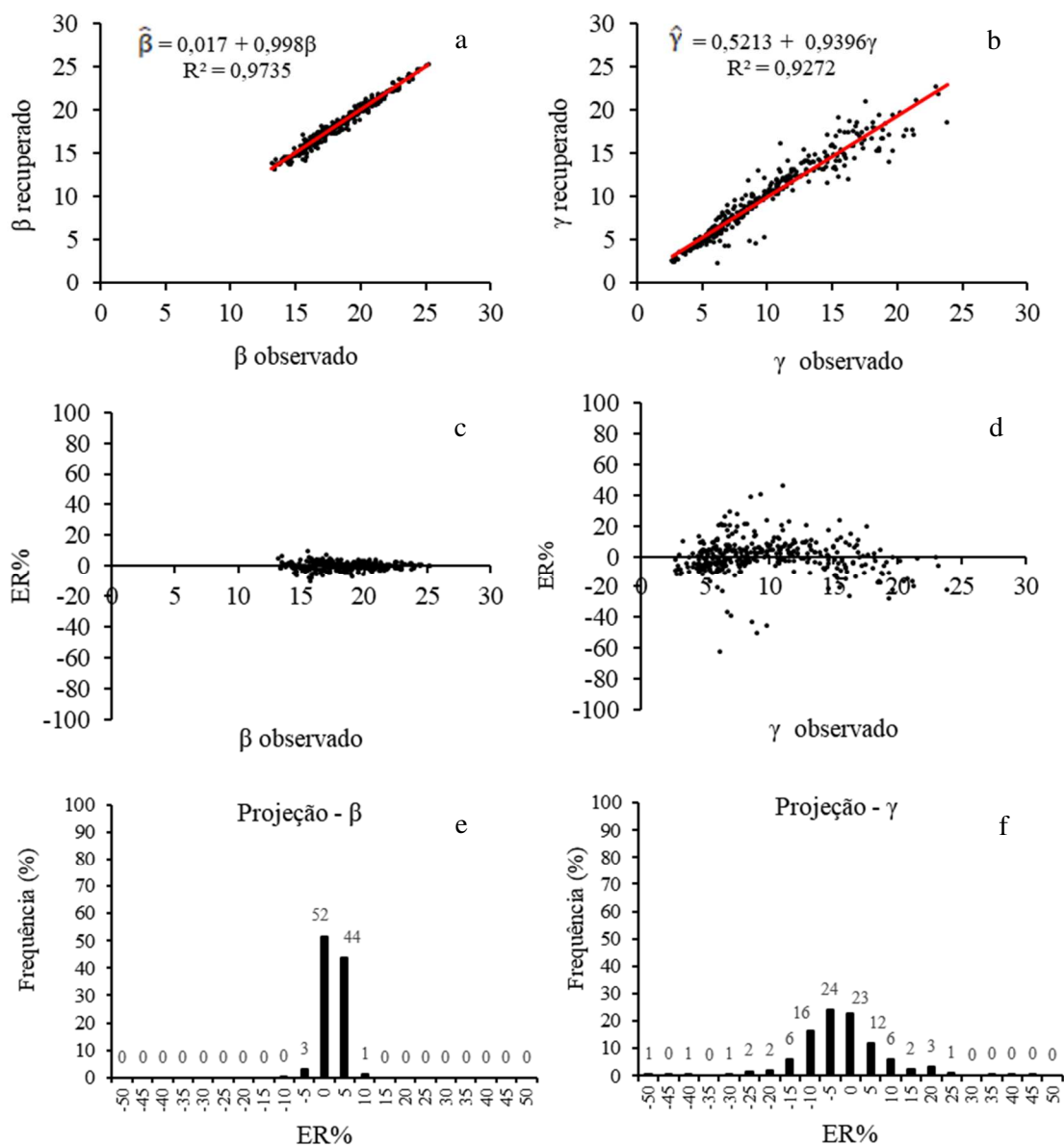


Figura 2 – Valores observados e recuperados dos parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  da função Weibull (a, b); distribuição dos desvios percentuais (ER%) (c, d), sendo  $ER\% = 100(\beta \text{ recuperado} - \beta \text{ observado})/\beta \text{ observado}$ ; distribuição das classes de erro por frequência, em porcentagem dos parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  (e, f); aplicação dos sistemas de equação para modelos de projeção (a, b, c, d, e, f), para clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

As estatísticas de precisão e de exatidão das estimativas dos parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$ , calculadas por tratamento (clone x arranjo espacial), foram:  $RQEM_{\beta} = 0,269$ ,  $RQEM_{\gamma} = 1,000$ ,  $R\hat{y}_{\beta} = 0,999$  e  $R\hat{y}_{\gamma} = 0,993$  (modelo de predição), e para o modelo de projeção foram:  $RQEM_{\beta} = 0,3508$ ,  $RQEM_{\gamma} = 1,013$ ,  $R\hat{y}_{\beta} = 0,999$  e  $R\hat{y}_{\gamma} = 0,993$ , ou seja, estatísticas muito semelhantes (Tabela 2).

Tabela 2 – Estatísticas utilizadas para avaliar os modelos de predição e de projeção da distribuição de diâmetros de clones de eucalipto em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

Clone	Espaçamento	$MDA_{\beta}$	$MDA_{\gamma}$	$MDP_{\beta}$	$MDP_{\gamma}$	$RQEM_{\beta}$	$RQEM_{\gamma}$	$R\hat{y}_{\beta}$	$R\hat{y}_{\gamma}$
Modelos de predição									
A	3,75 x 240	-0,0019	-0,2775	-0,0593	-3,0785	0,2237	1,3855	0,9999	0,9908
A	6,00 x 1,50	-0,0165	-0,1830	-0,1487	-3,4210	0,2269	0,5826	0,9999	0,9982
A	4,00 x 3,00	-0,0160	-0,1329	-0,1535	1,1954	0,2097	1,3772	0,9999	0,9952
B	3,75 x 240	-0,0200	-0,1667	-0,1287	-4,5840	0,2620	0,7668	0,9999	0,9873
B	6,00 x 1,50	0,0025	-0,0956	-0,0476	-2,3168	0,2947	0,5640	0,9998	0,9952
B	4,00 x 3,00	-0,0602	0,1029	-0,3759	-1,1588	0,3056	1,2594	0,9999	0,9818
C	3,75 x 240	-0,0379	-0,0401	-0,2760	-1,8585	0,2809	0,6808	0,9997	0,9945
C	6,00 x 1,50	-0,0295	0,1155	-0,2556	2,0251	0,2748	1,1098	0,9998	0,9868
C	4,00 x 3,00	-0,0420	-0,0745	-0,2809	-1,2896	0,2676	0,6990	0,9998	0,9977
D	3,75 x 240	0,0052	-0,1528	-0,0682	0,2441	0,3207	1,6683	0,9997	0,9928
D	6,00 x 1,50	-0,0433	-0,0689	-0,3245	-0,4985	0,3004	0,5320	0,9998	0,9987
D	4,00 x 3,00	0,0173	0,2075	0,1137	2,1000	0,2586	1,3754	0,9998	0,9947
Modelos de projeção									
A	3,75 x 240	-0,3000	0,5123	-1,6632	4,8408	0,3716	1,4974	0,9997	0,9898
A	6,00 x 1,50	-0,4694	0,0788	-2,6599	-0,2229	0,4993	0,6609	0,9995	0,9975
A	4,00 x 3,00	-0,6561	-0,1862	-3,5032	0,8550	0,6716	1,3794	0,9991	0,9951
B	3,75 x 240	0,3052	0,2636	1,6163	3,3566	0,3707	0,7163	0,9997	0,9899
B	6,00 x 1,50	0,1780	0,0357	0,9372	-0,0957	0,3204	0,5106	0,9998	0,9959
B	4,00 x 3,00	0,2328	0,6424	1,0779	6,5888	0,2779	1,2405	0,9999	0,9818
C	3,75 x 240	0,1667	-0,1920	0,9887	-3,9161	0,3337	0,6744	0,9997	0,9946
C	6,00 x 1,50	0,1433	-0,4253	0,8665	-5,5886	0,2627	1,0820	0,9998	0,9863
C	4,00 x 3,00	-0,0207	-0,0777	-0,1217	-1,2869	0,2571	0,6799	0,9999	0,9978
D	3,75 x 240	0,0747	-0,6903	0,4277	-3,3505	0,2662	1,7706	0,9998	0,9923
D	6,00 x 1,50	0,1045	0,1871	0,7339	2,0849	0,2964	0,5476	0,9997	0,9986
D	4,00 x 3,00	0,0249	-0,7378	0,2116	-4,9355	0,2818	1,3912	0,9998	0,9946

$\beta, \gamma$  = Parâmetros da função Weibull, raiz quadrada do erro médio ( $RQEM$ ); média das diferenças absolutas ( $MDA$ ); média das diferenças percentuais ( $MDP$ ); coeficiente de correlação ( $R\hat{y}$ ).

A distribuição de diâmetros é influenciada pelo espaçamento e pelo arranjo espacial, e pelo genótipo. Aos 84 meses de idade, no espaçamento mais amplo (12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>), a frequência de árvores foi maior nas classes de diâmetro superiores. Entre os arranjos espaciais com menor espaçamento (9 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>), aquele com maior distância entre plantas na linha de plantio (3,75 x 2,40 m) apresentou maior frequência de árvores nas maiores classes de diâmetro (clones B e C) (Figura 3).

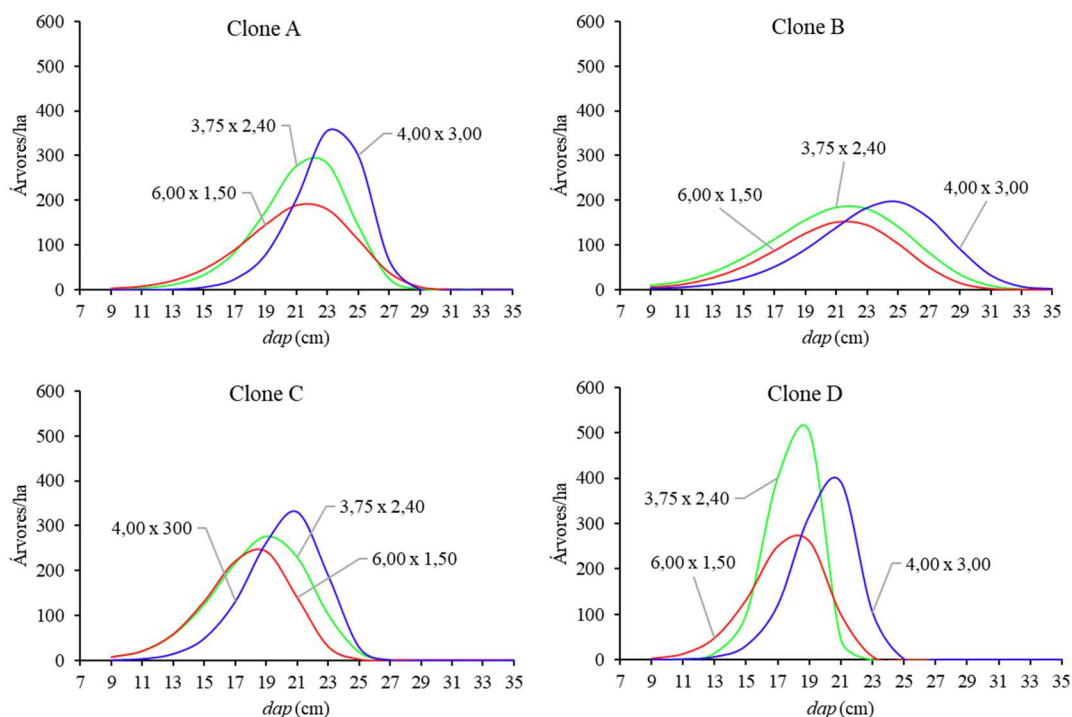


Figura 3 – Distribuições de diâmetros projetadas para a idade de 84 meses após o plantio para clones de eucalipto em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

As distribuições de diâmetros se deslocaram para a direita ao longo das idades, ou seja, houve aumento do número de árvores nas maiores classes de diâmetro e redução nas menores classes de diâmetro. Também, foi observado achatamento das curvas, ao longo do tempo, indicando maior abrangência de classes de diâmetro (Figura 4).

O clone B apresentou a maior amplitude da distribuição de diâmetros em cada idade, e o clone D apresentou a menor amplitude da distribuição de diâmetros em cada idade, independentemente do arranjo espacial. A amplitude da distribuição de diâmetros em cada idade foi menos afetada pelo arranjo de plantio do que pelo clone. Contudo, os clones B e D apresentaram maior amplitude da distribuição de diâmetros no arranjo espacial 4,00 x 3,00 m ( $12 \text{ m}^2 \text{ árvore}^{-1}$ ), em relação aos arranjos com espaçamento de  $9 \text{ m}^2 \text{ árvore}^{-1}$  (Figura 4).

Redução das áreas relacionadas aos ingressos de árvores em sucessivas classes de diâmetro foi observada, principalmente, a partir de 48 meses, indicando que a partir desta idade há maior competição por recursos de crescimento. As áreas de ingressos em sucessivas classes de diâmetro ao longo da idade foram, principalmente, dependentes do clone.

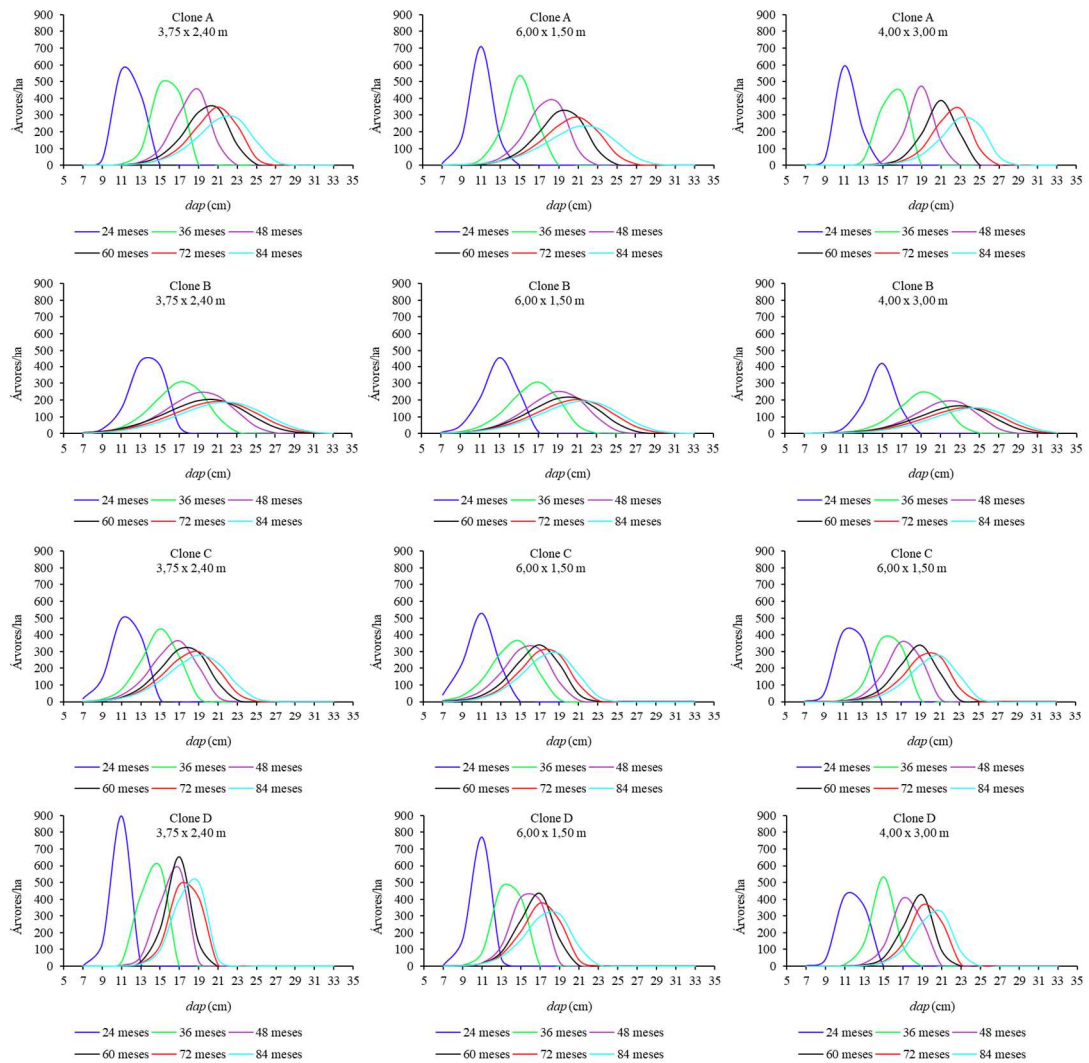


Figura 4 - Distribuições de diâmetros projetadas para as idades de 24, 36, 48, 60, 72 e 84 meses após o plantio para clones de eucalipto em diferentes arranjos espaciais, em Congonhinhas, PR

#### 4. DISCUSSÃO

A aderência da função Weibull aos dados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, observada neste estudo, também foi relatada em outros trabalhos (ARCE, 2004; NOGUEIRA et al., 2006; LEITE et al., 2010; SOARES et al., 2010; SANQUETTA et al., 2014; BINOTI et al., 2015a; CASTRO et al., 2016). Estes resultados demonstram a capacidade da função Weibull em descrever a distribuição de diâmetros de povoamentos florestais (CAO, 2004). A aplicação desta função para descrever a estrutura diamétrica de florestas equiâneas (SOUZA et al., 2016), também, está relacionada a sua flexibilidade para descrever diferentes tendências de crescimento ao longo das idades (SOARES et al., 2010; SANQUETTA et al., 2014; CAMPOS; LEITE, 2017), e à sua elevada correlação com características do povoamento (NOGUEIRA, et al. 2005; ARAÚJO JÚNIOR et al.,

2010; BINOTI et al., 2014a). Para Abreu et al. (2002), a função Weibull apresentou maior precisão ao descrever a distribuição de diâmetros de *E. grandis* do que as funções Beta e Sb de Johnson. Por outro lado, Azevedo et al. (2016), relataram 86% de aderência dos diâmetros observados à função Weibull, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ( $p < 0,01$ ), e valores de  $R^2$  em torno de 0,50 para os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$ , que foram considerados baixos. Machado et al. (2009) relataram falta de aderência da função Weibull à distribuição de diâmetros de *Araucaria angustifolia* proveniente de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista.

A distribuição de frequência, por clone, de ER% para os parâmetros de escala e forma estão de acordo com os resultados apresentados por Leite et al. (2013) para sistemas de equações, ou seja, os gráficos de resíduos apresentaram distribuição aproximadamente normal, mantendo a qualidade de ajuste dos modelos de projeção em relação aos modelos de predição. Para estes autores, os modelos de predição, quando comparados a modelos de projeção, proporcionaram maior diferença entre as frequências observadas e estimadas, com tendência de superestimar os valores nas maiores classes de *dap*. Por outro lado, o modelo de projeção apresenta correlação significativa entre os parâmetros da função Weibull, em idade atual e futura, e não apresentam tendenciosidade (BINOTI et al., 2015b). Modelos de projeção têm sido utilizados ajuste satisfatório em povoamentos de *Tectona grandis* e eucalipto, com ou sem desbaste (NOGUEIRA et al., 2005; LEITE et al., 2006a; LEITE et al., 2013).

Elevados coeficientes de correlação indicam que as variáveis independentes selecionadas exercem grande influência sobre as variáveis dependentes (NOGUEIRA et al., 2005; BINOTI et al., 2015a). Destaca-se que os elevados coeficientes de correlação para os modelos de predição e projeção foram superiores aos relatados por vários autores (LEITE et al., 2006a; LEITE et al., 2013; BINOTI et al., 2013; BINOTI et al., 2015b).

Normalmente, os modelos utilizados para o estudo da distribuição de diâmetros apresentam resultados satisfatórios para a estimativa do parâmetro de escala (BINOTI et al., 2014b). Contudo, o parâmetro de forma pode apresentar maior dispersão dos erros e menores valores do coeficiente de correlação, em povoamentos de eucalipto (NOGUEIRA et al., 2005).

A menor competição entre árvores ocorre em menores densidades de plantio, resultando em maiores incrementos de diâmetro, e conseqüentemente maior mudança de árvores para sucessivas classes de diâmetro (SCHMIDT et al., 2019). O maior número de árvores nas maiores classes de diâmetro, em espaçamentos mais amplos, também foi

relatado para *E. camaldulensis* (OLIVEIRA NETO, et al., 2010) e para *Pinus Taeda* L. (LEITE et al., 2006b). Oliveira Neto et al. (2010) relataram maior efeito da adubação sobre o crescimento em diâmetro nos menores espaçamentos. Estes resultados indicam que o menor crescimento do diâmetro em espaçamentos adensados deve estar associado a menor disponibilidade de recursos de crescimento às árvores, principalmente nutrientes. Para Sanquetta et al. (2014), povoamentos florestais submetidos a regimes de precipitação reduzida apresentaram maior frequência de árvores nas menores classes de diâmetro, enquanto sob regimes de elevada precipitação há maior frequência de árvores nas maiores classes de diâmetro.

Em povoamentos equiâneos, é comum que as distribuições de diâmetros se achatem e desloquem para a direita com aumento da idade (TÉO, et al., 2011, SANQUETTA et al., 2014; SCHMIDT et al., 2019) e que as áreas correspondentes aos ingressos em sucessivas classes de diâmetros diminuam ao longo do tempo em povoamentos desbastados e não desbastados. Estes resultados estão relacionados com redução do espaço disponível e aumento da competição por recursos de crescimento, que deixam de proporcionar o crescimento adequado das árvores.

## 5. CONCLUSÕES

Os modelos de predição e projeção apresentaram estimativas precisas e não tendenciosas da distribuição de diâmetros, podendo ser usados para gerar estimativas precisas do volume de madeira por classe de diâmetro. O espaçamento mais amplo (12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>), resultou em maior número de árvores nas maiores classes de diâmetro, e o arranjo espacial de maior retangularidade (6,00 x 1,50 m) em maior frequência de árvores em classes de diâmetro reduzido. Para um mesmo arranjo espacial, a distribuição de diâmetros ao longo das idades foi dependente do clone. A amplitude da distribuição de diâmetros e o ingresso de árvores em sucessivas classes de diâmetro, ao longo do tempo, foram mais influenciados pelo clone do que pelo arranjo espacial.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, E. C. R.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M.; KANEGAE, H. Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, n. 61, p. 86-102, 2002.

ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; NOGUEIRA, G. S.; DE OLIVEIRA, M. L. R.; DE MIRANDA, R. O. V.; CASTRO, R. V. O.; PELLI, E. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de *Eucalyptus* em diferentes amplitudes de classe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 11, p. 1275-1281, 2010.

ARCE, J. E. Modelagem da estrutura de florestas clonais de *Populus deltoides* Marsh. através de distribuições diamétricas probabilísticas. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 1, p. 149-164, 2004.

AZEVEDO, G. B.; OLIVEIRA, E. K. B.; AZEVEDO, G. T. D. O. S.; BUCHMANN, H. M.; MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 383-392, 2016.

BERNARDO, A. L.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; HARRISON, R. B.; FIRME, D. J. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 104, n. 1-3, p. 1-13, 1998.

BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G. Thinking about resource use efficiency in forests. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 5-16. 2004.

BINOTI, D. H. B., BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Utilização da função pearson tipo V, Weibull e hiperbólica para modelagem da distribuição de diâmetros. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 75, p. 279-286, 2013.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G.; GARCIA, S. L. R.; SILVA, A. A. L.; PONTES, C. Utilização de redes neurais artificiais para a projeção da distribuição diamétrica de povoamento equiâneos. **Revista Árvore**. V. 38, n. 4, p. 747-754. 2014a.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Projeção da Distribuição Diamétrica de povoamentos equiâneos utilizando a função Nakagami e Weibull. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 5, n. 2, p. 103-110, 2014b.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Análise da função log-logística para modelagem da distribuição de diâmetros. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 943-951, 2015a.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos de eucalipto utilizando a função logística generalizada. **Revista Árvore**, v. 39, n. 4, p. 707-711, 2015b.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5 ed. Viçosa: UFV, 2017. 636p.

CAO, Q.V. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. **Forest Science**, v. 50, n. 5, p. 682-685. 2004.

CASTRO, R. V. O.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; SOARES, C. P. B.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; CASTRO, A. F. N. M.; CRUZ, J. P.; SANTOS, F. L.; SOUZA, C. C. Avaliação econômica de um povoamento de eucalipto desbastado e destinado a multiprodutos de madeira. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p. 351-357, 2011.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 3, p. 287-295, 2013.

CASTRO, R. V. O.; ARAÚJO, R.A.A.; LEITE, H.G.; CASTRO, A. F. N. M; SILVA, A.; PEREIRA, R. S; LEAL, F. A. Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 1-11. 2016.

KRUSCHEWSKY, G. C.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; OLIVEIRA, T. K. de. Arranjo estrutural e dinâmica de crescimento de *Eucalyptus* spp., em sistema agrossilvipastoril no cerrado. **Cerne**, v. 13, n. 4, p. 360-367, 2007.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; CAMPOS, J. C. C.; SOUZA, A. L.; CARVALHO, A. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamento de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v. 29, n. 2, p. 271-280, 2005.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; CAMPOS, J. C. C.; RODRIGUES, F. L. Um modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 89-98, 2006a.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis do povoamento de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n. 4, p. 603-612, 2006b.

LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; GUIMARÃES, D. P.; SILVA, M. L. M.; GARCIA, S. L. R. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 305-311, 2010.

LEITE, H. G.; ALCÂNTARA, A. E. M.; BINOTI, D. H. B.; OLIVEIRA NETO, R. R.; SILVA, M. L. M. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Árvore**, v. 37, n. 2, p. 321-328. 2013.

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Crescimento, produção e alocação de *Eucalyptus camaldulensis* E. *pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, n. 59, p. 77-87, 2001.

MACHADO, S. A.; AUGUSTYNICZIK, A. L. D.; NASCIMENTO, R. G. M.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R.; MIGUEL, E. P.; TÉO, S. J. Distribuição diamétrica de *Araucaria angustifolia* (Berth.) O. Ktze. em um fragmento de floresta ombrófila mista. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 2, p. 103-110, 2009.

MAGALHÃES, W. M; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N; HIGASHIKAWA, E. M.; JUNIOR, M. Y. Desempenho silvicultural de clones e espécies/procedências de *Eucalyptus* na região noroeste de Minas Gerais. **Revista Cerne**, v. 13, n. 4, p. 368- 375, 2007.

NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; CARVALHO, A. F.; SOUZA, A. L. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 579-589, 2005.

- NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; TAKIZAWA, F. H.; COUTO, L. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 377-387, 2006.
- OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; NEVES, J. C. L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. **Floresta**. Curitiba, v. 40, n. 4, p. 755-762, 2010.
- OLIVEIRA, T. K.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; HIGASHIKAWA, E. M. Desempenho silvicultural e produtivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema agrossilvipastoril. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 60, p. 1-9, 2009. Edição especial
- OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; & NEVES, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, v. 27, n. 1, p. 15-23, 2003.
- OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; NEVES, J. C. L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. **Floresta**. v. 40, n. 4, p.755-762, 2010.
- PAULA, R. R.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H. G.; MELIDO, R. C. N.; LOPES, H. N. S.; SOUSA, F. C. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, v. 87, n. 6, p. 1285-1307, 2013.
- RIBEIRO, M. D. D. S. B.; JORGE, L. A. B.; MISCHAN, M. M.; DOS SANTOS, A. L.; BALLARIN, A. W. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 31-45, 2017.
- SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; DALLA CORTE, A. P.; NETTO, S. P.; RODRIGUES, A. L.; SIMON, A. A. A model based on environmental factors for diameter distribution in black wattle in Brazil. **PloS One**, v. 9, n. 6, p. e100093, 2014.
- SCHMIDT, L. N.; MACHADO, S. D. A.; PELISSARI, A. L.; SILVA, G. F. D. Dynamics of *Eucalyptus* diameter distribution in the State of Minas Gerais. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, p. e20170156, 2019.
- SOARES, T. S., LEITE, H. G., SOARES, C. P. B., VALE, A. B. Comparação de diferentes abordagens na modelagem da distribuição diamétrica. **Floresta**, v. 40, n. 4, 2010.
- SOARES, T. S.; VALE, A. B.; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, v. 27, n. 6, p. 811-820, 2003.
- SOARES, T. S.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; VALE, A. B. Projeção da distribuição diamétrica e produção de povoamentos de eucalipto empregando diferentes formas da função weibull. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 1027–1032, 2011.

SOUZA, L. A.; MATIAS, H. B.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H.G.; MENDONÇA, A. R.; SILVA, G. F. CRUZ, J. P. Funções densidade de probabilidade para a descrição da distribuição de diâmetros em povoamentos florestais desbastados. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 34, n. 3, p. 421–434, 2016.

STATSOFT, INC. Statistica (Data Analysis Software System), Version 13, 2018.

TÉO, S. J.; DA ROCHA, S. P.; BORTONCELLO, A. C.; PAZ, R. A.; DA COSTA, R. H. Dinâmica da distribuição diamétrica de povoamentos de *Pinus taeda*, na região de Caçador, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 67, p. 183-192, 2011.

## CAPÍTULO III

### DENSIDADE DA MADEIRA RADIAL E LONGITUDINAL POR IMAGENS DIGITAIS DE RAIOS X: CLONES DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ARRANJOS ESPACIAIS

#### RESUMO

A variação da densidade aparente (*DA*) e da densidade básica da madeira (*DBM*) foi avaliada para dois clones de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* (A e B) e um clone de *E. urophylla* x *E. globulus* (C), em três arranjos espaciais (3,75 x 2,40 m; 6,0 x 1,5 m e 4,0 x 3,0 m). Aos 92 meses de idade, a *DA* e *DBM* foram avaliadas no sentido radial e longitudinal do tronco a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial e, também, a 1,3 m de altura, pelos métodos de imagens digitais de raios X (*IDRX*) e de imersão (*I*). As *DA*'s médias a 25% da altura comercial das árvores, para os clones A, B e C foram de 0,65, 0,59 e 0,66 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente. A *DBM* foi maior ( $p \leq 0,05$ ) para o clone C (0,53 g cm<sup>-3</sup>), seguido pelos clones A (0,48 g cm<sup>-3</sup>) e B (0,45 g cm<sup>-3</sup>). A densidade básica da casca variou de 0,23 a 0,25 g cm<sup>-3</sup>. De forma geral, as *DA*'s e *DBM*'s apresentaram tendência de aumento no sentido base-topo e medula-casca. A *IDRX* se mostrou adequada para avaliar a variação da densidade entre clones e arranjos espaciais, além de gerar informações qualitativas do lenho relativas à fissura, excentricidade da medula, podridão e anéis de coloração escura.

Palavras-chave: Espaçamento, densitometria de raios X, clones de eucalipto, imagens digitais de raios X.

## ABSTRACT

The wood apparent (*AD*) and basic (*BD*) densities were evaluated for two clones of *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* (A and B) and one clone of *E. urophylla* x *E. globulus* (C), established in the arrangements of 3.75 x 2.40 m, 6.00 x 1.50 m, and 4.00 x 3.00 m. At 92 months of age, the *AD* and *BD* were evaluated in the radial and longitudinal directions of the trunk of the tree, at 0, 25, 50, 75 and 100% of the commercial height, and at 1.3 m height, by the digital image X-ray (*IDRX*) and immersion (I). The *AD* at 25% of the commercial height of the trees was 0.65, 0.59 and 0.66 g cm<sup>-3</sup> for clones A, B, and C, respectively. The *BD* was higher ( $p \leq 0.05$ ), for clone C (0.53 g cm<sup>-3</sup>) than for the clones A (0.48 g cm<sup>-3</sup>) and B (0.45 g cm<sup>-3</sup>). The basic bark density ranged from 0.23 to 0.25 g cm<sup>-3</sup>. In general, the *AD* and *BD* showed a tendency to increase in the longitudinal (base-top) and radial (pith to bark) direction. The *IDRX* was adequate to evaluate the variation of density between clones and planting arrangements, besides generating qualitative information about the wood, such as fissures, pith eccentricity, rot, and dark colored rings.

Keywords: Spacing, X-ray densitometry, eucalypt clones, digital image X-ray.

## 1. INTRODUÇÃO

A densidade da madeira tem sido utilizada para qualificar a madeira destinada à produção de carvão vegetal, celulose, madeira sólida e painéis (RAYMOND 2002; GOMIDE et al., 2010; LOPES 2011; SANTOS et al., 2011; ARANTES et al., 2016). O espaçamento de plantio (CASSIDY et al., 2013; ROCHA et al., 2016), o genótipo (MIRANDA et al., 2001; RESQUIN et al., 2006; IGARTÚA; MONTEOLIVA, 2010), o sítio (MIRANDA et al., 2001; RAYMOND; MUNERI, 2001; WIMMER et al., 2008; DOWNES et al., 2014; HEIN et al. 2016, ZANUNCIO, 2016) e os tratos culturais (principalmente, a irrigação e a adubação), (TOMAZELLO FILHO et al., 2008; SETTE JUNIOR et al., 2009; CASTRO et al., 2017), afetam a densidade da madeira, em razão de mudanças na espessura da parede celular, na frequência de vasos e nas fibras (CASTRO et al., 2014), teor de lignina e holocelulose (VALE et al., 2010), dentre outros.

A densidade básica da madeira (*DBM*) varia com os genótipos de eucalipto. A variação no sentido longitudinal (base-topo) pode não seguir um padrão pré-estabelecido. Esta pode aumentar com a altura do fuste (QUILHÓ; PEREIRA 2001; LABBÉ et al., 2013); reduzir-se da base até certa altura, seguido de aumento até o topo (RAYMOND; MUNERI 2001; HASELEIN et al., 2004; ALZATE et al., 2005); reduzir-se da base até certa altura, seguido de aumento, e posterior decréscimo até o topo (SETTE JUNIOR. et al., 2009), ou mesmo, não apresentar tendência definida de variação (SHARMA et al. 2015). No sentido medula-casca, ocorre aumento da densidade (TOMAZELLO FILHO, 1987; KNAPIC et al., 2014). Por haver grande número de genótipos de eucalipto, a caracterização da sua densidade básica, principalmente, em diferentes arranjos espaciais auxilia na definição de melhor uso dessa madeira.

Valores baixos de *DBM* são considerados mais adequados para a produção de celulose, em razão da menor carga alcalina (FANTUZZI NETO, 2012), o que reflete no rendimento de polpação (MOKFIENSKI et al., 2008). *DBM* muito baixa implica em aumento de espaço no digestor, impactando negativamente a produtividade industrial (QUEIROZ et al., 2004 e *DBM* elevada gera menor consumo de madeira (MOKFIENSKI et al., 2008) para produzir a mesma quantidade de celulose.

A maioria das empresas de celulose do Brasil tem utilizado clones de híbridos naturais de *E. grandis* e *E. grandis* x *E. urophylla*, com *DBM* entre 465 e 510 kg m<sup>-3</sup> (GOMIDE et al., 2005). Clones de *E. globulus*, apesar de apresentarem *DBM* de 460 a

580 kg m<sup>-3</sup> (ROSA, 2003), têm sido utilizados (CARDOSO, 2002; MILAGRES, 2009; GOMINHO et al., 2015) devido à deslignificação favorável.

As *DA's* e *DBM* são obtidas por métodos destrutivos (ABNT NBR 7190, 1997; ABNT NBR 11941, 2003). A densitometria de raios X (*DRX*) tem também sido utilizada para avaliar a densidade em intervalos micrométricos, possibilitando determinar as variações intra e inter-anéis de crescimento (FREYBURGER et al., 2009; RIDDER et al., 2011; CASTRO et al., 2014; JACQUIN et al., 2017). A *DRX* permite inferir sobre a estrutura anatômica e outras propriedades da madeira, bem como sobre o seu estado sanitário e a infestação por fungos (BUCUR et al., 1997; TOMAZELLO FILHO et al., 2008; CASTRO et al., 2014). Este método permite, ainda, a análise dos tratamentos silviculturais, danos pelo vento (SETTE JUNIOR et al., 2009; ZANUNCIO, 2016) e seleção precoce de genótipos (HENRIQUES et al., 2017).

A *DRX* por imagens digitais de raios X (*IDRX*) tem sido utilizada para a obtenção de perfis radiais de densidade do tronco, de maneira rápida, quanti e qualitativamente (SURDI et al., 2014; CASTRO et al., 2017).

O presente estudo foi realizado com o objetivo de caracterizar a variação da densidade do tronco de clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, pelos métodos de imagens digitais de raios X e de imersão.

As hipóteses de trabalho foram:

H<sub>0</sub>(1): A densidade da madeira varia nos sentidos longitudinal e radial, para um mesmo clone, independente do arranjo espacial;

H<sub>0</sub>(2): A variação da densidade nos sentidos longitudinal e radial independentemente da retangularidade varia em um mesmo espaçamento;

H<sub>0</sub>(3): A densidade da madeira independe do arranjo espacial e do espaçamento.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Descrição da Área de Estudo**

O estudo foi realizado na Fazenda São Paulo (23°35'11"S e 50°32'33"W, altitude de 753 m), no município de Congonhinhas – PR. A temperatura média anual é de 20,0°C, a umidade relativa do ar varia de 75 a 80% e precipitação média anual de 1.400 a 1.600 mm. A chuva é concentrada no verão, não havendo estação seca definida. A classe de

solo predominante é o Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, com horizonte A moderado ou A proeminente de textura argilosa ou muito argilosa. O relevo é suave ondulado.

O plantio de dois clones de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* (A, B) e do clone *E. urophylla* x *E. globulus* (C) foi feito em julho de 2009. Os espaçamentos utilizados foram os de 9 m<sup>2</sup> e 12 m<sup>2</sup> por árvore, em três arranjos espaciais: 3,75 x 2,40 m; 6,0 x 1,5 m e 4,0 x 3,0 m, com retangularidades de 1,56, 4,00 e 1,33, respectivamente.

Antes do preparo do solo foram aplicadas 1,5 toneladas de calcário dolomítico, por hectare, em área total. O preparo do solo consistiu de subsolagem a 50 cm de profundidade na linha de plantio. A adubação foi de 250 kg/ha de NPK 06-30-06 aos 10 dias após o plantio e 250 kg/ha de NPK 15-05-30, quatro meses após o plantio.

## **2.2. Seleção e abate de árvores e coleta de amostras do tronco**

Foram abatidas 54 árvores de 92 meses de idade dos três clones, nos três arranjos espaciais (3,75 x 2,40 m; 6,00 x 1,50 m; 4,00 x 3,00 m), para a determinação da *DA* e *DBM*. Para cada tratamento (clones e arranjos espaciais), abateu-se por parcela uma árvore média. Para cada clone e arranjo espacial foram obtidos dois conjuntos de discos de 5 cm, para determinar a *DA* e *DBM*, retirados a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, e também a 1,3 m de altura (Figura 1). Discos a 25% da altura comercial foram amostrados de outras quatro árvores para cada tratamento, perfazendo seis repetições. Ao todo, foram retirados 288 discos do tronco, que foram acondicionados em sacos plásticos, e o material enviado ao Laboratório de Ecologia e Fisiologia Florestal (LEF) e Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira (LPM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) para preparo e análises.

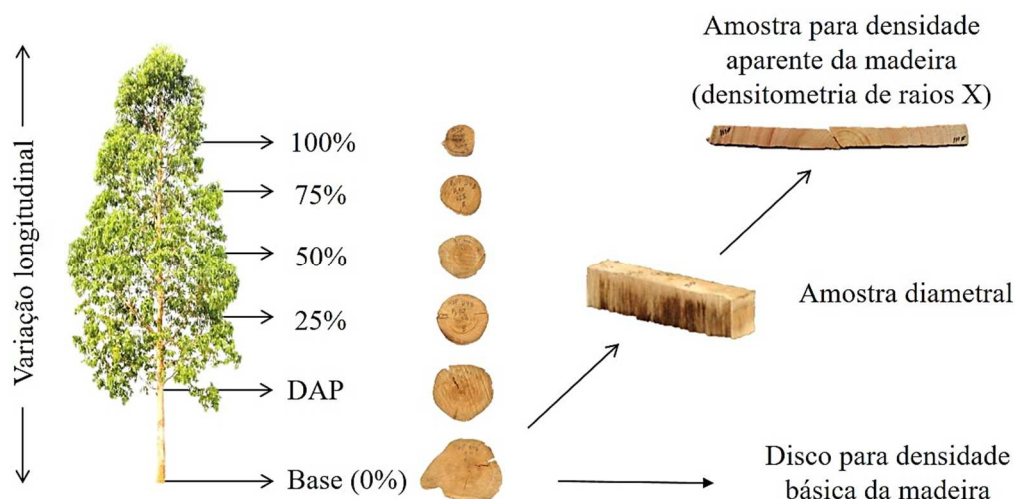


Figura 1 – Esquema da amostragem de discos ao longo do tronco de clones de eucalipto para a determinação das densidades básica e aparente da madeira.

### 2.3. Determinação das propriedades físicas do lenho

A *DA* por *IDRX* foi determinada a partir de discos de 5 cm de espessura (Figura 2), de onde foram retiradas amostras diametraes de 20 x 10 mm de largura e espessura, respectivamente. Lâminas de 2 mm de espessura foram, então, obtidas dessas amostras diametraes com o uso de serra circular dupla paralela. As lâminas coletadas foram acondicionadas por 24 h em câmara climatizada (25°C e 70% de umidade relativa), até a madeira alcançar 12% de umidade em base seca (CASTRO et al., 2017).

As amostras do lenho e a escala de calibração de acetato de celulose foram transferidas para o compartimento blindado do equipamento de raios X digital, modelo Faxitron LX-60, calibrado para leitura automática (25 Kv, 19 segundos) para a obtenção das imagens de ultra contraste e resolução (Figura 2). As imagens foram salvas no formato DICOM. O perfil radial da *DA*, foi obtido com as imagens digitais analisadas no software Image J, que permite determinar os valores radiais da densidade do lenho a cada 50 µm. Os valores radiais de densidade foram transferidos para planilhas eletrônicas, para a construção dos perfis diametraes de *DA*.

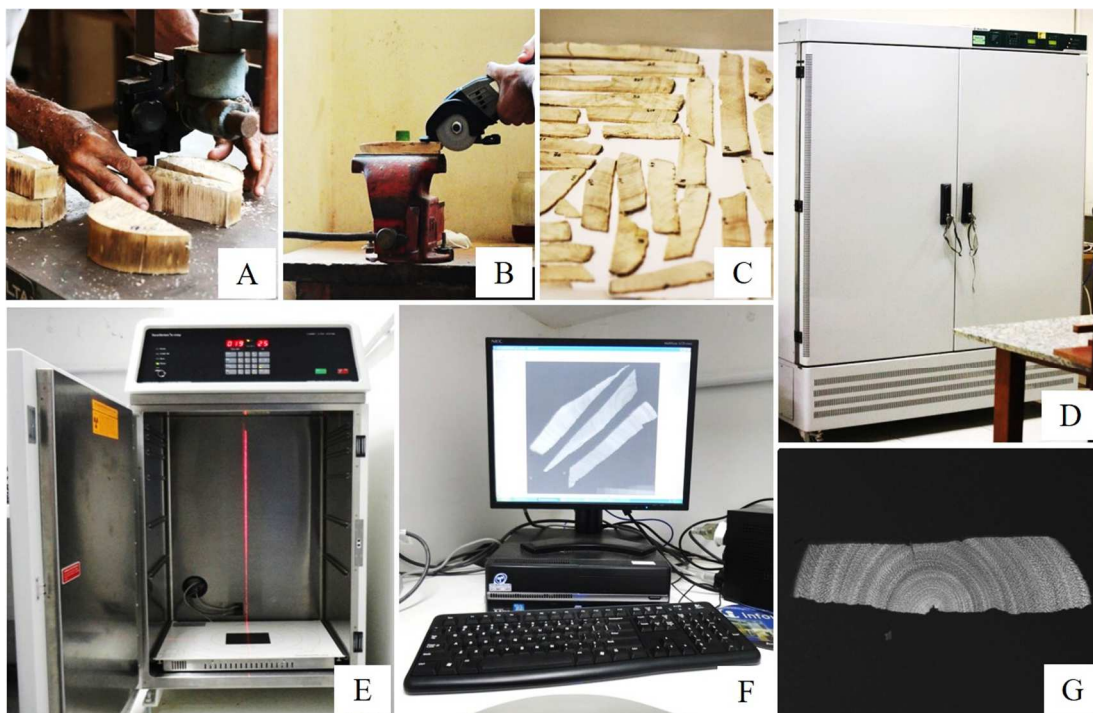


Figura 2 – Obtenção das amostras e imagens de raios X digital do lenho; (A, B, C) corte e preparação da amostra transversal do lenho; (D) climatização da amostra do lenho em estufa de climatização; (E) equipamento de raios X digital; (F, G) imagem digital.

A *DBM* e a *DBC* foram obtidas utilizando o método da imersão (ABNT NBR 11941, 2003), por meio das relações:

$$DBM = \frac{PSM}{(PUM - PIM)}$$

$$DBC = \frac{PSC}{PUC - (PUM - PIM)}$$

em que:

*DBM* = Densidade básica da madeira; *DBC* = Densidade básica da casca; *PSM* = peso seco da amostra; *PUM* = peso úmido da amostra; *PIM* = peso imerso da amostra; *PUC* = peso úmido da casca.

A *DA*, *DBM* e *DBC*, mínima, média e máxima, a 25% da altura comercial, foram analisadas por meio do teste t a 5% de probabilidade para avaliar os efeitos de clones e de arranjos espaciais.

### 3. RESULTADOS

A *DA* média foi maior ( $p \leq 0,05$ ) a 25% da altura comercial das árvores para os três clones A, no arranjo 4,00 x 3,00 m. Para os clones A e C, o arranjo espacial não afetou a *DA*. O clone B apresentou a menor ( $p \leq 0,05$ ) *DA* ( $0,58 \text{ g cm}^{-3}$ ) nos arranjos 3,75 x 2,40 m e 6,00 x 1,50 m (Tabela 1).

A *DA* máxima não variou entre os tratamentos ( $X = 1,17 \text{ g cm}^{-3}$ ), exceto para o clone B, no arranjo 6,00 x 1,50 m, com menor ( $p \leq 0,05$ ) *DA* máxima ( $1,00 \text{ g cm}^{-3}$ ). Os clones A e C apresentaram maior ( $p \leq 0,05$ ) *DA* mínima (0,24 e  $0,25 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente), que não foi afetada pelo arranjo espacial (Tabela 1).

Tabela 1 - Densidade aparente média, máxima e mínima, a 25% da altura comercial das árvores de clones de eucalipto, aos 92 meses de idade, em diferentes arranjos espaciais

Clone	Espaçamento (m)	Densidade aparente da madeira ( $\text{g cm}^{-3}$ )					
		Média		Máxima		Mínima	
A	3,75 x 2,40	0,64	a ( $\pm 0,07$ )	1,09	a ( $\pm 0,13$ )	0,26	a ( $\pm 0,05$ )
A	6,00 x 1,50	0,64	a ( $\pm 0,05$ )	1,14	a ( $\pm 0,14$ )	0,24	a ( $\pm 0,06$ )
A	4,00 x 3,00	0,66	a ( $\pm 0,06$ )	1,20	a ( $\pm 0,25$ )	0,23	a ( $\pm 0,05$ )
B	3,75 x 2,40	0,59	b ( $\pm 0,02$ )	1,12	a ( $\pm 0,09$ )	0,19	b ( $\pm 0,04$ )
B	6,00 x 1,50	0,56	b ( $\pm 0,07$ )	1,00	b ( $\pm 0,19$ )	0,19	b ( $\pm 0,05$ )
B	4,00 x 3,00	0,62	a ( $\pm 0,09$ )	1,27	a ( $\pm 0,20$ )	0,19	b ( $\pm 0,06$ )
C	3,75 x 2,40	0,63	a ( $\pm 0,10$ )	1,12	a ( $\pm 0,19$ )	0,22	a ( $\pm 0,08$ )
C	6,00 x 1,50	0,66	a ( $\pm 0,06$ )	1,18	a ( $\pm 0,13$ )	0,26	a ( $\pm 0,06$ )
C	4,00 x 3,00	0,70	a ( $\pm 0,09$ )	1,23	a ( $\pm 0,13$ )	0,27	a ( $\pm 0,05$ )

Médias com mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t ( $p > 0,05$ ). Desvio padrão entre parênteses.

A *DBM* foi maior ( $p \leq 0,05$ ) para o clone C ( $0,53 \text{ g cm}^{-3}$ ), e não houve diferença entre arranjos, para este clone ( $p > 0,05$ ). O clone A, com o adensamento de plantio na linha (6,00 x 1,50 m), apresentou a menor *DBM* ( $0,46 \text{ g cm}^{-3}$ ) dentre os arranjos. Para o clone B, a menor ( $p \leq 0,05$ ) *DBM* foi observada nos arranjos espaciais 3,75 x 2,40 m e 6,00 x 1,50 m, no menor espaçamento ( $9 \text{ m}^2 \text{ árvore}^{-1}$ ) (Tabela 2).

Tabela 2 - Densidade básica da madeira e da casca, a 25% da altura comercial das árvores de clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, aos 92 meses de idade

Clone	Espaçamento (m)	Densidade básica (g cm <sup>-3</sup> )	
		Madeira	Casca
A	3,75 x 2,40	0,49 b (±0,01)	0,25 a (±0,01)
A	6,00 x 1,50	0,46 c (±0,01)	0,24 a (±0,01)
A	4,00 x 3,00	0,48 b (±0,02)	0,25 a (±0,01)
B	3,75 x 2,40	0,44 d (±0,01)	0,23 b (±0,00)
B	6,00 x 1,50	0,44 d (±0,01)	0,24 a (±0,01)
B	4,00 x 3,00	0,47 c (±0,01)	0,24 a (±0,01)
C	3,75 x 2,40	0,53 a (±0,01)	0,24 a (±0,01)
C	6,00 x 1,50	0,53 a (±0,02)	0,24 a (±0,01)
C	4,00 x 3,00	0,52 a (±0,01)	0,24 a (±0,01)

Médias com mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t ( $p > 0,05$ ). Desvio padrão entre parênteses.

A *DBC* variou de 0,23 a 0,25 g cm<sup>-3</sup> entre clones e arranjos espaciais. A *DBC* do clone B diferiu ( $p \leq 0,05$ ) entre arranjos, com menor valor (0,23 g cm<sup>-3</sup>) no arranjo 3,75 x 2,40 m (Tabela 2).

Houve correlação positiva de  $r = 41\%$  ( $p \leq 0,05$ ) entre *DA* e *DBM* (Figura 3).

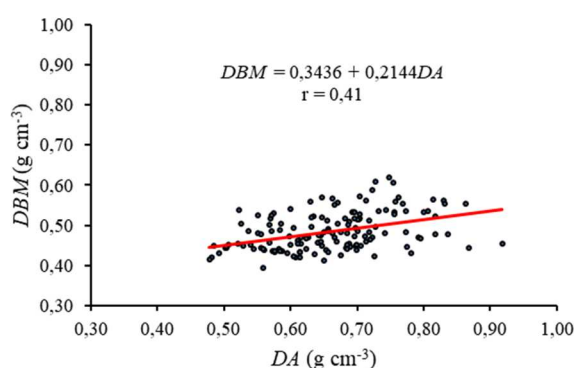


Figura 3 – Correlação da *DA*, determinada por *IDRX* e *DBM*, pelo método de imersão de clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais

A *DA* apresentou tendência de redução da base (0%) até o *dap* (1,30 m), para os clones A e B, exceto para o clone B, no arranjo 6,00 x 1,50 m. O clone C apresentou aumento da *DA* da base até o *dap*, no arranjo 3,75 x 2,40 m, redução no arranjo 4,00 x 3,00 m, e não se alterou no arranjo 6,00 x 1,50 m (Figura 4).

A *DBM* reduziu-se da base (0%) até o *dap* (1,30 m), seguido por aumento até 75% e redução de 75% até 100% da altura. Comportamento diferenciado foi apresentado para o clone A, no arranjo 6,00 x 1,50 m (aumento da *DBM* de 75% até 100% da altura comercial); para o clone B, no arranjo 4,00 x 3,00 m (aumento da *DBM* de 75% até 100%

e maior valor médio da densidade na posição de 25% ) e, para o clone C, no arranjo 4,00 x 3,00 m (aumento da densidade de 75% até 100%) (Figura 4).

Houve tendência de aumento da *DBC* da base para o topo (0,21-0,28 g cm<sup>-3</sup>). De forma geral, houve aumento da base (0%) até o *dap* (1,30 m) e de 75% até 100% da altura comercial. Para as demais posições, houve alternância de maiores e menores *DBC*. Para os clones A e C observou-se aumento da *DBC* da base até a posição de 50% da altura comercial, seguido de redução para a posição de 75% e, aumento até 100%. O clone A, no arranjo 4,00 x 3,00 m, e o clone B, no arranjo 6,00 x 1,50 m, não seguiram este padrão. Houve aumento da *DBC* da posição de 50% para 75%. Para os clones A e B, no arranjo 4,00 x 3,00 m, seguiu-se padrão linear positivo (Figura 4).

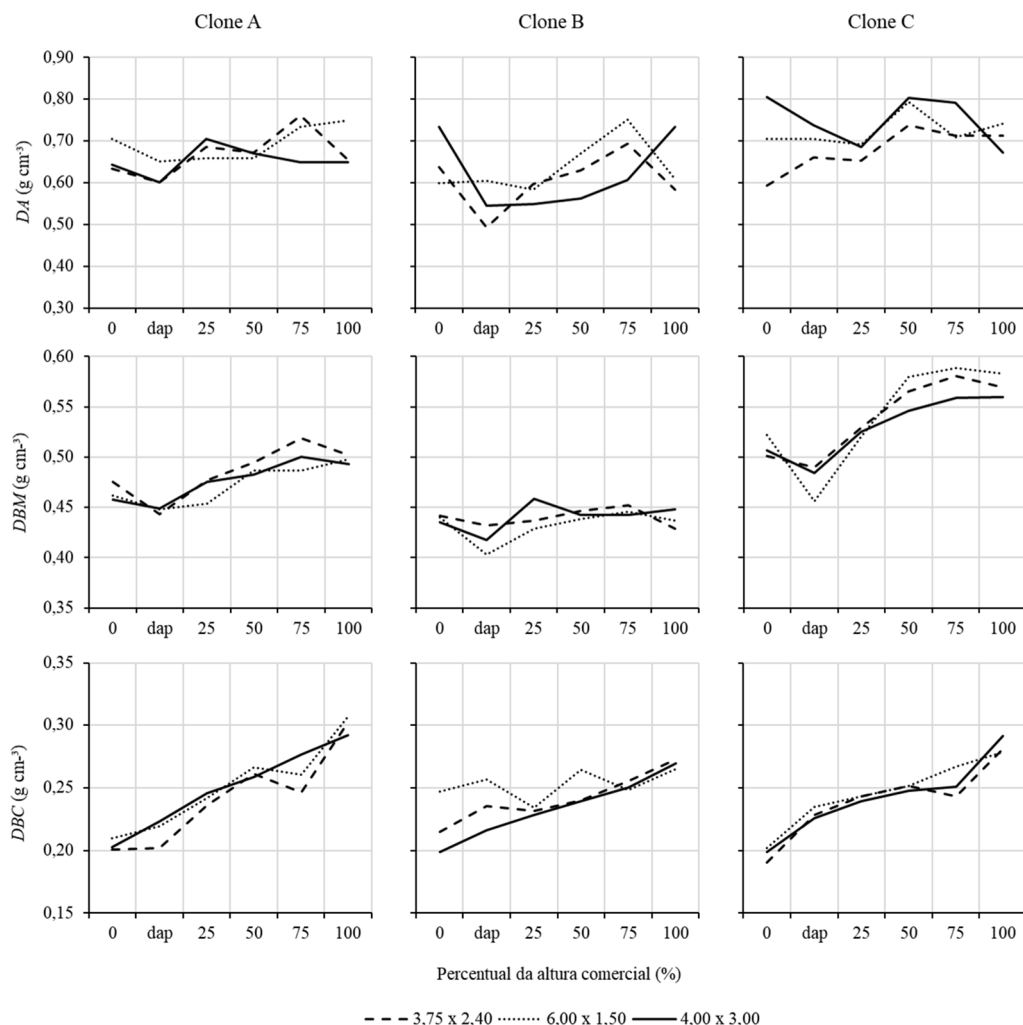


Figura 4 - Densidade aparente ( $DA$ ) e densidade básica da madeira ( $DBM$ ) e da casca ( $DBC$ ) de clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais.

Os perfis da  $DA$  do lenho das árvores com amostragem completa (0%,  $dap$ , 25%, 50%, 75 e 100% da altura comercial), dos clones A, B e C, nos arranjos 3,75 x 2,40 m, 6,00 x 1,5 m e 4,00 x 3,00 m, exibiram padrões distintos ao longo do tronco da árvore (Figuras 5 a 7).

As  $IDRX$ 's permitiram detalhar a variação da  $DA$  a cada 50  $\mu$ m. Essas imagens permitiram identificar a ocorrência de três modelos de variação radial da  $DA$ : modelo I - aumento da  $DA$  no sentido medula-casca; modelo II - redução no sentido medula-casca e, modelo III - aumento próximo da medula (medula-1,5 cm), seguido de redução (1,5-2,0 cm) e posterior aumento até a casca.

A  $DA$ , de modo geral, aumenta no sentido medula-casca, seguindo o modelo I. Em algumas posições o padrão não foi seguido (Figuras 5 a 7), como relatado a seguir:

- O clone A, no arranjo 3,75 x 2,40 m, para as duas árvores amostradas, aos 50% da altura comercial, apresentou redução da *DA* no sentido medula casca no raio direito da amostra diametral, em que, próximo da medula (0-30% do raio) a *DA* foi de 0,64 e 0,60 g cm<sup>-3</sup> e próximo da casca (70-100% do raio) foi de 0,55 e 0,48 g cm<sup>-3</sup>. Tendência similar de redução foi observada na altura de 75%, porém, de forma mais pronunciada para o raio direito (*DA* reduzindo de 0,90 para 0,84 g cm<sup>-3</sup>), do que para o esquerdo (*DA* reduzindo de 0,81 para 0,79 g cm<sup>-3</sup>). A 25% de altura, foram observados picos de densidade a partir de 55% do raio, no espaçamento 4,00 x 3,00 m (Figura 5).

- O clone B, no arranjo 6,00 x 1,50 m, apresentou aumento de *DA* próximo à medula (medula-1,5 cm) na posição de 75% da altura enquanto a 0% foi observada redução da densidade na região próxima à casca (0,49 g cm<sup>-3</sup>, 90-100% do raio) (Figura 6).

- O clone C, no arranjo espacial 3,75 x 2,40 m, apresentou *DA* próximo à medula (0-30% do raio) de 0,54 g cm<sup>-3</sup> a 0% de altura valor semelhante ao observado na região da casca (0,55 g cm<sup>-3</sup> a 70-100% do raio) (Figuras 7 e 12).

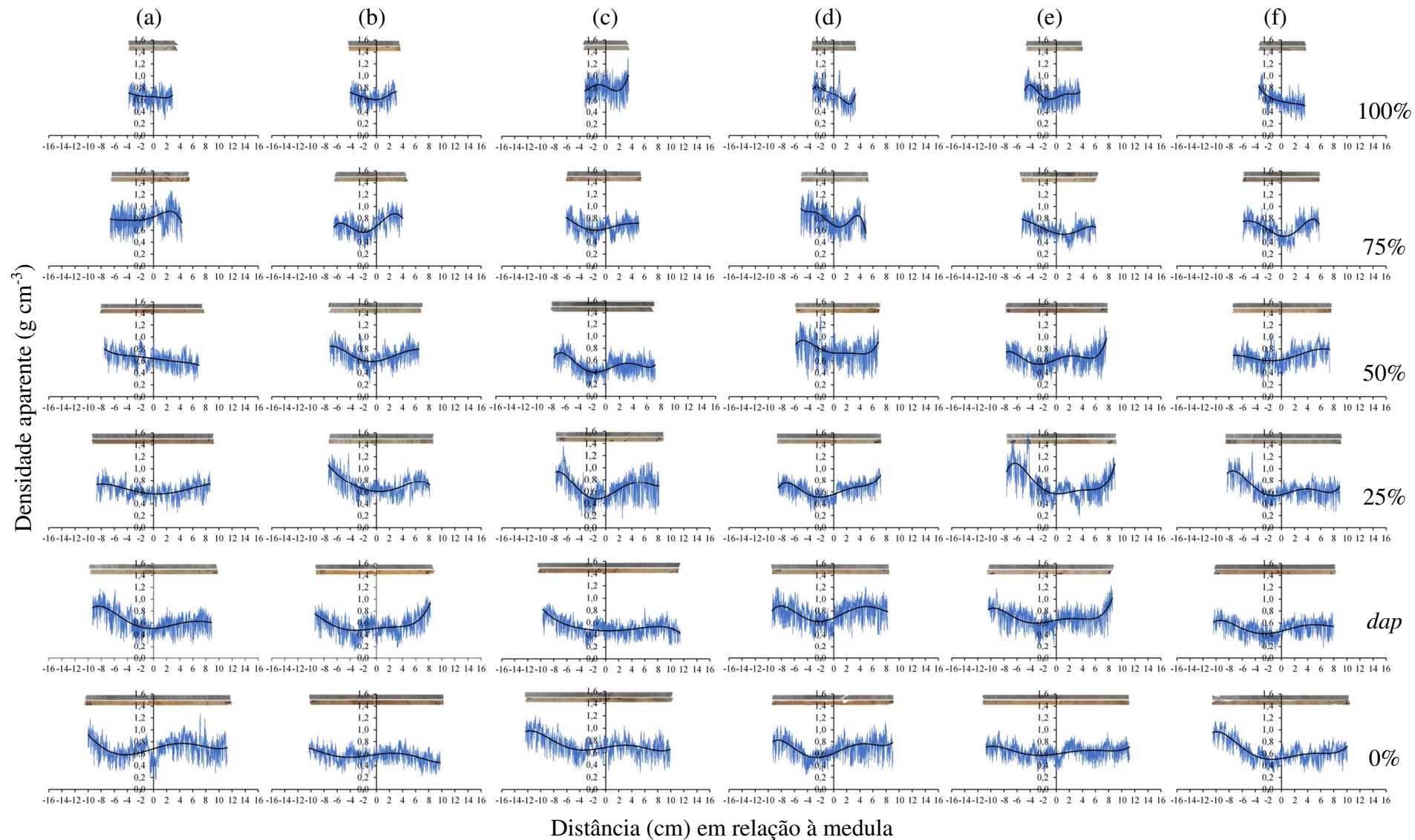


Figura 5 – Perfis da densidade aparente do lenho ( $\text{g cm}^{-3}$ ), obtidos por imagens digitais de raios X, de amostras diamétricas de duas árvores do clone A (*E. urophylla* x *E. grandis*), nos arranjos espaciais 3,75 x 2,40 m (a, b), 6,00 x 1,50 m (c, d) e 4,00 x 3,00 m (e, f), nas posições de 0%, *dap*, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial.

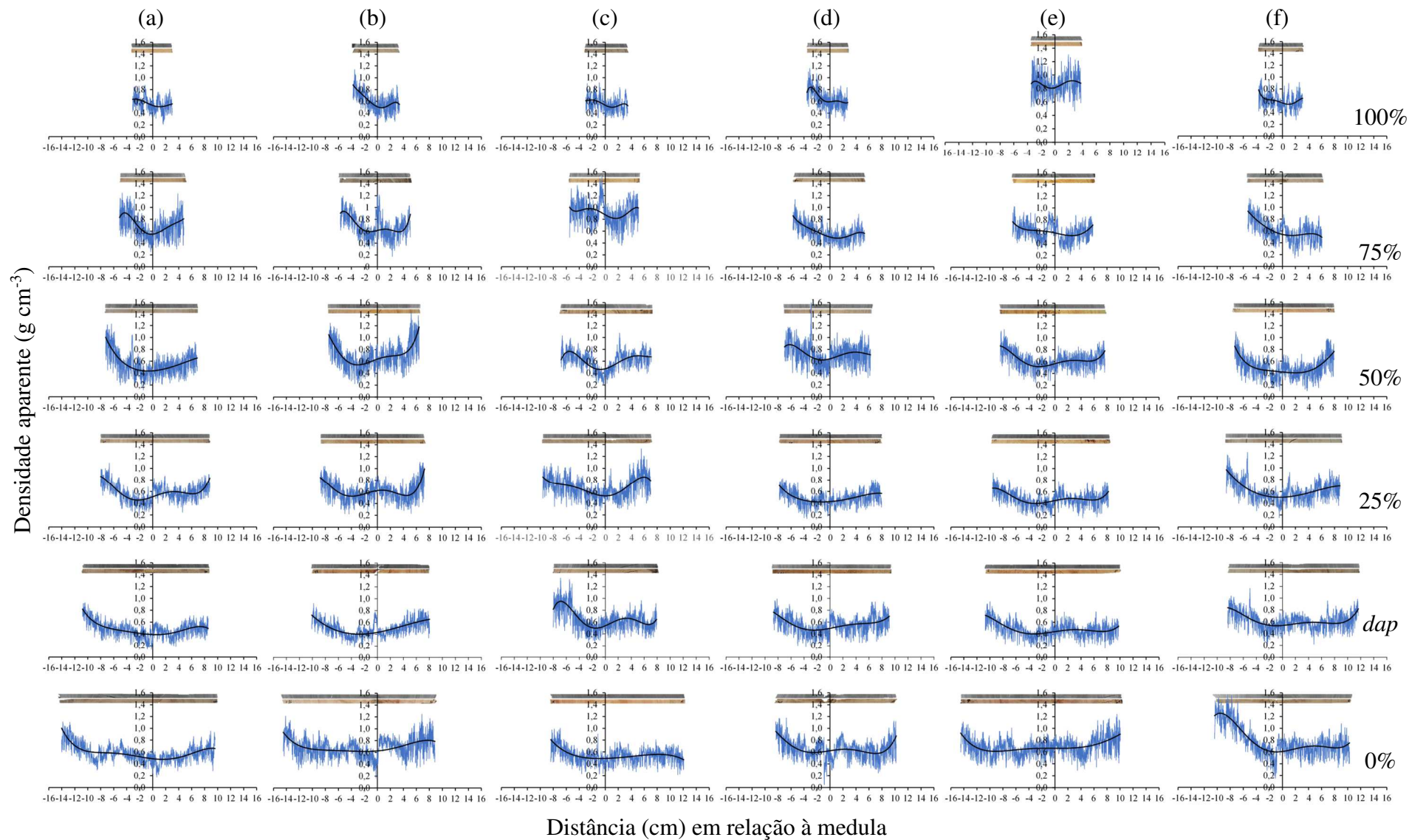


Figura 6 – Perfis da densidade aparente do lenho ( $\text{g cm}^{-3}$ ), obtidos por imagens digitais de raios X, de amostras diamétricas de duas árvores do clone B (*E. urophylla* x *E. grandis*), nos arranjos espaciais 3,75 x 2,40 m (a, b), 6,00 x 1,50 m (c, d) e 4,00 x 3,00 m (e, f), nas posições de 0%, *dap*, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial.

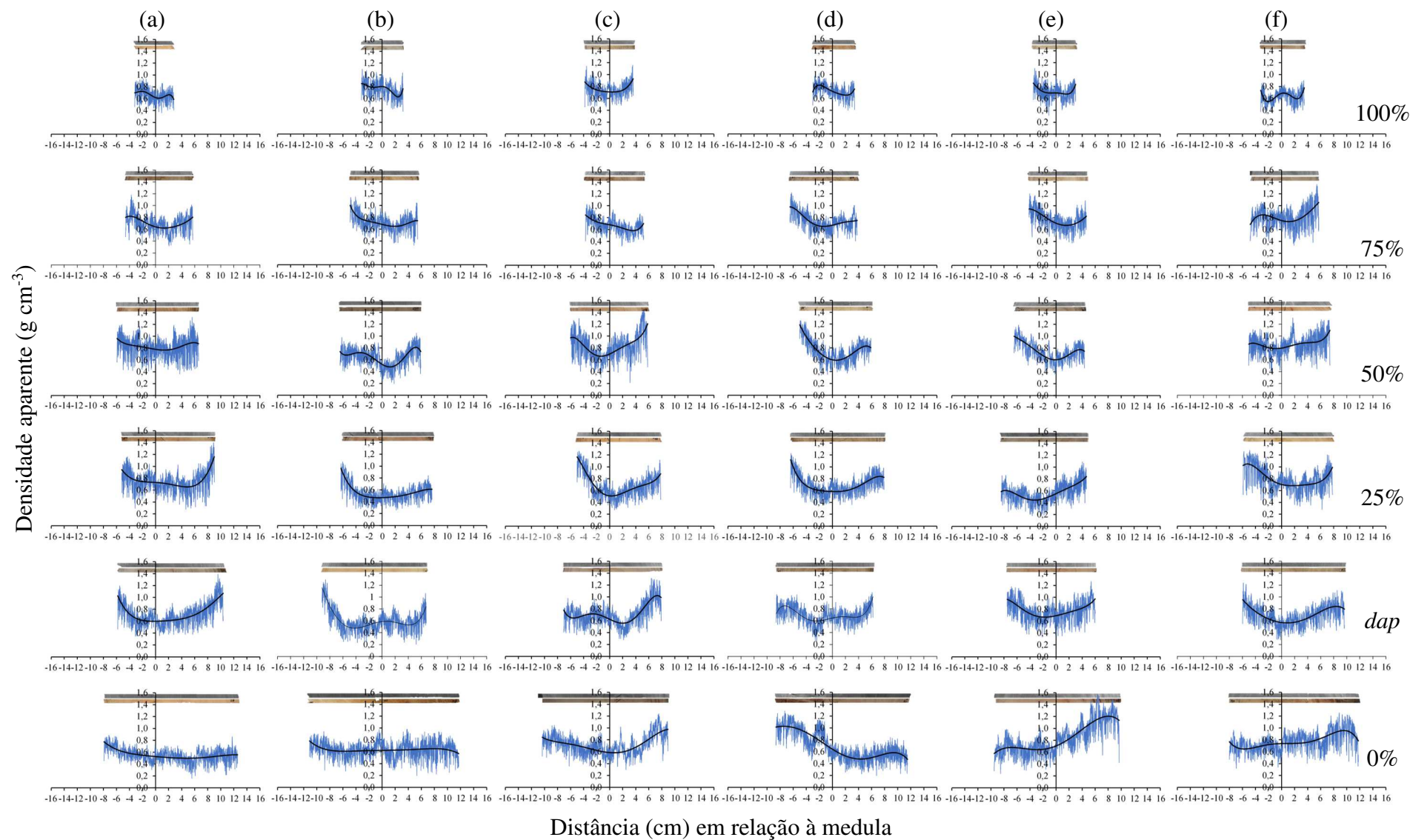


Figura 7 – Perfis da densidade aparente do lenho ( $\text{g cm}^{-3}$ ), obtidos por imagens digitais de raios X, de amostras diamétricas de duas árvores do clone C (*E. urophylla* x *E. globulus*), nos arranjos espaciais 3,75 x 2,40 m (a, b), 6,00 x 1,50 m (c, d) e 4,00 x 3,00 m (e, f), nas posições de 0%, *dap*, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial.

A *DA* média a cada 5% do raio, para todos os tratamentos, é apresentada nas Figuras 8 a 10.

O clone A, no arranjo espacial 3,75 x 2,40 m, apresentou *DA* variando de 0,45 a 0,99 g cm<sup>-3</sup>. Para a posição de 75% da altura comercial podem ser observados valores elevados da densidade na região interna do lenho (0-30% do raio, 0,84 g cm<sup>-3</sup>), e em uma região intermediária (40-80% do raio, 0,91 g cm<sup>-3</sup>), no lado direito do raio (Figura 8). Esta tendência pode ser observada nos perfis densitométricos (Figura 5). A *DA* variou de 0,45 a 0,93 g cm<sup>-3</sup> para o arranjo 6,00 x 1,50 m. Na posição de 100% da altura comercial foram observados picos de elevação da densidade entre 25-30% (raio direito) e de 40-45% (raio esquerdo). No arranjo 4,00 x 3,00 m, a média de valores mínimo e máximo da densidade foi de 0,42 e 1,11 g cm<sup>-3</sup>. O valor máximo observado está relacionado às amostras na posição de 25% da altura comercial com aumento da densidade aparente a partir de 50% do raio esquerdo. A presença de fissuras e áreas com anéis de coloração escura podem ser observadas na Figura 5.

O clone B, no arranjo espacial 3,75 x 2,40 m, apresentou *DA* média, com mínimo e máximo de 0,36 e 0,97 g cm<sup>-3</sup>. Para a posição de 75% da altura comercial, a *DA* na região interna do lenho (5-10% do raio, 0,81 g cm<sup>-3</sup>) está associada a fissuras e áreas com anéis de coloração escura. A *DA* elevada (10-25% do raio esquerdo, 0,81 g cm<sup>-3</sup>) associada a fissuras, e áreas com anéis de coloração escura, também foi observada para o arranjo 6,00 x 1,50 m (Figura 6). No arranjo 4,00 x 3,00 m, a média de valores mínimos e máximos da densidade variou de 0,37 a 1,05 g cm<sup>-3</sup>. Os maiores valores de *DA* estão associados ao lado esquerdo do raio, onde se evidenciam anéis de coloração escura ao longo do perfil densitométrico (Figura 6).

O clone C, no arranjo 3,75 x 2,40 m, apresentou média de valores mínimos e máximos da densidade de 0,49 e 1,02 g cm<sup>-3</sup> e média de 0,68 g cm<sup>-3</sup> (Figura 10). No arranjo 6,00 x 1,50 m foram observados valores mínimo e máximo da densidade de 0,50 e 1,07 g cm<sup>-3</sup>. A 0% da altura, os valores da *DA* foram de 0,80 g cm<sup>-3</sup> (15-30% do raio esquerdo) e de 0,94 g cm<sup>-3</sup> (75-90% do raio esquerdo). Esses valores estão associados a fissuras e áreas de coloração escura, conforme o respectivo perfil densitométrico. No arranjo 4,00 x 3,00 m, a média de valores mínimos e máximos da densidade foi de 0,74 a 1,13 g cm<sup>-3</sup>. O máximo observado está relacionado à base, que apresentou coloração escura em 60-95% do raio esquerdo (Figura 7).

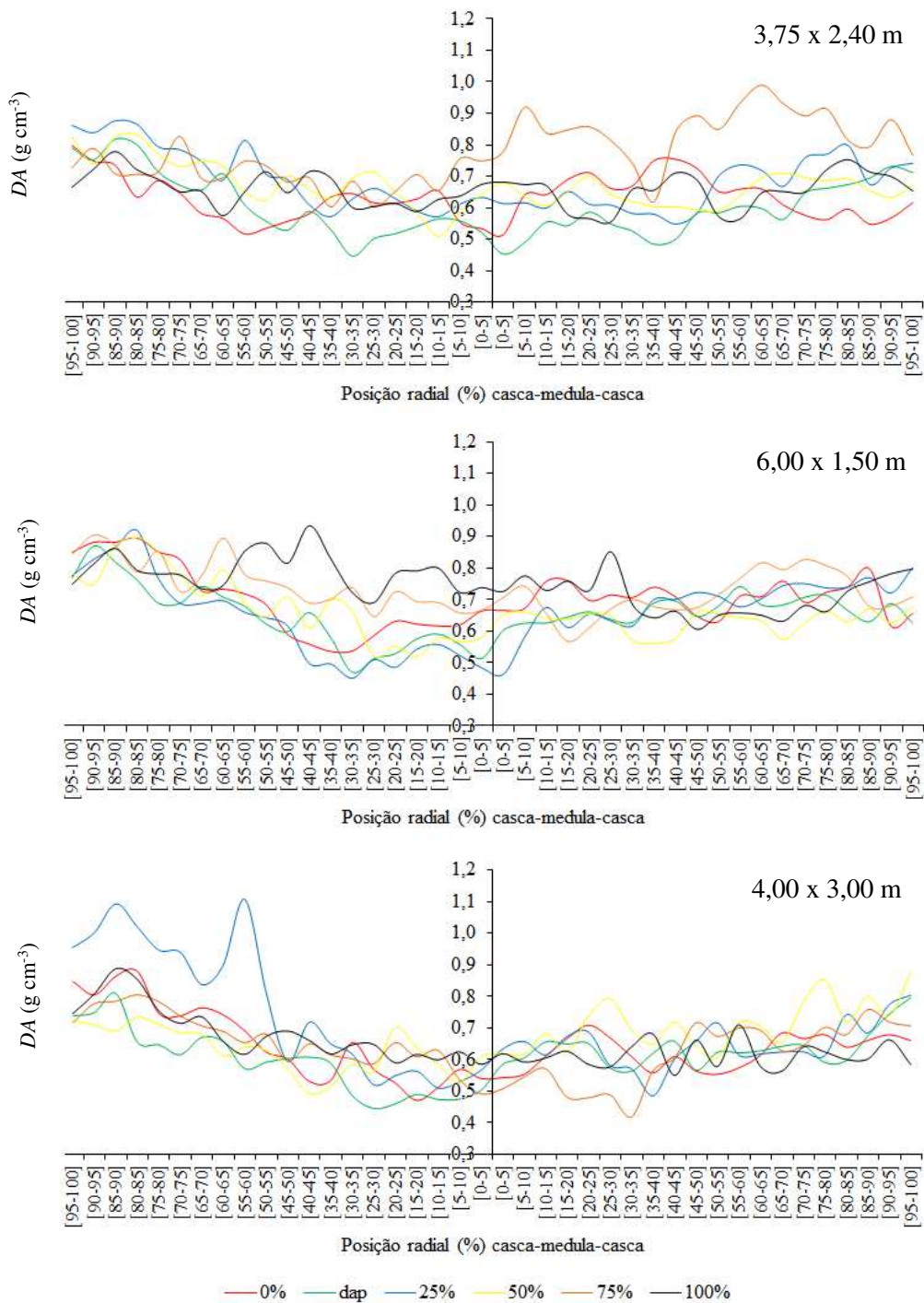


Figura 8 – Densidade aparente do lenho a cada 5% do raio do clone A (*E. urophylla* x *E. grandis*), em diferentes arranjos espaciais.

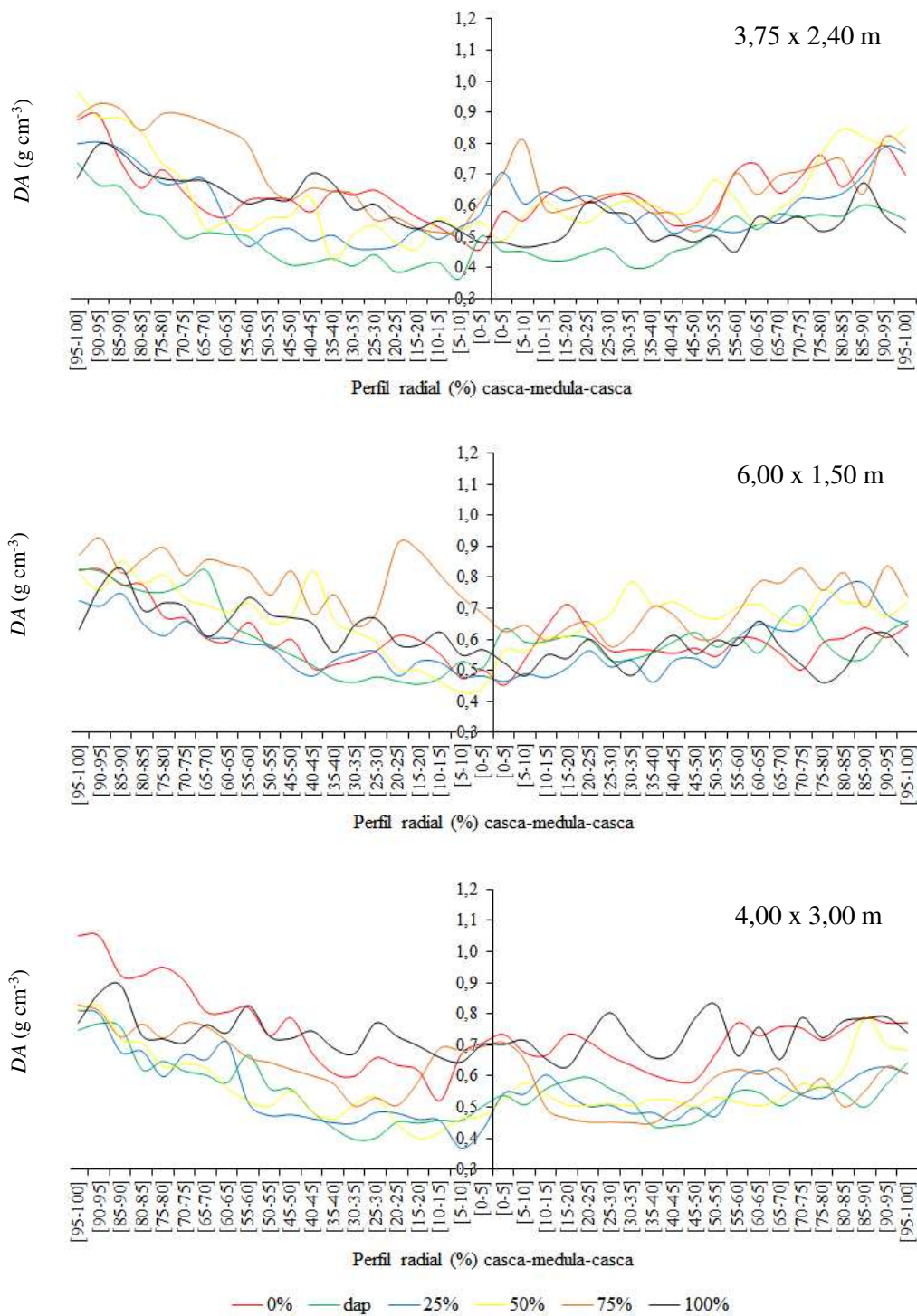


Figura 9 – Densidade aparente do lenho a cada 5% do raio do clone B (*E. urophylla* x *E. grandis*), em diferentes arranjos espaciais.

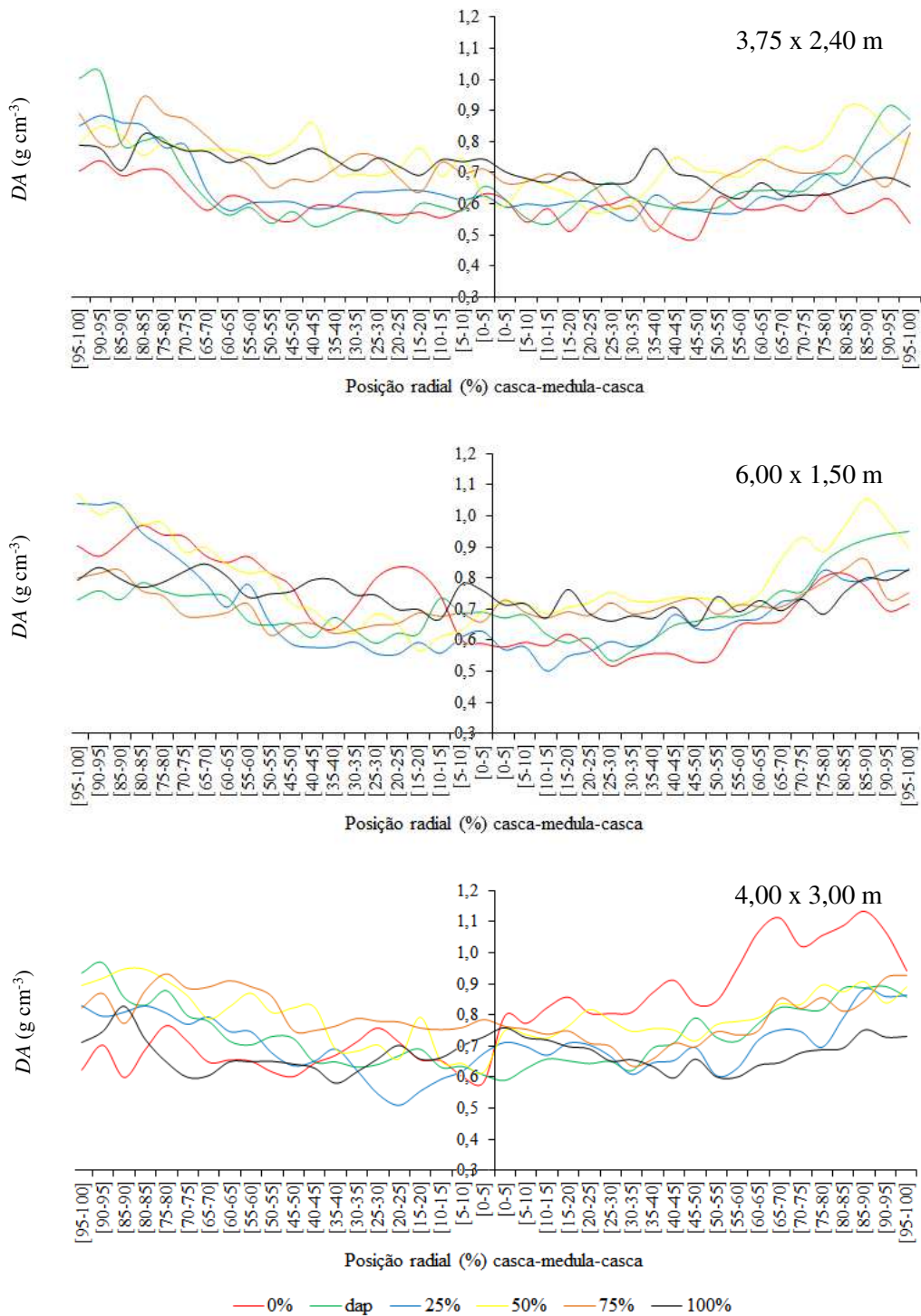


Figura 10 – Densidade aparente do lenho a cada 5% do raio do clone C (*E. urophylla* x *E. globulus*), em diferentes arranjos espaciais.

A largura de cada anel de crescimento (cm) e de todos os anéis para todos os tratamentos, referente às amostras da base (0% da altura comercial), são apresentados na Tabela 3 e Figura 11.

O comprimento dos anéis de crescimento anuais apresentou tendência de redução entre o 1° e o 8° anel, para todos os tratamentos. A variação do comprimento foi mais

expressiva do 1º para o 2º anel e, em média, de 5,15-0,91 cm, 5,34-1,03 cm e 4,44-0,96 cm, para os clones A, B e C, respectivamente (Tabela 3 e Figura 11).

Quando se analisa a largura acumulada dos anéis anuais de crescimento, há a tendência de aumento entre o 1º e o 8º anel, para todos os tratamentos. O clone C apresentou a maior variação (94%) entre o 1º e o 8º anel e, o clone B, a menor variação (78%). Resultado similar foi observado para *DA*, com aumento entre o 1º e o 8º anel, com o clone B, em média, apresentando a menor variação ( $0,25 \text{ g cm}^{-3}$ ) e, o Clone C, a maior variação ( $0,30 \text{ g cm}^{-3}$ ). O clone C, no arranjo espacial 3,75 x 2,40 m, apresentou a maior variação entre o 1º e o 8º anel ( $0,38 \text{ g cm}^{-3}$ ), e o clone B, neste mesmo arranjo, apresentou a menor variação entre o 1º e o 8º anel ( $0,13 \text{ g cm}^{-3}$ ).

A variação anual da *DA* dos anéis de crescimento anuais foi de 0,01 a  $0,03 \text{ g cm}^{-3}$ , exceto para o clone C, no arranjo espacial 6,00 x 1,50 m, em que a variação foi de  $0,06 \text{ g cm}^{-3}$ , do 2º para o 3º anel. Este tratamento, também, apresentou a maior variação absoluta ( $0,16 \text{ g cm}^{-3}$ ) e percentual (28,1%) entre o 1º e o 8º anel. O clone B, nos arranjos 3,75 x 2,40 m e 4,00 x 3,00 m, apresentou a menor variação de *DA* ( $0,03 \text{ g cm}^{-3}$ ) entre o 1º e o 8º anel. Entretanto, em valores relativos, o clone B, no arranjo 4,00 x 3,00 m, apresentou a menor variação (5,3%).

Tabela 3 – Largura dos anéis de crescimento (cm), largura dos anéis de crescimento acumulado (cm), densidade dos anéis de crescimento ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e densidade dos anéis de crescimento acumulada ( $\text{g cm}^{-3}$ ) de amostras da base de árvores de clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais, aos 92 meses de idade

Anel	Clone A			Clone B			Clone C		
	3,75x2,40	6,00x1,50	4,00x3,00	3,75x2,40	6,00x1,50	4,00x3,00	3,75x2,40	6,00x1,50	4,00x3,00
Largura do anel (cm)									
1	4,74	5,54	5,17	5,12	4,08	6,81	5,43	3,7	4,19
2	1,03	0,44	1,26	1,02	1,05	1,01	0,81	1,12	0,94
3	0,58	0,5	1,71	0,59	0,37	0,47	0,57	1,64	0,64
4	0,67	1,23	1,03	0,72	0,54	0,88	1,16	0,49	0,51
5	0,54	0,82	0,39	0,15	0,85	1,48	1,2	0,36	0,53
6	0,32	0,35	0,32	0,22	0,42	0,38	0,29	0,36	0,3
7	0,18	0,39	0,31	0,56	0,53	0,48	0,64	0,12	0,24
8	0,18	0,16	0,22	0,13	0,18	0,15	0,23	0,13	0,16
Largura acumulada do anel (cm)									
1	4,74	5,54	5,17	5,12	4,08	6,81	5,43	3,7	4,19
2	5,77	5,98	6,43	6,13	5,12	7,82	6,24	4,82	5,13
3	6,35	6,48	8,13	6,72	5,49	8,29	6,81	6,46	5,77
4	7,02	7,7	9,16	7,44	6,03	9,17	7,96	6,95	6,28
5	7,56	8,52	9,55	7,6	6,88	10,64	9,16	7,31	6,81
6	7,88	8,87	9,88	7,81	7,29	11,02	9,45	7,67	7,1
7	8,05	9,25	10,18	8,37	7,82	11,49	10,09	7,79	7,34
8	8,24	9,42	10,4	8,5	8	11,65	10,33	7,91	7,5
Densidade aparente do anel ( $\text{g cm}^{-3}$ )									
1	0,51	0,65	0,6	0,43	0,54	0,57	0,62	0,57	0,69
2	0,58	0,86	0,73	0,51	0,68	0,62	0,73	0,71	0,73
3	0,66	0,82	0,72	0,52	0,96	0,63	0,7	0,87	0,9
4	0,69	0,8	0,79	0,5	0,93	0,64	0,76	1,05	0,87
5	0,75	0,84	0,88	0,54	0,92	0,59	0,88	1,01	0,9
6	0,87	0,98	0,84	0,57	0,91	0,64	1,04	1,02	0,96
7	0,82	0,84	0,82	0,48	0,89	0,77	1,06	0,96	0,92
8	0,84	0,83	0,92	0,56	0,9	0,84	1	0,86	0,93
Densidade aparente acumulada do anel ( $\text{g cm}^{-3}$ )									
1	0,51	0,65	0,6	0,43	0,54	0,57	0,62	0,57	0,69
2	0,52	0,66	0,62	0,45	0,57	0,58	0,63	0,61	0,7
3	0,53	0,68	0,64	0,45	0,6	0,58	0,64	0,67	0,72
4	0,55	0,7	0,66	0,46	0,63	0,59	0,65	0,7	0,73
5	0,56	0,71	0,67	0,46	0,66	0,59	0,68	0,71	0,75
6	0,58	0,72	0,67	0,46	0,68	0,59	0,69	0,73	0,75
7	0,58	0,73	0,68	0,46	0,69	0,6	0,72	0,73	0,76
8	0,59	0,73	0,68	0,46	0,69	0,6	0,72	0,73	0,76

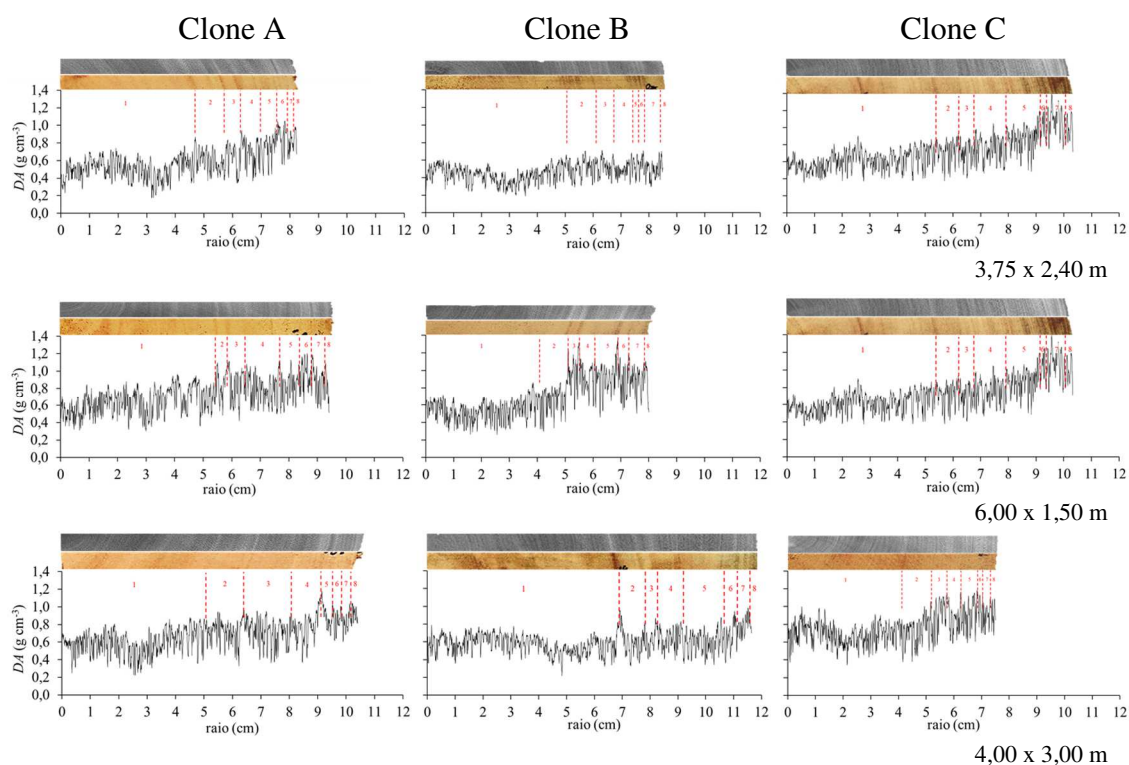


Figura 11 – Anéis de crescimento anual (1 a 8) de amostras da base de clones de eucalipto, em diferentes arranjos espaciais.

#### 4. DISCUSSÃO

A variação observada na *DA* em clones de eucalipto foi, também, relatada por Knapic et al. (2014), em 19 espécies de eucalipto, aos quatro anos de idade:  $0,53 \text{ g cm}^{-3}$  a  $0,84 \text{ g cm}^{-3}$ . Ferreira (2013) relatou que a *DA* para clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*, entre cinco e dez anos de idade, variou entre  $0,52 \text{ g cm}^{-3}$  e  $0,87 \text{ g cm}^{-3}$ , sendo que o clone I-224 (*E. grandis* x *E. urophylla*), aos seis anos de idade, apresentou *DA* de  $0,55 \text{ g cm}^{-3}$ . Por outro lado, não houve variação na *DA* para clones de *E. grandis* e de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos dois anos de idade, sendo a média de  $0,53 \text{ g cm}^{-3}$  (ZANUNCIO, 2016).

As diferenças em *DBM* entre os clones de eucalipto, também, têm sido relatadas em outros estudos (OLIVEIRA et al. 2005; SANTOS et al. 2011; PROTÁSIO et al. 2013; SHARMA et al. 2015). Warren et al. (2009) relataram *DBM* de  $533,4 \text{ kg m}^{-3}$  para *E. cloeziana*,  $448,5 \text{ kg m}^{-3}$  para *E. pilularis* e  $427,6 \text{ kg m}^{-3}$  para *E. dunnii*. Oliveira et al. (2005) relataram *DBM* de  $0,49 \text{ g cm}^{-3}$  (*E. grandis*) a  $0,73 \text{ g cm}^{-3}$  (*E. citriodora*). Em nível de clones, a variação foi de  $0,51$  a  $0,60 \text{ g cm}^{-3}$  entre clones de *E. grandis*, e de  $0,51$  a  $0,60 \text{ g cm}^{-3}$  entre clones de *E. saligna*, no espaçamento de  $9 \text{ m}^2 \text{ árvore}^{-1}$ , aos 7 anos de idade (TRUGILHO et al., 2001). Segundo Zanuncio (2016), a *DBM* não variou ( $p > 0,05$ ) entre clones de *E. grandis* ( $0,37 \text{ g cm}^{-3}$ ), entretanto, diferiu ( $p \leq 0,05$ ) entre os clones de híbridos

de *E. grandis* x *E. urophylla* (0,39-0,42 g cm<sup>-3</sup>), aos dois anos de idade. Verifica-se, assim, que existem acentuadas variações na *DBM* entre clones, sendo que a idade, a fertilização e o espaçamento podem, também, influenciar na *DBM*.

A *DBC*, apresentou pequena variação (0,23 a 0,24 g cm<sup>-3</sup>) entre os espaçamentos de 9 e 12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>, para *E. grandis*, aos 10 anos de idade, no estado do Rio Grande do Sul (GOULART et al., 2003). Houve tendência de redução da *DBC* com o aumento do espaçamento de 1,5 para 9 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>. A *DBC*, para o espaçamento de 9 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup> foi superior ( $p \leq 0,05$ ) a *DBC* no espaçamento de 1,5 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup> para 15 clones comerciais híbridos de eucalipto, aos 7 anos de idade (ROCHA et al., 2016).

A *DBM* para o clone C não foi afetada pelo arranjo espacial e espaçamento, assim como observado para as espécies *Tectona grandis*, *Acacia mearnsii*, *E. grandis*, *Mimosa scabrella*, *Ateleia glazioviana*, *Khaya ivorensis*, *E. urophylla* x *E. grandis* (LASSERRE et al., 2009; CASSIDY et al. 2013; ELOY et al., 2014; SEREGHETTI et al., 2015; SORANSO et al., 2016). O espaçamento não afetou a *DBM* de *E. benthamii*, apesar de alterar a proporção de lenho juvenil (BENIN et al. 2017). Debell et al. (2001), também, não observaram efeito ( $p=0,136$ ) do espaçamento sobre a *DBM*, para *E. saligna*, aos 15 anos de idade e, relataram que o baixo valor de *p* sugere tendência de aumento da *DBM* nos maiores espaçamentos, o que é semelhante ao observado para o clone B no presente estudo.

O espaçamento afeta a taxa de crescimento das árvores e, como consequência, a densidade da madeira. Espaçamentos mais largos proporcionaram maior densidade da madeira para clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, porque a taxa de crescimento foi menor, ou seja, crescimento mais lento (MOULIN et al., 2017). A explicação seria que as árvores em espaçamentos amplos usufruem de maior disponibilidade de recursos de crescimento (água, luz e nutrientes), antes do fechamento do dossel e, por consequência, maior produção de lenho juvenil denso (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000; ROCHA, 2011). Espaçamentos mais amplos possibilitam a formação de maior copa, o que pode favorecer maior produção de fotoassimilados. Rocha et al. (2016) relataram maior *DBM* (0,55 g cm<sup>-3</sup>) nos espaçamentos de 4,5 a 9,0 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup> quando comparado a árvores no espaçamento de 1,5 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup> (0,51 g cm<sup>-3</sup>), para clones comerciais híbridos de eucalipto, aos 7 anos de idade, no norte de Minas Gerais. A *DBM* do clone 3336, no espaçamento de 12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>, foi de 0,50 g cm<sup>-3</sup> e, de 0,49 g cm<sup>-3</sup> no espaçamento de 9 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup> (REIS et al., 2012).

A densidade da madeira pode não estar relacionada à taxa de crescimento, mas sim à produção de lenho juvenil/lenho tardio. Maior proporção de lenho juvenil (parede celular fina) no anel de crescimento resultará em menor densidade da madeira. Ao contrário, maior formação de lenho tardio (parede celular grossa) no anel de crescimento implica em madeira de maior densidade (WIMMER; DOWNES, 2003). Períodos de seca reduzem o crescimento e, conseqüentemente, a densidade da madeira. Relação negativa ocorreu entre o crescimento e a densidade da madeira de *Fagus sylvatica* em período de seca (VAN DER MAATEN et al., 2012). A seca no início da primavera poderá desfavorecer a formação de lenho juvenil em detrimento de lenho tardio (WIMMER; DOWNES 2003), resultando em maior densidade e largura do anel de crescimento.

A correlação entre a *DA* e a *DBM* pode ser considerada baixa, e deve estar associada às diferenças na metodologia nestas determinações. As imagens de raio X possibilitaram evidenciar microfissuras e detectar regiões de densidade acentuada próximo à medula. Esse detalhamento obtido com a radiografia (*DA*) não pode ser obtido em balança hidrostática (*DBM*). Zanuncio (2016) relatou elevada *DA* obtida por *DRX*, na região da medula, decorrente do acúmulo de grãos de amido nas células do parênquima axial. Por este motivo, não foi possível estabelecer relação direta entre *DA* e *DBM*. A *DA* obtida por leitura direta (*DRX*) e a imagem digital de raios X (*IDRX*) resultou em correlação significativa, com *R* de 0,84, para *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, aos 8 anos de idade (SURDI et al., 2014).

A variação longitudinal de *DA*, de forma geral, não apresentou tendência definida, o que pode estar relacionado com a capacidade da *IDRX* em detectar e quantificar microalterações no lenho (microfissuras, acúmulo de grãos de amido e anéis de coloração escura).

Exceto para o clone B, a *DBM* está de acordo com os padrões de variação longitudinal de densidade da madeira. Ou seja, de forma geral, houve tendência de aumento no sentido base topo. Haselein et al. (2004) observaram redução da *DBM* da base até o *dap* e 25% da altura comercial, seguido de aumento até o topo, para *E. grandis*, aos 27 anos. Redução da *DBM* da base para o *dap*, também, foi observada por Goulart et al. (2003), para *E. grandis*, aos dois anos de idade. Sette Junior et al. (2009) relataram decréscimo da *DBM* até 3 m de altura de *E. grandis* com dois anos de idade, seguido de aumento até 9 m, e posterior decréscimo até o topo. O padrão de decréscimo e aumento da *DBM* para os clones A e C foi semelhante ao reportado na literatura, ou seja, a *DBM*

decreceu da base até o *dap*, seguido de aumento até 75% da altura do fuste, e decréscimo até o topo.

Alzate et al. (2005) observaram quatro modelos de variação longitudinal da *DBM* para clones de *E. grandis*, *E. saligna*, *E. grandis* x *E. saligna*: 1) decréscimo da base até 50% da altura comercial seguido por aumento até o topo; 2) pequeno aumento no sentido base topo; 3) pequeno decréscimo no sentido base topo e 4) aumento no sentido base topo. Oliveira et al. (2005) observaram redução da *DBM* no sentido base topo em seis espécies de eucalipto, exceto para *E. grandis*. Esta espécie apresentou aumento da *DBM* da base para o topo. Benin et al. (2017) observaram decréscimo da *DBM* com o aumento da altura das árvores (0,52 e 0,47 g cm<sup>-3</sup> na base e 75% da altura comercial, respectivamente), para *E. benthamii*, aos seis anos de idade. Lopes et al. (2011) não observaram variação significativa na *DBM* de *E. grandis*, *E. dunnii* e *E. urophylla*, aos 18 anos de idade, ao longo do fuste.

Goulart et al. (2003) relataram aumento da *DBC* da base até o *dap* e de 75% até 100% da altura comercial. Houve redução da *DBC* do *dap* até 50% da altura comercial para *E. grandis*, contrastando com o observado no presente trabalho. Clones de *E. globulus* apresentaram aumento da densidade ao longo do tronco diferindo entre clones em 40, 80 e 100% da altura comercial ( $p \leq 0,05$ ), não sendo observadas diferenças significativas entre os clones no *dap* e a 20 e 60% da altura comercial (LABBÉ et al., 2013). Estes resultados sugerem que genótipos que apresentem a mesma densidade na posição do *dap* podem diferir nas demais posições ao longo do perfil longitudinal.

A variação radial da *DA*, pela *IDRX* tem suporte na literatura. Ou seja, aumento de *DA* no sentido medula-casca. Castro et al. (2017) relataram aumento da *DA* do lenho no sentido medula-casca em *E. grandis*, de 36 meses, em diferentes regimes de nutrição e disponibilidade hídrica, sendo que a *DA* próxima à região da medula foi de 0,35-0,50 g cm<sup>-3</sup>, e de 0,55-0,70 g cm<sup>-3</sup> próximo da casca. Resultados similares de aumento de *DA* no sentido medula-casca foram observados para híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 6 anos de idade (ARANTES et al., 2016) e para *E. pellita* e *E. acmenioides*, aos 10 anos de idade (TOMAZELLO FILHO, 1987). Para *E. globulus* houve aumento da *DA* até a metade do raio, seguido de redução até a casca (TOMAZELLO FILHO, 1987).

A redução da *DA* no sentido medula-casca, para o clone A, nos arranjos 3,75 x 2,40 m e 6,00 x 1,50 m, foi observada em algumas posições de amostragem ao longo do tronco. Três modelos de variação radial da *DA* foram descritos para os clones

de *E. grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *E. urophylla* (ALZATE, 2004), contudo, nenhum deles evidenciou redução da *DA* no sentido medula-casca.

A elevada *DA* observada para o clone B nos arranjos espaciais 6,00 x 1,5 m e 4,00 x 3,00 m, também foi observada para *E. grandis* aos dois anos de idade, que considerou possível associação de maior *DA* na região da medula à presença de amido nas células do parênquima axial, naquela região (SETTE JUNIOR et al., 2009). Zanuncio (2016), também, relatou elevada *DA* próximo à medula para clones de *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. grandis*, na idade de 2 anos.

A redução da *DA* próximo à casca, conforme para o clone C, no arranjo espacial 4,00 x 3,00 m, também, foi relatada em *E. grandis* x *E. urophylla*, atacado por podridão branca, que promoveu decomposição dos constituintes da parede celular (lignina, celulose e hemiceluloses) (TOMAZELLO FILHO et al., 2008).

A redução do comprimento dos anéis de crescimento anual entre o 1º e o 8º anel, foi relatada para árvores de 26 progênies de *E. urophylla*, e está relacionada com o aumento da competição por recursos de crescimento (água, luz e nutrientes) (ARIZAPANA-ALMONACID, 2013), conforme observado neste trabalho. Contudo, o comprimento médio do 1º e do 5-8º anel, no presente estudo, foi superior ao comprimento médio observado para as 26 progênies de *E. urophylla*, em que os valores do 1º e do 5-8º foram: 2,34 cm, 0,31 cm, 0,50 cm, 0,26 cm e 0,15 cm (ARIZAPANA-ALMONACID, 2013).

A variação anual acumulada de *DA*, ao longo dos anéis de crescimento (0,01 a 0,03 g cm<sup>-3</sup>) foram semelhantes ao relatado por Arizapana-Almonacid (2013) (0,01-0,04 g cm<sup>-3</sup>) até o 6º ano. Para este autor, a variação absoluta (0,28 g cm<sup>-3</sup>) entre o 1º e o 8º anel, para as 26 progênies de *E. urophylla*, foi superior a *DA* acumulada (0,09 g cm<sup>3</sup>) entre o 1º e o 8º anel para os clones A, B e C, nos três arranjos espaciais.

A densidade da madeira tem sido utilizada para qualificar a madeira destinada à produção de carvão vegetal, celulose, madeira sólida e painéis (RAYMOND 2002; GOMIDE et al., 2010; LOPES 2011; SANTOS et al., 2011; ARANTES et al., 2016).

A densidade da madeira tem sido utilizada para orientar sobre os diferentes usos da madeira como na produção de carvão vegetal, celulose, madeira sólida e painéis (RAYMOND 2002; GOMIDE et al., 2010; LOPES 2011; SANTOS et al., 2011; ARANTES et al., 2016). A densitometria de raios X (*DRX*) permite avaliar a densidade da madeira mas em intervalos micrométricos, possibilitando evidenciar as variações intra

e inter-anéis de crescimento (FREYBURGER et al., 2009; RIDDER et al., 2011; CASTRO et al., 2014; JACQUIN et al., 2017), conforme observado no presente estudo. Através desta técnica, pode-se, dentre outros, inferir sobre a estrutura anatômica, bem como sobre o estado sanitário e a infestação por fungos na madeira (BUCUR et al., 1997; TOMAZELLO FILHO et al., 2008; CASTRO et al., 2014).

## 5. CONCLUSÕES

A densidade aparente e básica da madeira foi utilizada no presente estudo, tendo sido útil para a caracterização da madeira em função de genótipos de eucalipto e espaçamento e arranjo espacial. Porém, destaca-se o uso da densitometria de raios X (DRX), que tem sido amplamente utilizada em estudos sobre a densidade da madeira. Este método permitiu obter resultados de densidade da madeira em intervalos micrométricos, no sentido radial (medula-casca) e longitudinal (ao nível do *dap* e a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial). As *IDRX's* permitiram detalhar a variação da *DA* a cada 50 µm, tendo sido possível identificar três modelos de variação radial da *DA*: I - aumento da *DA* no sentido medula-casca; II - redução no sentido medula-casca e, III - aumento próximo da medula (medula-1,5 cm), seguido de redução (1,5-2,0 cm) e posterior aumento até a casca. Porém, o uso da *IDRX* não permitiu identificar com clareza padrões de variação longitudinal. As menores *DA* e *DBM*, foram observadas para o clone B, e para os clones A e B, os menores espaçamentos e arranjos espaciais com maior retangularidade resultaram em menores *DA* e *DBM*.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 6p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma NBR 7190**: Projetos de estrutura da madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997, 107p.

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *E. urophylla***. 2004. 133f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais – Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ALZATE, S. B.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, n. 68, p. 87-95, 2005.

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; LIMA, J. T., VIDAURRE, G. B. Densitometria de raios X na madeira e carvão de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* ST Blake. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 155-162, 2016.

ARIZAPANA-ALMONACID, M. A. **Avaliação do crescimento e da qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, de 8 anos, de teste de progênie visando a produção de carvão.** 2013. 161f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BENIN, C. C; WATZLAWICK, L. F.; HILLIG, E. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1375-1384, 2017.

BUCUR, V.; GARROS, S.; NAVARRETE, A.; DE TROYA, M., GUYONNET, R. Kinetics of wood degradation by fungi with x-ray microdensitometric technique. **Wood Science and Technology**, v. 31, n. 5, p. 383-389, 1997.

CARDOSO, G. V. **Otimização do cozimento kraft para produção de celulose a partir de madeiras de *Eucalyptus globulus* com diferentes teores de lignina.** 2002. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CASSIDY, M.; PALMER, G.; SMITH, R. G. B. The effect of wide initial spacing on wood properties in plantation grown *Eucalyptus pilularis*. **New Forests**, v. 44, n. 6, p. 919-936, 2013.

CASTRO, V. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; SURDI, P. G. Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de *Pinus (Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf.) por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 353-360, 2014.

CASTRO, V. R.; SURDI, P. G.; JUNIOR, C. R. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAIX, G.; LACLAU, J. P. Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1017-1027, 2017.

DEBELL, D. S.; KEYES, C. R.; GARTNER, B. L. Wood density of *Eucalyptus saligna* grown in Hawaiian plantations: Effects of silvicultural practices and relation to growth rate. **Australian Forestry**, v. 64, n. 2, p. 106-110, 2001.

DOWNES, G.; HARWOOD, C.; WASHUSEN, R.; EBDON, N.; EVANS, R.; WHITE, D.; DUMBRELL, I. Wood properties of *Eucalyptus globulus* at three sites in Western Australia: effects of fertilizer and plantation stocking. **Australian Forestry**, v. 77, n. 3-4, p. 179-188, 2014.

ELOY, E.; CARON, B. O.; SILVA, D. A.; SCHMIDT, D.; RÔMULO, T.; BEHLING, A.; ELLI, E. F. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 551-559, 2014.

FERREIRA, A. T. B. **Avaliação da estrutura anatômica e da densidade aparente do lenho e do carvão de árvores de *Eucalyptus* sp. e de *Corymbia* sp.** 2013. 131f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais – Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

FREYBURGER, C.; LONGUETAUD, F.; MOTHE, F.; CONSTANT, T.; LEBAN, J. M. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. **Annals of Forest Science**, v. 66, p. 804, 2009.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. D.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft. **Revista Árvore**, v. 34, n. 2, p. 339-344, 2010.

GOMINHO J.; LOURENÇO A.; NEIVA, D.; FERNANDES L.; AMARAL M. E.; DUARTE A. P.; SIMÕES R.; PEREIRA H. Variation of wood pulping and bleached pulp properties along stem in mature *Eucalyptus globulus* trees. **Bioresources**, v. 10, n. 4, p. 7808–7816, 2015.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZA, S. F. B.; LIMA, W. P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, 2013.

GOULART, M.; HASELEIN, C. R.; HOPPE, J. M.; FARIAS, J. A.; PAULESKI, D. T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, v. 13, p. 167-175, 2003.

HASELEIN, C. R.; LOPES, M. C.; SANTINI, E. J.; LONGHI, S. J.; ROSSO, S.; FERNANDES D. L. G.; MENEZES, L. F. Características tecnológicas da madeira de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 145–155, 2004.

HEIN, P. R. G.; CHAIX, G.; CLAIR, B.; BRANCHERIAU, L.; GRIL, J. Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along *Eucalyptus* trunks grown under contrasting growth conditions. **Trees**, v. 30, n. 3, p. 871-882, 2016.

HENRIQUES, E. P.; MORAES, C.; SEBBENN, A. M.; TOMAZELLO FILHO, M.; MORAES, M.; MORI, E. S. Estimativa de parâmetros genéticos para caracteres silviculturais e densidade do lenho em teste de progênies de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 105-113, 2017.

IGARTÚA, D.; MONTEOLIVA, S. Densidad básica, longitud de fibras y crecimiento en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* en Argentina. **Bosque**, v. 31, n. 2, p. 150-156, 2010.

JACQUIN P.; LONGUETAUD F.; LEBAN J. M.; MOTHE F. X-ray

microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices.

**Dendrochronologia**, v. 42, p. 42–50, 2017.

KNAPIC, S.; PIRRALHO, M.; LOUZADA, J. L.; PEREIRA, H. Early assessment of density features for 19 *Eucalyptus* species using X-ray microdensitometry in a perspective of potential biomass production. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 1, p. 37-49, 2014.

LABBÉ, R.; DROPELMANN, F.; BALOCCHI, C. Variación de la densidad de la madera y rendimiento pulpable en clones de *Eucalyptus globulus* evaluado con espectroscopía de infrarrojo cercano. **Bosque (Valdivia)**, v. 34, n. 3, p. 3-4, 2013.

LASSERRE, J. P.; MASON, E. G.; WATT, M. S.; MOORE, J. R. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 9, p. 1924-1931, 2009.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 279-291, 2000.

LOPES, C. S. D.; NOLASCO, A. M.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. S.; PANSINI, A. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p.315-322, 2011.

MATTOS, B. D.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; MELO, R. R.; SANTINI, E. J. Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p. 121-126, 2011.

MILAGRES, F. **Avaliação da madeira de híbridos de *Eucalyptus globulus* com *E. grandis* e *urophylla*, para produção de celulose, utilizando espectroscopia NIR.** 2009. 125f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MIRANDA, I.; ALMEIDA, M. H.; PEREIRA, H. Influence of provenance, subspecies, and site on wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. **Wood and Fiber Science**, v. 33, n.1, p. 9-15, 2001.

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 3, p. 407-419, 2008.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; OLIVEIRA, J. G. L., CAMPINHOS, E.; GOMES, F.; VIDAURRE, G. B. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-10, 2017.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de Clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 97, p. 15-28, 2013.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa Kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* ST Blake. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 901-909, 2004.

QUILHÓ, T.; PEREIRA, H. Within and between- tree variation of bark content and wood density of *Eucalyptus globulus* in commercial plantations. **IAWA Journal**, v. 22, n. 3, p. 255-265, 2001.

RAYMOND, C. A. Genetics of *Eucalyptus* wood properties. **Annals of Forest Science**, v. 59, n. 5-6, p. 525-531, 2002.

RAYMOND, C. A.; MUNERI, A. Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. I. Basic density. **Wood Science and Technology**, v. 35, n. 1, p. 27-39, 2001.

REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 497-505, 2012.

RESQUIN, F.; BARRICHELO, L. E. G.; SILVA JÚNIOR, F. G. D.; BRITO, J. O.; SANSIGOLO, C. A. Wood quality for kraft pulping of *Eucalyptus globulus* origins planted in Uruguay. **Scientia Forestalis**, n. 72, p. 57-66, 2006.

RIDDER, M.; VAN DEN BULCKE, J.; VANSTEENKISTE, D.; VAN LOO, D.; DIERICK, M.; MASSCHAELE, B.; WITTE, Y.; MANNES, D.; LEHMANN, E.; BEECKMAN, H. High-resolution proxies for wood density variations in *Terminalia superba*. **Annals of Botany**, v. 107, n. 2, p. 293-302, 2011.

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. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ROCHA, M. F. V.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARDOSO, M. T.; HEIN, P. R.G. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 28, n. 3, p. 243-248, 2016.

ROSA, C. A. B. **Influência do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose Kraft**. 2003. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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

SEREGHETTI, G. C.; LANÇAS, K. P.; SARTORI, M. S.; REZENDE, M. A.; SOLER, R. R. Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 3, p. 257-262, 2015.

- SETTE JÚNIOR, 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. **Floresta**, v. 39, n. 3, p. 535-546, 2009.
- SHARMA, S. K.; SHUKLA, S. R.; SHASHIKALA, S.; SRI POORNIMA, V. Axial variations in anatomical properties and basic density of *Eucalypt urograndis* hybrid (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*) clones. **Journal of Forestry Research**, v. 26, n. 3, p. 739-744, 2015.
- SORANSO, D. R.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; SILVA, J. G. M.; ARANTES, M. D. C. Variabilidade física e anatômica da madeira de *Khaya ivorensis* A. Chev. em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, v. 44, n.110, p. 519-526, 2016.
- SURDI, P. G. et al. Perfil de densidade do lenho utilizando métodos radiográficos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 102, p. 229-236, 2014.
- TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita*, *E. acmenoides*. **Revista IPEF**, n. 36, p. 35–42, 1987.
- TOMAZELLO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M. P.; OLIVEIRA, J. T.; BALLARIN, A. W.; BENJAMIN, C. A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.
- TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v.7, n.2, p.104-114, 2001.
- VALE, A. T.; SANTOS, I. D.; SANTANA, E. M. A.; Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.
- VAN DER MAATEN, E.; VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M.; SPIECKER, H. Temporally resolved intra-annual wood density variations in European beech (*Fagus sylvatica* L.) as affected by climate and aspect. **Annals of Forest Research**, v. 55, n. 1, p. 113–124, 2012.
- WARREN, E.; SMITH, R. G. B.; APIOLAZA, L. A.; WALKER, J. C. Effect of stocking on juvenile wood stiffness for three *Eucalyptus* species. **New Forests**, v. 37, n. 3, p. 241-250, 2009.
- WIMMER, R.; DOWNES, G. Temporal variation of the ring width–wood DENSITY relationship in norway spruce grown under two levels of anthropogenic disturbance. **IAWA Journal**, v. 24 n. 1, p. 53-61, 2003.
- WIMMER, R.; DOWNES, G.; EVANS, R.; FRENCH, J. Effects of site on fibre, kraft pulp and handsheet properties of *Eucalyptus globulus*. **Annals of Forest Science**, v. 65, n. 6, p. 1-7, 2008.
- ZANUNCIO, A. J. V. **Avaliação de clones de eucalipto sujeitos a danos pelos ventos e utilização de sua madeira na indústria florestal**. 2016. 67f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

## CONCLUSÕES GERAIS

A análise do crescimento permitiu concluir sobre a produtividade dos clones de eucalipto, e indicar o clone B (híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis*), no arranjo 3,75 x 2,40 m, como o genótipo mais produtivo para as condições de estudo. O clone D (híbrido de *E. urophylla* x *E. globulus*), no arranjo 6,00 x 1,50, foi o menos produtivo. De forma geral, a menor da distância entre plantas na linha de plantio resultou em redução da produtividade, independentemente da rotação regulatória (5, 6 ou 7 anos), e arranjos espaciais com maior retangularidade, proporcionaram maior taxa de crescimento inicial e menor idade de máximo incremento corrente anual. Os resultados indicam que os arranjos espaciais com maior retangularidade devem ser evitados, pois resultam em indivíduos com menor diâmetro médio e povoamentos de menor produtividade.

Os modelos de predição e projeção podem ser usados para gerar estimativas precisas do volume de madeira por classe de diâmetro. O espaçamento de 12 m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>, resultou em maior número de árvores nas maiores classes de diâmetro, e o arranjo espacial 6,00 x 1,50 m, em maior frequência de árvores em classes de diâmetro reduzido. A amplitude da distribuição de diâmetros e o ingresso de árvores em sucessivas classes de diâmetro, ao longo do tempo, foram mais influenciados pelo clone do que pelo arranjo espacial.

A densidade aparente e básica da madeira foi útil para caracterização da madeira em função de genótipos de eucalipto, e espaçamento e arranjo espacial. Destaca-se o uso da densitometria de raios X (DRX), que permitiu obter resultados de densidade da madeira em intervalos micrométricos, no sentido radial (medula-casca) e longitudinal (ao nível do *dap* e a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial). As *IDRX*'s permitiram identificar três modelos de variação radial da *DA*: I - aumento da *DA* no sentido medula-casca; II - redução no sentido medula-casca e, III – aumento próximo da medula (medula-1,5 cm), seguido de redução (1,5-2,0 cm) e posterior aumento até a casca. Contudo, o uso da *IDRX* não permitiu identificar com clareza padrões de variação longitudinal. As menores *DA* e *DBM*, foram observadas para o clone B, e para os clones A e B, os menores espaçamentos e arranjos espaciais com maior retangularidade resultaram em menores *DA* e *DBM*.