

**CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO  
DO ESPAÇAMENTO UTILIZANDO DELINEAMENTO  
SISTEMÁTICO TIPO “LEQUE”**

**PRISCILA SALES RODRIGUES AQUINO**

**TESE DE DOUTORADO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO  
DO ESPAÇAMENTO UTILIZANDO DELINEAMENTO  
SISTEMÁTICO TIPO “LEQUE”**

**PRISCILA SALES RODRIGUES AQUINO**

**ORIENTADOR: PROF. DR. MAURO ELOI NAPPO**

**COORIENTADOR: PROF. DR. RENATO VINÍCIUS OLIVEIRA  
CASTRO**

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.TD-079/2017  
BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2017**

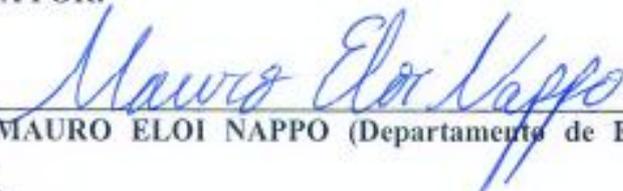
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO  
UTILIZANDO DELINEAMENTO SISTEMÁTICO TIPO ‘LEQUE’”

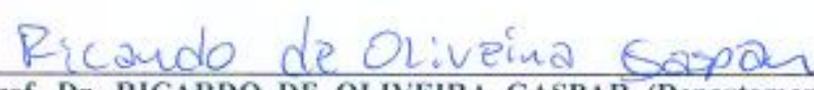
PRISCILA SALES RODRIGUES

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

  
Prof. Dr. MAURO ELOI NAPPO (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Presidente)

  
Prof. Dr. EDER PEREIRA MIGUEL (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Examinador Interno)

  
Prof. Dr. RICARDO DE OLIVEIRA GASPAR (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Examinador Interno)

  
Prof. Dr. MÁRCIO LELES ROMARCO DE OLIVEIRA (Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM);  
(Examinador Externo)

Prof. Dr. REGINALDO SÉRGIO PEREIRA (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB).  
(Examinador Suplente)

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SAQ657c	Sales Rodrigues Aquino, Priscila Crescimento inicial de eucalipto em função do espaçamento utilizando delineamento sistemático tipo "leque" / Priscila Sales Rodrigues Aquino; orientador Mauro Eloi Nappo; co orientador Renato Vinicius Oliveira Castro. -- Brasília, 2017. 130 p.  Tese (Doutorado - Doutorado em Ciências Florestais) -- Universidade de Brasília, 2017.  1. Silvicultura. 2. Manejo Florestal. 3. Tratamentos silviculturais. 4. Eucalipto. 5. Delineamento sistemático. I. Eloi Nappo, Mauro, orient. II. Vinicius Oliveira Castro, Renato, co-orient. III. Título.
---------	---

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AQUINO, P. S. R. (2017). Crescimento inicial de eucalipto em função do espaçamento utilizando delineamento sistemático tipo "leque". Tese de doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD-079/2017, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Priscila Sales Rodrigues Aquino

TÍTULO: Crescimento inicial do eucalipto em função do espaçamento utilizando delineamento sistemático tipo "leque".

GRAU/ANO: Doutora/2017

É concedida à Universidade de Brasília-UnB permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias, com o propósito exclusivamente acadêmico e/ou científico. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Priscila Sales Rodrigues Aquino  
Endereço eletrônico: priscila.ueg@gmail.com

*A Deus,*  
**OFEREÇO**

*A Minha Filha Flora e ao meu Esposo Marcelo*  
**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A **Deus, meu Pai Eterno, Amoro e Misericordioso, Soberano** possuidor de toda ciência e sabedoria e me conduz em todos os meus caminhos e sem **Ele** nada sou.

Ao meu esposo, **Marcelo Victor**, meu grande amigo e maior incentivador, agradeço por todo apoio, compreensão e por todo amor e dedicação a nossa família.

A minha filha **Flora**, por fazer os meus dias mais felizes com seus sorrisos contagiantes e por toda a calma e paz que me transmite.

Ao meu orientador **Mauro Eloi Nappo**, por todos ensinamentos transmitidos, amizade e pela imensa confiança depositada em mim, serei grata por toda a vida.

Ao meu coorientador **Renato Vinícius** pelo seu grande auxílio e colaboração ao meu trabalho.

A minha mãe **Maria de Fátima**, por acreditar em mim, por suas orações constantes e pelo apoio e amor incondicional. Você é minha rainha.

A meu pai **Moacir** por torcer pela minha conquista.

Ao meu irmão **Marcos**, por ser meu grande incentivador na área acadêmica, pelo auxílio e suporte constantes durante o desenvolvimento de meus trabalhos, enriquecendo-os com seus conhecimentos. Sua dedicação é um grande exemplo para mim, obrigada por tudo.

A meu irmão **Marcelo**, por todo amor, carinho e torcida.

As minha amiga **Bruna Gesiane**, que além de companheira não mediu esforços para me ajudar nas coletas de dados. Você é uma grande irmã.

“Filho meu, se aceitares as minhas palavras, e esconderes contigo os meus mandamentos, para fazeres o teu ouvido atento à sabedoria; e inclinares o teu coração ao entendimento; se clamares por conhecimento, e por inteligência alçares a tua voz, se como a prata a buscares e como a tesouros escondidos a procurares, então entenderás o temor do **Senhor**, e acharás o conhecimento de **Deus**. Porque o **Senhor** dá a sabedoria; da sua boca é que vem o conhecimento e o entendimento.”

Provérbios 2:1-6

## RESUMO

### CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO UTILIZANDO DELINEAMENTO SISTEMÁTICO TIPO “LEQUE”

**Autora: Priscila Sales Rodrigues Aquino**

**Orientador: Prof. Dr. Mauro Eloi Nappo**

**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

**Brasília, junho de 2017**

Considerando a importância da otimização da produção florestal o espaçamento de plantio é uma das práticas silviculturais de maior importância, pois apresenta implicações ecológicas, silviculturais e econômicas no produto final. Portanto, o trabalho objetivou avaliar a influência do espaçamento nas variáveis de crescimento e produção inicial de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* implantado sob delineamento sistemático tipo “leque”. O ensaio foi conduzido em Brasília, DF, na Fazenda Água Limpa e composto por dois Blocos com 12 tratamentos (espaçamentos). As densidades de plantio avaliadas variaram de 0,50 m<sup>2</sup> a 41,25 m<sup>2</sup> de área por planta. Foram coletados dados individuais de altura total (Ht) e diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) dos quatro aos 24 meses. Utilizou-se análise estatística descritiva, modelos de regressão, análise geoestatística e teste de identidade de modelos para avaliação do efeito dos espaçamentos nas variáveis estudadas. O teste de identidade de modelos foi empregado para avaliar a necessidade de remoção das plantas adjacentes às falhas e/ou mortas da análise dos dados. Adicionalmente, para análise comparativa das médias dos fatores de forma e da porcentagem de casca foi utilizado o teste Scott-Knott. Os dados do Bloco 1 foram utilizados no ajuste dos modelos de regressão para avaliação do efeito dos espaçamentos nas variáveis estudadas e os dados do Bloco 2 destinados à validação do melhor modelo ajustado. Verificou-se que o crescimento em altura, diâmetro e volume bem como a forma da árvore e porcentagem de casca sofreram influência significativa dos diferentes espaçamentos. Porém as variáveis de crescimento e produção não apresentaram dependência espacial. Os resultados indicaram que as variáveis avaliadas também foram afetadas pela idade. O incremento médio mensal (IMM) em altura aos 12 meses foi maior nas menores densidades de plantio, porém aos 24 meses o maior IMM em altura foi observado nos espaçamentos intermediários. A partir da idade de 16 meses o IMM em DAP apresentou uma correlação positiva com o espaçamento, sendo os maiores valores de DAP observados nos espaçamentos mais amplos (com exceção do maior espaçamento). Os modelos de melhor desempenho para descrever o comportamento das variáveis altura total, DAP e volume foram o modelo logístico e função racional. O teste de identidade de modelos demonstrou não haver diferença nas análises de regressão considerando modelos com a inclusão e sem a inclusão das plantas adjacentes as falhas e mortas. O delineamento sistemático tipo “leque” permitiu avaliar o crescimento e produção inicial de árvores de eucalipto numa amplitude de densidade de plantas que dificilmente seria avaliada via delineamentos tradicionais.

**Palavras-chave:** densidade de plantio, *Eucalyptus* sp., círculos de Nelder, teste de identidade, modelos de regressão

## **ABSTRACT**

### **INITIAL GROWTH OF EUCALYPTUS AS A FUNCTION OF PLANTING SPACING USING "FAN" SYSTEMATIC DESIGN**

**Authoress: Priscila Sales Rodrigues Aquino**

**Supervisor: Dr. Mauro Eloi Nappo**

**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

**Brasília, June of 2017**

Considering the importance of the optimization of forest production, planting spacing is one of the most important silvicultural practices, since it has ecological, silvicultural and economic implications in the final product. The objective of this work was to evaluate the influence of the planting spacing on the growth and initial production variables of a clonal hybrid of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* implanted under a "fan" systematic design. The experiment was carried out in Brasilia, Federal District, at Fazenda Água Limpa and was designed in two blocks with 12 treatments (planting spacing). The planting densities evaluated ranged from 0.50 m<sup>2</sup> to 41.25 m<sup>2</sup> of area per plant. Individual data of total height (H) and diameter at 1.30 m from the soil (DBH) during the fourth month to the twenty-fourth were collected. Descriptive statistical analysis, regression models, geostatistical analysis, and model identity testing were used to evaluate the effect of spacing on the studied variables. The model identity test was used to evaluate the need to remove the plants adjacent to the flaws and/or dead plants data analysis. Additionally, the Scott-Knott test was used for comparative analysis of the means of the form factor and the bark percentages. The data of Block 1 were used to fit the regression models in order to evaluate the effect of the spacings in the studied variables and the data of Block 2 was used to validate the best-fitted model. It was verified that the growth in height, diameter, and volume, as well as the form factor of the tree and bark percentages had a significant influence as a function of plating spacing. However, growth and production variables did not show spatial dependence. The results indicated that the variables evaluated were also affected by age. The mean monthly increase (IMM) in height at the 12th month was higher at lower planting densities, however, at 24 th month the highest mean monthly increase in height was observed at intermediate spacing. From the age of 16 months the mean monthly increase in DBH showed a positive correlation with the plating spacing, with the highest DBH values observed in greater spacing (with the exception of the largest spacing). The best models to describe the behavior of the variables total height, DBH and, volume were the logistic model and rational function. The model identity test showed no difference in the regression analysis considering models with the inclusion and without the inclusion of the adjacent plant, flaws and/or dead. The systematic "fan" design allowed to evaluate the growth and initial production of eucalyptus trees in an amplitude of plant density that could hardly be evaluated through traditional designs.

**Keywords:** planting density, *Eucalyptus sp.*, Nelder plots, identity test, regression models

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.1. Objetivo geral.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. O GÊNERO Eucalyptus NO BRASIL .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. ESPAÇAMENTO DE PLANTIO.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3.1. Espaçamento versus Crescimento da árvore .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.2. Espaçamento versus qualidade da madeira.....</b>	<b>13</b>
<b>1.3.3. Espaçamento versus Produção .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3.4. Espaçamento versus Mortalidade .....</b>	<b>21</b>
<b>1.3.5. Espaçamento versus custos de produção.....</b>	<b>23</b>
<b>1.4. DELINEAMENTO SISTEMÁTICO TIPO “LEQUE” .....</b>	<b>25</b>
<b>1.5. ANÁLISE DE DADOS DE DELINEAMENTOS SISTEMÁTICOS.....</b>	<b>27</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.1. Caracterização e instalação do delineamento sistemático tipo “leque” ..</b>	<b>30</b>
<b>2.2. COLETA DE DADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.1. Diâmetro e Altura .....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.2. Dados de volume e espessura de casca.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.3. Fator de forma .....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.4. Falhas e mortalidade .....</b>	<b>37</b>
<b>2.2.5. Dados climáticos .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3. ANÁLISE DOS DADOS .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.1. Análise descritiva .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.2. Análise geoestatística.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3. Análise de regressão .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.4. Teste Scott-Knott .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.5. Teste de Identidade de modelos com variáveis Dummy .....</b>	<b>41</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>3.1. SOBREVIVÊNCIA.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2. ANÁLISE GEOESTÁTICA .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3. TESTE DE IDENTIDADE DE MODELOS COM VARIÁVEIS Dummy ...</b>	<b>45</b>
<b>3.4. CRESCIMENTO EM ALTURA .....</b>	<b>48</b>
<b>3.4.1. Ajuste e validação dos modelos de regressão para a variável altura total (Ht) .....</b>	<b>54</b>

<b>3.5. CRESCIMENTO EM DIÂMETRO (DAP)</b> .....	<b>60</b>
<b>3.5.1. Ajuste e validação dos modelos de regressão para a variável diâmetro (DAP)</b> .....	<b>67</b>
<b>3.6. PRODUÇÃO EM VOLUME</b> .....	<b>72</b>
<b>3.7. FATOR DE FORMA</b> .....	<b>83</b>
<b>3.8. PORCENTAGEM DE CASCA</b> .....	<b>86</b>
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	<b>89</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>91</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>121</b>
.....	<b>121</b>
<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>122</b>
<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>123</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Espaçamento de plantio, área por planta e densidade de plantas para 12 tratamentos (espaçamentos) no delineamento sistemático tipo “leque”.....	31
<b>Tabela 2:</b> Modelos de resposta ao espaçamento, testados para as variáveis: DAS, DAP, altura total, volume com e sem casca, espessura da casca e área basal, obtidas no experimento com delineamento experimental tipo “leque”. .....	40
<b>Tabela 3:</b> Estrutura da análise de variância para o teste de identidade de modelos. ....	42
<b>Tabela 4:</b> Porcentagem de sobrevivência das árvores em cada tratamento aos 12 e 24 meses. ....	43
<b>Tabela 5:</b> Teste de identidade aplicado aos modelos completo e reduzido para o crescimento em altura total e diâmetro das árvores de eucalipto em diferentes espaçamentos, em Brasília, DF. ....	46
<b>Tabela 6:</b> Estatísticas descritivas para as variável altura total (Ht) das árvores para cada tratamento dos quatro aos 24 meses. ....	48
<b>Tabela 7:</b> Valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre a variável altura total e as variáveis área vital disponível em cada tratamento e DAP nas idades de 4 e 24 meses. ....	50
<b>Tabela 8:</b> Estatísticas de precisão e coeficientes dos seis modelos ajustados para altura total das árvores do híbrido clonal de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> avaliadas dos até 24 meses de idade. ....	54
<b>Tabela 9:</b> Estatísticas de precisão dos modelos validados para a variável altura total dos quatro aos 24 meses.....	55
<b>Tabela 10:</b> Estatísticas descritivas para a variável DAP das árvores para cada tratamento dos quatro aos 24 meses.....	60
<b>Tabela 11:</b> Valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre a variável DAP e a variável área vital disponível em cada tratamento na idade de 8 e 24 meses.....	631
<b>Tabela 12:</b> Estatísticas de precisão e coeficientes dos seis modelos ajustados para diâmetro das árvores do híbrido clonal de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> avaliadas dos quatro aos 24 meses.....	673
<b>Tabela 13:</b> Estatísticas de precisão dos modelos validados para a variável diâmetro dos oito aos 24 meses. ....	687
<b>Tabela 14:</b> Estatísticas de precisão e coeficientes dos seis modelos ajustados para volume com casca por planta e por hectare das 60 árvores medidas aos 16 e 24 meses.....	68

<b>Tabela 15:</b> Estatísticas de precisão e coeficientes dos seis modelos ajustados para volume sem casca por planta e por hectare das 60 árvores medidas aos 16 e 24 meses.....	787
<b>Tabela 16:</b> Validação dos modelos de volume com casca médio por planta e por hectare aos 16 e 24 meses.....	798
<b>Tabela 17:</b> Análise de variância para os fatores de forma das árvores em cada tratamento aos 16 meses.....	79
<b>Tabela 18:</b> Análise de variância para os fatores de forma das árvores em cada tratamento aos 24 meses.....	84
<b>Tabela 19:</b> Teste de agrupamento Scott-Knott para os fatores de forma das árvores em cada tratamento. ....	85
<b>Tabela 20:</b> Análise de variância para a porcentagem de casca das árvores em cada tratamento aos 16 meses.....	87
<b>Tabela 21:</b> Análise de variância para a porcentagem de casca das árvores em cada tratamento aos 24 meses.....	87
<b>Tabela 22:</b> Teste de agrupamento Scott-Knott para a porcentagem média de casca das árvores em cada tratamento. ....	87

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Repetições de delineamentos sistemáticos tipo “leque” no estudo de espaçamentos (NAMKOONG, 1966 apud STAPE, 1995).....	26
<b>Figura 2:</b> Localização geográfica da área de estudo (15° 58’ 89’’S e 47° 54’ 52’’O), Brasília, DF, imagem obtida no programa Google Earth – Data da imagem: 09 de junho de 2015.	30
<b>Figura 3:</b> Valores do raio inicial ( $r_0$ ), raios dos tratamentos ( $r_1$ a $r_n$ ) ângulo entre os raios ( $\theta$ ) e área associada a cada planta ( $A_1$ a $A_n$ ) no delineamento sistemático tipo “leque”. Adaptado de Stape (1995). .....	31
<b>Figura 4:</b> Croqui da instalação do experimento em delineamento sistemático tipo “leque” com 12 tratamentos e 36 repetições de com híbrido clonal de <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> . .....	32
<b>Figura 5:</b> a – Detalhe do subsolador utilizado b– Detalhe da subsolagem e aplicação do superfosfato simples por metro linear no fundo do sulco c e d - plantio das mudas e aplicação de hidrogel por cova; e e f – Detalhe do experimento após o término da instalação. ....	33
<b>Figura 6:</b> a e b – Medições dos diâmetros das seções, a cada 0,5 m, para realização da cubagem, c – Detalhe da cubagem em pé (medições dos diâmetros das seções mais altas). .....	35
<b>Figura 7:</b> a –Coleta de amostra de casca na altura do solo; b – Trado utilizado para coleta; c – Detalhes do paquímetro e medição da amostra de casca. ....	36
<b>Figura 8:</b> Exemplo de semivariograma e seus parâmetros. Fonte: Adaptado de Camargo (1998). .....	39
<b>Figura 9:</b> Temperatura média mensal e média de 30 anos de dados (1961-1990) (a) e precipitação mensal acumulada e média de 30 anos de dados (1961-1990) (b) em Brasília, DF. ....	44
<b>Figura 10:</b> Incremento médio mensal (IMM em altura total (Ht) das árvores nos diferentes espaçamentos ao longo do tempo .....	51
<b>Figura 11:</b> Incremento médio mensal (IMM) da Altura total (Ht) das árvores nos diferentes espaçamentos ao longo do tempo. ....	53
<b>Figura 12:</b> Distribuição gráfica dos resíduos da variável altura total para os modelos validados dos quatro aos 24 meses. ....	56
<b>Figura 13:</b> Altura total (m) aos 4, 8, 12, 16, 20 e 24 meses em função da área vital dos tratamentos e representação gráfica dos modelos: Função racional e Logístico. ....	59

<b>Figura 14:</b> Incremento médio mensal (IMM) do DAP das árvores nos diferentes espaçamentos ao longo do tempo .....	64
<b>Figura 15:</b> Diâmetro a altura do peito (DAP) com casca das árvores nos espaçamentos ao longo do tempo. ....	71
<b>Figura 16:</b> Distribuição gráfica dos resíduos da variável diâmetro para os modelos validados dos oito aos 24 meses. ....	70
<b>Figura 17:</b> Diâmetro (DAP) aos 8, 12, 16, 20 e 24 meses em função da área vital dos tratamentos e representação gráfica do modelo Função racional. ....	72
<b>Figura 18:</b> Volume médio por árvore nos diferentes espaçamentos aos 16 meses de idade. ....	74
<b>Figura 19:</b> Volume médio por hectare nos diferentes espaçamentos aos 16 meses de idade. ....	74
<b>Figura 20:</b> Volume médio por árvore nos diferentes espaçamentos aos 24 meses de idade. ....	75
<b>Figura 21:</b> Volume médio por hectare nos diferentes espaçamentos aos 24 meses de idade ....	75
<b>Figura 22:</b> Distribuição gráfica dos resíduos percentuais da variável volume por planta para os modelos validados nas idades de 16 e 24 meses. ....	80
<b>Figura 23:</b> Distribuição gráfica dos resíduos percentuais da variável volume por hectare para os modelos validados nas idades de 16 e 24 meses. ....	81
<b>Figura 24:</b> Volume com casca por planta e por hectare aos 16 e 24 meses em função da área vital dos tratamentos e representação gráfica do modelo Função racional. ....	83
<b>Figura 25:</b> Fator de forma média para cada tratamento aos 16 e 24 meses.....	84
<b>Figura 26:</b> Porcentagem de casca para cada tratamento aos 16 e 24 meses.....	86

# 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos da silvicultura, juntamente com as práticas de manejo, é otimizar a produção florestal, para que desta obtenha-se produto ou produtos em quantidade e qualidade para um determinado uso, em menor tempo e custo resguardando a capacidade produtiva para o futuro.

As formas em que as florestas contribuem para o bem-estar humano são amplas e diversas. De acordo com o relatório de Avaliação Global dos Recursos Florestais (Global Forest Resources Assessment – FRA 2015), as florestas naturais e plantadas exercem um papel fundamental na luta contra a pobreza rural, gera segurança alimentar e assegura meios de vida dignos. Elas, também, oferecem oportunidades para o crescimento verde, em médio prazo, prestação de serviços ambientais primordiais como: melhoria da qualidade do ar e água, conservação da biodiversidade de flora e fauna, proteção, conservação e recuperação do solo e mitigação dos efeitos das alterações climáticas (FRA, 2015). Adicionalmente, segundo o SNIF – Sistema Nacional de Informações Florestais (2015), o setor florestal tem importância, no mundo inteiro, como fornecedor de energia ou matéria-prima para a indústria da construção civil e de transformação.

Neste sentido o Brasil se destaca, pois de acordo com o SFB (2013) o país possui a segunda maior cobertura florestal do mundo (53,56% de florestas naturais e 0,84% de florestas plantadas) e desenvolveu tecnologia avançada para a exploração de florestas e para a transformação industrial da madeira (JUVENAL e MATTOS, 2002). Com relação a florestas plantadas, o *Eucalyptus* é o gênero mais plantado em todo território nacional, pois a madeira de eucalipto é destinada ao abastecimento da maior parte da indústria de base florestal no Brasil. O gênero *Eucalyptus* é importante, também, na economia de mais de cem países (REMADE, 2001). Contudo, o Brasil tem a seu favor condições favoráveis de clima, extensão territorial, topográficas, tecnologia dentre outras que proporciona a produção florestal uma competitividade muito superior a observada em países de clima temperado. Esta situação representa uma grande vantagem para as empresas de base florestal no comércio internacional (MENDES, 2005).

A silvicultura é a base predominante do setor florestal e, portanto, todo conhecimento adquirido por meio desta ciência será refletido em ganhos sócio econômicos e ambientais.

Dentre as práticas silviculturais, mais importantes, pode-se citar: a escolha da espécie/procedência, o uso de hibridação e a clonagem; preparo, conservação, fertilização e

correção do solo; a escolha do espaçamento; o controle de pragas, doenças e de matocompetição; os cortes silviculturais de limpeza, liberação, sanidade, desrama e desbaste; os métodos de regeneração, como talhadia, alto fuste, árvores porta semente, regeneração sob cobertura, enriquecimento e condução da regeneração natural dentre outros utilizados para definir as práticas de manejo.

Considerando a importância da otimização da produção florestal, a escolha correta do espaçamento é fundamental devido as suas implicações ecológicas e silviculturais no produto final (BALLONI e SIMÕES, 1980). O espaçamento não influencia apenas o crescimento individual da árvore, mas também o crescimento em conjunto (STAPE, 1995), e a seleção do melhor espaçamento dependerá de diversos fatores, tais como espécie, clima, matéria prima desejada, dentre outros. Contudo, a determinação do melhor espaçamento não é algo simples, diversos estudos como os de TOUMEY e KORSTIAN, 1957; SMITH, 1962; COELHO et al., 1970; BALLONI e SIMÕES, 1980; BERGER et al., 2002; COUTO et al., 2010; INOUE et al., 2011; NASCIMENTO et al., 2012; BENIN et al., 2014; LELES et al., 2014; CARON et al., 2015 foram e estão sendo realizados ao longo do tempo, mesmo porque, a evolução das práticas silviculturais e de novas tecnologias, os métodos de análise e o aprimoramento das interpretações são constantes o que retroalimenta os estudos de espaçamento. Cabe destacar que estudos sobre tratamentos silviculturais, incluindo o espaçamento, são fundamentais devido a importância que o setor florestal representa para a economia brasileira.

De forma geral, ensaios experimentais com espécies florestais demandam extensas áreas para sua instalação (MORAES et al., 2013), especialmente quando o objetivo é selecionar o melhor espaçamento de plantio (ODA-SOUZA et al., 2008). Para tais ensaios experimentais são frequentemente empregados os delineamentos inteiramente casualizados ou em blocos ao acaso (ANDRADE, 1961; STURION et al, 1988; ASSIS et al., 2006; MAGALHÃES et. al., 2007; ROCHA, 2011; PAULINO, 2012; SILVA et al., 2016), os quais, devido as amplas áreas para sua instalação, acarretam dificuldades operacionais e de controle local de variáveis como topografia, solos entre outras.

Uma alternativa à amostragem aleatória e ao uso de grandes áreas experimentais é o uso de delineamentos sistemáticos, como os propostos por Nelder (1962). Nos delineamentos sistemáticos, não há casualização dos tratamentos, sendo estes dispostos sistematicamente dentro da área experimental, a qual pode ser ou não em blocos. Entretanto, estes delineamentos têm alguns fatores limitantes, como alta sensibilidade dos valores perdidos e a impossibilidade de uso das análises estatísticas tradicionais, como, por exemplo,

ANOVA (BAR-HEN, 2002). Na tentativa de solucionar essas limitações, outros métodos de análise estão sendo propostos e avaliados.

Diversos autores recomendam o uso de modelos de regressão na análise de delineamentos sistemáticos, tendo como variável dependente alguma medida de crescimento ou produção, e como variável independente a densidade de plantas (STAPE, 1995). O uso de equações de regressão tem se mostrado eficiente em vários estudos (NELDER, 1962; RAO et al., 1990; STAPE, 1995; ODA-SOUZA et al., 2008; SANTOS, 2011; ALEIXO, 2012; MARQUES, 2012; SCHULZ et al., 2014). Os métodos de análises espaciais de dados, como, por exemplo, a geoestatística, também podem ser aplicados em experimentos com delineamento sistemático (ODA-SOUZA et al., 2008).

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Avaliar a influência do espaçamento nas variáveis de crescimento e produção de eucalipto em estado juvenil, por meio de modelos de regressão, análise geoestatística e teste de identidade de modelos.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Avaliar o efeito do espaçamento:
  - ✓ No crescimento em altura e diâmetro das árvores.
  - ✓ Na produção em volume total e individual com e sem casca.
- Avaliar o efeito na qualidade da madeira quanto a:
  - ✓ Forma do fuste
  - ✓ Percentagem de casca
- Verificar a existência de dependência espacial nas variáveis de crescimento e produção
- Verificar o modelo de regressão de melhor desempenho para descrever as variáveis de crescimento e produção estudadas.
- Verificar a necessidade de remoção das plantas adjacentes as falhas e mortes por meio de teste de identidade de modelos.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.2. O GÊNERO *Eucalyptus* NO BRASIL

Eucalipto é a designação vulgar das várias espécies vegetais da família Myrtaceae, dos gêneros: *Eucalyptus* com aproximadamente 746 espécies, *Corymbia* com aproximadamente 113 espécies e *Angophora* com aproximadamente 9 espécies.

Praticamente todas as espécies do gênero *Eucalyptus* são nativas da Austrália, salvo um pequeno número encontrado em territórios vizinhos, tais como Nova Guiné, Indonésia e Filipinas (PRYOR, 1976; SCOLFORO, 2008). As espécies do gênero *Eucalyptus* são plantas madeireiras, perenifólias, e podem se estabelecer em diversos ambientes, incluindo desde áreas pantanosas até muito secas, com ocorrência de espécies em solos de baixada, de alta fertilidade e até em solos arenosos muito pobres (ASSIS, 1986).

A data de introdução de espécies de eucalipto no Brasil é incerta, talvez tenha sido realizada por volta de 1868 segundo ANDRADE (1911). Contudo, em 1904 foi datada a introdução de espécies de eucalipto no Brasil para fins de florestamento pelo engenheiro agrônomo silvicultor Edmundo Navarro de Andrade (ANDRADE, 1961). Segundo Martini (2004), Navarro de Andrade foi contratado pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro do Estado de São Paulo em 1904, com o intuito de encontrar a espécie florestal de melhor potencial para o fornecimento de carvão para as locomotivas e de madeira para a produção de dormentes para as ferrovias. Em suas pesquisas, com diversas espécies florestais autóctone e alóctones, Navarro de Andrade concluiu que várias espécies do gênero *Eucalyptus* seriam a melhor opção tanto para o fornecimento de madeira, quanto para o florestamento das porções de floresta nativas que haviam sido desmatadas para a produção de carvão e dormentes (MARTINI, 2004).

Dentre as espécies introduzidas por Navarro de Andrade e que obtiveram resultados satisfatórios, em seus estudos preliminares, para os objetivos desejados pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro do Estado de São Paulo estão: *Eucalyptus citriodora* (hoje *Corymbia citriodora*), *Eucalyptus eugenioides*, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus obliqua*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus rostrata*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus virnilalis* (ANDRADE, 1909). Um pouco mais tarde, em 1919, Navarro de Andrade introduziu outra espécie, a qual ele acreditava ser *Eucalyptus alba*. Entretanto, segundo Pryor (1971), tal espécie se tratava de *Eucalyptus urophylla*, sob o argumento que

ocorrera um erro de identificação por parte da firma francesa que forneceu as sementes para Navarro de Andrade. Muitas destas espécies e outras como *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus deglupta*, *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus exserta*, *Eucalyptus paniculata* são cultivadas em grandes povoamentos florestais, destinados aos diversos setores da indústria brasileira de base florestal (PEREIRA et al., 2000). Além do grande número de espécies, o gênero *Eucalyptus* conta com uma diversidade de híbridos (SILVA e RECH, 2001). Ressalta-se que o híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, desenvolvido no Brasil, pode ser considerado a base da silvicultura clonal brasileira (RUY, 1998).

O *Eucalyptus* é o gênero mais plantado para formação de florestas de produção em todo território nacional, pois sua madeira é destinada ao abastecimento da maior parte da indústria de base florestal no Brasil. A produtividade média ponderada anual dos plantios de *Eucalyptus*, em função da área plantada, situa-se acima de 39 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.ano e atingiu 40,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.ano em 2012 (ABRAF, 2013). Segundo o ABRAF (2013), a área de plantios florestais (*Eucalyptus* e *Pinus*) no Brasil teve um aumento significativo desde 2006 até 2012 e hoje o país possui cerca de 6.632.080 hectares de plantios florestais. Destes o gênero *Eucalyptus* representa 76,6% da área total. Ainda, de acordo com o ABRAF (2013), quanto à distribuição da área total dos plantios florestais destacam-se a participação dos segmentos de papel e celulose e siderurgia a carvão vegetal.

### 1.3. ESPAÇAMENTO DE PLANTIO

A definição do espaçamento de plantio é de fundamental importância para a implantação de povoamentos florestais, pois este possui uma série de implicações silviculturais, tecnológicas e econômicas. Segundo Larson (1969) o controle sobre a densidade do povoamento constitui o método mais poderoso disponível para o silvicultor, pelo qual se pode regular tanto a produção, quanto a qualidade da madeira. O melhor espaçamento de plantio pode ser definido como aquele capaz de proporcionar a maior produtividade, com melhor qualidade, em menor tempo e a menor custo para os fins a que se destinam (TONINI, 2003; CHIES, 2005; LELES et al., 2011).

Portanto a escolha do espaçamento deve ser fundamentada em diversos fatores tanto ecológicos e fisiológicos, quanto silviculturais e econômicos, e não apenas baseado no uso final da produção florestal (BALLONI e SIMÕES, 1980). Dentre os fatores que devem ser levados em consideração estão: a capacidade do sítio que reflete na capacidade de

sobrevivência, crescimento e produção, a qualidade da madeira, proteção do solo, manejo de pragas e de mato competição dentre outros.

### **1.3.1. Espaçamento *versus* Crescimento da árvore**

As estimativas de crescimento são fundamentais para o planejamento dos plantios florestais, pois diversas decisões são diretamente dependentes destas estimativas, como por exemplo: a quantidade de madeira que pode ser colhida anualmente, capacidade de suporte do sítio entre outras (TONINI, 2003). O crescimento das árvores é influenciado pelas características das espécies (genótipo) e características do meio de cultivo como: fatores edafoclimáticos, competição e pela interação de todos esses fatores com o meio (interação genótipo ambiente), sendo a competição um fator de importância significativa e altamente associado ao espaçamento entre plantas (PRODAN et al., 1997).

Dentre os órgãos de importância relevante no crescimento das árvores pode-se citar a copa, a qual é responsável pela fotossíntese, que é o processo de produção de energia vital para a sobrevivência e desenvolvimento das plantas clorofiladas. Variáveis como diâmetro, comprimento e superfície da copa são intimamente relacionadas com o crescimento de uma árvore (TONINI e ARCO-VERDE, 2005; VIDAURRE et al., 2015). Diversos autores relatam que o espaço disponível para o crescimento das plantas influencia a forma e o tamanho da copa, e esta afeta a produtividade dos indivíduos (NUTTO et al., 2001; AVERY e BURKHART, 2002; TONINI e ARCO-VERDE, 2005). Uma vez, que a copa é influenciada pela variável espaçamento, e conseqüentemente influencia as variáveis de crescimento das plantas, torna-se, portanto, evidente a importância de investigações acerca dos diferentes espaçamentos em relação às variáveis de crescimento.

#### **1.3.1.1. Espaçamento x crescimento em diâmetro**

Uma característica muito importante que é influenciada pelo espaçamento é o crescimento em diâmetro, pois o espaço de crescimento disponível é altamente correlacionado com esta variável em cada indivíduo (COOK, 1963), no entanto é importante observar que espécies ou grupos de espécies afins apresentam respostas diferentes ao espaçamento, assim como respondem diferentemente a mesmas condições de sítio. Em povoamentos florestais, a área útil de uma árvore pode ser restringida pelas plantas adjacentes, ocasionando competição entre raízes e copas, o que influi no crescimento em

diâmetro (HILEY, 1959). Geralmente espaçamentos de plantio mais amplos induzem um rápido crescimento em diâmetro das plantas nos primeiros anos, proporcionando árvores de diâmetros maiores, quando comparados com árvores de plantios adensados, onde ocorre maior competição por espaço, reduzindo o crescimento em diâmetro (CLUTTER, 1983; CARDOSO, 1989; CHIES, 2005; PEZZUTTI, 2011; BENIN et al., 2014).

Simões et al. (1980) estudando o efeito do espaçamento em quatro espécies de eucalipto aos cinco, sete, nove e onze anos de idade, observaram que o crescimento em diâmetro foi superior no maior espaçamento testado (3 x 2 m). Reiner et al. (2011) avaliaram o efeito de diferentes espaçamentos no crescimento de árvores de *Eucalyptus dunnii* no primeiro, segundo e terceiro ano após a implantação do experimento, observando diferença significativa do crescimento em diâmetro apenas na idade de 3 anos, sendo este proporcional ao espaço de crescimento disponível, constatando maior diâmetro a altura de 1,30 m (DAP) no maior espaçamento testado (3 x 3 m) e menor DAP no menor espaçamento testado (1,5 x 1,5 m). Oliveira Neto et al. (2010) estudaram a influência de espaçamentos (3 x 2 m, 3 x 3 m, 3 x 4 m e 3 x 5 m) e da adubação na distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn, observaram que, independentemente do nível de adubação testado, houve maior número de indivíduos pertencentes às maiores classes de diâmetro nos maiores espaçamentos. Resultados semelhantes foram observados por Santos (2011) para um híbrido de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, por Alcorn et al. (2007) para *Eucalyptus pilulares* e *Eucalyptus cloeziana*, por Pinkard e Neilsen (2003) para *Eucalyptus nitens* e por Xue et al. (2011) para *Eucalyptus urophylla*. Estes autores verificaram o aumento do diâmetro com o aumento da área vital disponível.

Em espécies florestais nativas também é observada esta tendência, como apresentado nos estudos de Nascimento et al. (2012) que avaliaram o crescimento inicial (18 meses) de seis espécies arbóreas (*Anadenanthera macrocarpa* Benth. Brenan, *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Schizolobium parahyba* Blake, *Inga marginata*, *Cordia* sp. e *Chorisia speciosa* St. Hill) em diferentes espaçamentos (1,0 x 1,0 m; 1,5 x 1,5 m; 2,0 x 2,0 m e 3,0 x 2,0 m), e verificaram, que as espécies apresentaram valores médios de diâmetro ao nível do solo (DAS), significativamente superiores nos dois espaçamentos mais amplos. A influência do espaçamento no diâmetro das plantas também é observada quando a condução do povoamento é feita por meio de talhadia. Higa e Sturion (2000) avaliaram o efeito do espaçamento na brotação de *Eucalyptus viminalis* e constataram que o diâmetro médio das cepas foi maior para os espaçamentos mais amplos.

Entretanto, Macedo et al. (2005) ao estudarem o crescimento inicial (24 e 36 meses) de *Tectona grandis* L.f. em diferentes espaçamentos (3 x 2 m; 6 x 2 m; 6 x 3 m; 6 x 4 m e 12 x 2,5 m), não observaram diferenças estatísticas no crescimento em diâmetro. O mesmo ocorreu com Inoue et al. (2011) ao avaliarem o efeito de espaçamentos (1 x 1 m, 2 x 1 m, 2 x 2 m, 3 x 2,5 m, 3 x 3 m, 3 x 3,5 m, 4 x 3 m, 4 x 3,5 m, 4 x 4 m) no crescimento em DAP de *Pinus taeda* aos quatro anos de idade, pois não encontraram correlação significativa entre o espaço vital e o DAP. Vale lembrar que o crescimento em diâmetro também é influenciado por fatores como qualidade do sítio, idade, competição entre outros (PRODAN, 1997) e é possível os autores não puderam verificar o efeito do espaçamento nas condições experimentais (solo, densidade de plantas, clima, idade e etc) as quais as plantas foram submetidas.

De uma forma geral os estudos sobre o efeito do espaçamento no crescimento em diâmetro de espécies de eucalipto apontam para a seguinte tendência: quanto maior a área útil por árvore, maior o crescimento em diâmetro (COELHO et al., 1970; BERGER, 2002; PINKARD e NEILSEN, 2003; ALCORN et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2009; SANTOS, 2011; VIDAURRE et al., 2015). Contudo, é importante relatar que se o espaçamento for tão grande a ponto que os recursos disponíveis excedam a capacidade fisiológica de assimilação da planta, não haverá aumento de diâmetro, tornando a área subutilizada. Segundo Etigale et al. (2014) tanto o espaçamento excessivamente reduzido quanto o excessivamente amplo levam à subutilização dos recursos do local, sendo que ambas as condições afetam o negativamente o rendimento do plantio.

#### 1.3.1.2. Espaçamento x crescimento em área basal

A área basal por definição é o somatório das áreas seccionais dos indivíduos que apresentam dimensões dentro da classe de inclusão adotada, e que sejam resultantes das medidas de diâmetro (SOARES et al., 2007). Segundo Spurr (1952), a área basal é a variável mais simples e usada para o estudo da dominância (grau de utilização de um sítio). Esta medida expressa em  $m^2 ha^{-1}$  as medições dos diâmetros e número de árvores, fornecendo o grau de ocupação de determinada área por madeira (SOARES et al. 2007). Vale ressaltar que quando o crescimento anual da área basal é constante a taxa de crescimento diamétrico está diminuindo (ENCINAS et al., 2005).

Crechi (1996) relata que a área basal é um índice de densidade amplamente empregado na tomada de decisões do manejo de povoamentos florestais, essencialmente nas

decisões de oportunidade e intensidade dos desbastes. A área basal também é muito importante em modelos de crescimento e produção, uma vez que o volume por unidade de área é dependente da idade, índice de sítio e de alguma medida de densidade (número de indivíduos), sendo esta, muitas vezes, expressa pela área basal (SCOLFORO e FIGUEIREDO, 1998).

De uma forma geral os mesmos fatores (espécie, idade, qualidade do sítio, entre outros) que afetam o diâmetro afetam a área basal, sendo ambos altamente influenciados pelo espaço vital disponível, (SCHNEIDER, 1993). Couto et al. (2009), em sua pesquisa sobre o efeito do espaçamento na produção em florestas de eucalipto, verificaram que, como a área basal é uma variável influenciada diretamente pelo número de árvores por hectare e os menores espaçamentos (3 x 0,5 m, 3 x 1 m, 3 x 1,5 m) resultaram em maiores médias de área basal em relação as demais densidades de plantio (3,0 x 3,0 m e 3,0 x 2,0 m). Semelhantemente, Oliveira et al. (2009) observou a mesma tendência. Os autores avaliaram o desempenho silvicultural e produtivo de um híbrido natural de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh com *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake e constaram que a área basal por hectare foi superior nos espaçamentos mais adensados em função do maior número de indivíduos. Ressalta-se que espaçamentos maiores promovem um maior incremento em diâmetro e por consequência maior área basal por planta. Contudo Bernardo et al. (1998) avaliando efeito do espaçamento no crescimento e na distribuição da biomassa em plantações de *E. camaldulensis*, *E. pellita* e *E. urophylla* verificaram que o aumento do diâmetro das árvores devido ao espaçamento aumentado não foi suficiente para compensar o efeito de menores níveis de estoque por hectare na área basal. Os autores relatam que as maiores áreas basais por hectare foram vistas na maior densidade de árvores plantadas.

Diante o exposto, nota-se que o crescimento em área basal é intimamente ligado com a densidade do povoamento, onde, de uma forma geral, em espaçamentos menores tende a ser maior (PACHECO et al., 2015). No entanto, a área basal é dependente, também, de outros fatores como a idade, o sítio e espécie (CRECHI, 1996; MAINARDI et al., 1996).

#### 1.3.1.3. Espaçamento x crescimento em altura

O crescimento em altura é dado pela atividade do meristema apical, por meio da divisão celular. Esta variável, altura da árvore, origina a modificação mais evidente do crescimento, especialmente na idade juvenil em que se observa com maior facilidade a rapidez da modificação em altura em períodos curtos de tempo (ENCINAS et al., 2005). O

crescimento em altura total é reflexo, também, da interação genótipo x ambiente, a qual foi definida por SHELBORNE (1972) como sendo a variação entre genótipos em resposta a diferentes condições ambientais, tais como variações edáficas, topográficas, climáticas, dentre outras. Um dos indicativos deste fato é a variável altura dominante média do povoamento, a qual é usada como uma medida quantitativa da capacidade produtiva do local para uma espécie ou híbrido em uma idade específica (idade-índice), consistindo no Índice de local (S) (CAMPOS e LEITE, 2013). Contudo, isto não é uma regra, como demonstra os estudos realizados por Mori et al (1986) com *Eucalyptus saligna* Smith e Mori et al (1988) com *Eucalyptus urophylla*. Estes autores avaliaram os efeitos da interação genótipo x ambiente e observaram que dentre as características estudadas, a altura total apresentou um maior controle genético, comparado a outras variáveis (DAP e volume) demonstrando que a espécie manteve suas características independente do ambiente. Deve-se ressaltar que os ambientes avaliados pelos autores supra citados possuem características climáticas muito semelhantes.

Espaçamentos muito adensados podem induzir a um rápido incremento em altura de espécies florestais. Tal fato pode ser atribuído a intensificação de busca pela luminosidade, pois para algumas espécies há necessidade que a árvore amplie o máximo a sua superfície foliar a fim de suprir sua necessidade de fotoassimilados (MORAES NETO et al., 2001; SCALON et al., 2003; DUTRA et al., 2012). Vale ressaltar que em alguns experimentos de espaçamentos é possível notar que árvores com maior área vital disponível podem apresentar maior percentagem de copa viva (AVERY e BURKHART, 2002), contudo com menores alturas quando comparadas àquelas submetidas a menores espaçamentos em mesmas idades e condições de sítio. De acordo com Padoin e Finger (2010) isso ocorre, pois mesmo que a percentagem de copa se reduza com o aumento da altura a competição pela luz se dá horizontal e não verticalmente no povoamento, ou seja, o diâmetro de copa tem maior influência na competição pela luz do que a altura de copa.

Entretanto, a medida em que os povoamentos ganham mais idade, o aumento da competição pode reduzir a taxa de crescimento em altura total nos espaçamentos menores (BOTELHO, 1998) e antecipar a estagnação do crescimento do povoamento (CARON et al., 2015). Pauleski et al. (2010) avaliou a influência do espaçamento sobre o crescimento de um povoamento de *Pinus taeda* L com 23 anos e verificou que as árvores do extrato médio que estavam nos espaçamentos mais reduzidos apresentaram um crescimento em altura menor do que, das árvores dos espaçamentos médios a amplos. Segundo a autora, isto pode ter ocorrido devido à competição entre plantas ter se estabelecido antes da alta taxa de

mortalidade natural nos menores espaçamentos, o que pode ter levado a uma estagnação prematura do incremento em altura.

De uma forma geral para os espaçamentos usuais (3 x 2 m, 3 x 1,5 m, 3 x 3 m), em plantios de espécies florestais, a variável altura total é pouco ou nada afetada. Meskimen e Franklin (1978) avaliaram o efeito de espaçamentos (1,2 x 2,4 m; 2,4 x 2,4 m; 3,6 x 2,4 m e 4,8 x 2,4 m) no crescimento e produção de *Eucalyptus grandis* aos 7,4 anos de idade. Os autores não observaram diferenças estatísticas significativas na altura total média das árvores da espécie estudada. Severino et al. (2008) constaram que o crescimento em altura total de plantas de *Ricinus communis* não foi influenciado pelos diferentes espaçamentos (2 x 1 m; 2,5 x 1 m; 3 x 1 m, e 3,5 x 1 m) avaliados. Pacheco et al. (2015) estudaram o efeito de nove espaçamentos (1,0 x 1,0 m; 2,0 x 1,0 m; 2,0 x 2,0 m; 3,0 x 2,5 m; 3,0 x 3,0 m; 3,5 x 3,0 m; 4,0 x 3,0 m; 4,0 x 3,5 m e 4,0 x 4,0 m) no crescimento de variáveis dendrométricas em povoamentos de *Pinus taeda* com 10 anos de idade. Segundo os autores, não foi encontrada diferença estatística entre os tratamentos para a variável altura média.

Contudo, essa tendência não é uma regra, há diversos estudos que relatam a influência do espaçamento na velocidade de crescimento em altura total (JORGENSEN, 1967; BALLONI e SIMÕES, 1980; SIMÕES, et al., 1980; REZENDE et al., 1981; BERGER, 2000; PAULINO, 2012; LELES et al., 2014; VENTURIN et al., 2014). Cabe ressaltar que o efeito do espaçamento na altura média do povoamento varia nas diferentes espécies e idades, sendo que espaçamentos mais amplos podem aumentar o crescimento em altura ou pode ocorrer o inverso (EVERT, 1971).

Outro fato que deve ser considerado é que assim como as demais variáveis de crescimento são afetadas por diversos fatores (bióticos e abióticos) e suas interações, o mesmo ocorre com a variável altura. Em muitos casos a variável altura total é notoriamente influenciada pela interação espaçamento x espécie x tempo (idade). Leite et al. (2006) ao analisarem o efeito de diferentes espaçamentos com área útil variando de 1,5 a 7,5 m<sup>2</sup> em variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L., verificaram que até os oito anos não houve diferença estatística entre as estimativas de altura total, mas a partir do décimo ano foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos. Entretanto, uma tendência contrária a esta foi verificado por Leles et al. (2014) ao analisarem o crescimento e biomassa de *Melia azedarach* L. em diferentes espaçamentos (1,0 x 1,0 m, 1,5 x 1,5 m, 2,0 x 2,0 m, e 3,0 x 2,0 m) e idades (um a cinco anos), pois constataram que no espaçamento mais amplo (3 x 2 m), as plantas apresentaram maior taxa de crescimento ao longo dos anos. De acordo com os

autores, à medida que a área útil de crescimento foi reduzida, o crescimento em altura das árvores foi menor.

Diversos estudos demonstram que a interação espaçamento x espécie x tempo é observada também em povoamentos de eucalipto. Coelho et al. (1970) avaliaram o comportamento de quatro espécies de eucalipto (*Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba* e *Eucalyptus propínqua*) aos dois, três, quatro e cinco anos de idade em função de diferentes espaçamentos (3 x 1,5 m e 3 x 2 m) e constataram influência dos mesmos nas alturas das árvores de *E. grandis*, as quais atingiram maior porte sob o espaçamento 3 x 2 m aos três e quatro anos de idade. Contudo, os autores não observaram efeito dos espaçamentos, em nenhuma das idades, no crescimento em altura das árvores das demais espécies avaliadas. Kirongo et al. (2012) avaliaram o espaçamento e genótipo no crescimento em altura e diâmetro de árvores de eucalipto incluindo dois híbridos clonais (GC 10 e GC 167), um “landrace” (variedade local domesticada que desenvolveu adaptação ao ambiente natural e cultural em que vive) e *E. grandis* em duas regiões no oeste do Kenya utilizando delineamento sistemático tipo “leque”. Os autores relataram que apesar do estudo ter sido avaliado aos 6, 12, 18 e 26 meses a altura média das árvores foi significativamente influenciada pelos espaçamentos apenas aos 36 meses. Outro fator importante no estudo de Kirong et al. (2012) é que nesta mesma idade, além do espaçamento a variável altura, também sofreu o efeito significativos dos genótipos. Couto et al. (2009) estudaram a influência do espaçamento (sendo eles: 3 x 0,5 m, 3 x 1 m, 3 x 1,5 m, 3 x 2 m e 3 x 3 m) e da idade (47 e 61 meses) sobre a produção de biomassa em florestas de eucalipto. Os autores verificaram que tanto a idade quanto o espaçamento influenciaram o crescimento em altura das árvores, sendo que os maiores valores de altura total foram encontrados nos maiores espaçamentos (3,0 x 3,0 m e 3,0 x 2,0 m).

Neste sentido, vale lembrar a importância de se avaliar a velocidade do crescimento em altura e a competição, fator intimamente ligado ao espaçamento de plantio. Segundo Schneider et al. (2015) numa população, a competição entre os indivíduos aumenta com a idade, culminando em dominação e mortalidade de plantas, o que é intitulado de autodesbaste. Ainda segundo os autores a competição intraespecífica é um importante fator no manejo por influir diretamente o tamanho médio dos indivíduos, por isto é que muitos estudos têm sido realizados para descrever a relação entre o tamanho das plantas com a densidade populacional e a sua evolução no tempo. Portanto, um dos desafios na silvicultura, quando se fala em escolha do espaçamento, é definir limites ideais para gerenciar a

competição afim de manter a velocidade de crescimento elevada e obter o máximo de incremento em altura possível para a espécie e sítio escolhidos.

### **1.3.2. Espaçamento *versus* qualidade da madeira.**

A madeira produzida nos empreendimentos florestais pode ser destinada para os mais variados usos, destacando-se a produção de biomassa para energia (lenha, cavaco ou carvão), estacas, mourões, esticadores, postes, vigas, ripas, tábuas, laminas, toretes, celulose dentre outros. Independentemente do uso a que se destina, há uma grande preocupação com a produtividade, qualidade e a homogeneidade da madeira, certo que as propriedades do produto final são inerentes à matéria-prima que lhe deu origem (PEREIRA, 2012).

A densidade de plantio definida por meio do espaçamento inicial, podendo ser alterada ao longo do desenvolvimento do povoamento mediante desrama e desbaste podem produzir fortes efeitos no crescimento e na formação da madeira (MALAN e HOON, 1992). Dentre os principais aspectos referentes à qualidade da madeira que sofrem influência do espaçamento destaca-se: a forma da árvore (conicidade), número e tamanho dos nós, densidade básica e porcentagem de casca (SCOLFORO, 1997).

#### **1.3.2.1. Espaçamento x Forma da árvore**

A forma do fuste da árvore é um aspecto muito importante e deve ser levado em consideração na definição do manejo do povoamento florestal, principalmente quando o destino final da madeira é desdobro em serraria ou para laminação. Segundo Nogueira et al. (2008) o rendimento de conversão de árvores de eucalipto e de pinus em madeira serrada é dependente, dentre outros fatores, da forma do fuste.

O ideal seria que as árvores apresentassem fuste cilíndrico, pois isso implicaria na redução do erro nas estimativas de volume, bem como favoreceriam os processos de produção de madeira para determinados usos favorecendo o maior rendimento em especial para os usos que envolvem a utilização da madeira em sua estrutura natural (serraria, laminação, etc.). Entretanto, numa árvores o num único fuste podemos ter diferentes formas que se assemelham à de quatro sólidos de revolução: cone, parabolóide, neilólide e cilindro (SOARES et al., 2007).

Há diversos fatores que influenciam a forma da árvore, entre eles destacam-se a espécie, o sítio, os tratos silviculturais (desrama, poda, etc.), a idade e o espaçamento, sendo

este último considerado o principal fator (GROSSER, 1980; SOARES et al., 2007; GONÇALVES et al., 2010; FERREIRA et al., 2014).

A produção real de madeira é diretamente afetada pela conicidade devido, principalmente, a influência que esta exerce na altura comercial, a qual é definida de acordo com o diâmetro comercial para cada uso. De uma forma geral, indivíduos cultivados em maiores espaçamentos ou submetidos a desbastes intensos, os quais proporcionam maior espaço entre plantas, apresentam uma tendência maior à conicidade do fuste, que afeta a qualidade da madeira (VAN LAAR, 1978; MONTAGNA et al., 1973; LARSON et al., 2001).

Esta tendência foi observada por Pinkard e Neilsen (2003), que avaliaram a influência de diferentes espaçamentos nas características da copa e do povoamento de *Eucalyptus nitens* para uma aplicação de desbaste na região norte da Tasmânia. Adicionalmente os autores relatam que muitas espécies desenvolvem fustes mais cilíndricos após o fechamento do dossel e em resposta à maior densidade do povoamento, como ocorreu em seu trabalho. No estudo realizado por Rance et al. (2012), verificou-se que plantios de *Eucalyptus grandis*, submetidos a diferentes espaçamentos e sítios, na Austrália, apresentaram árvores com fustes menos cônicos nos espaçamentos menores quando comparados às árvores dos arranjos mais amplos.

De acordo com Larson (1969) povoamentos submetidos a maiores espaçamentos (menores densidades de plantio) geram indivíduos adultos com troncos mais cônicos, o que pode ser atribuído a uma proporção maior entre tamanho de copa (parte do tronco com galhos vivos) em relação a fuste (parte do tronco sem copa), gerando um aumento do crescimento do diâmetro da base da copa. Entretanto, segundo o autor, em plantios mais adensados, ocorre uma redução gradativa da proporção entre tamanho de copa (parte do tronco com galhos vivos) em relação a fuste (parte do tronco sem copa), devido a morte ou desrama dos galhos inferiores, ocasionadas pelo fechamento de dossel (tocar de copas) quando intensifica a competição. Dessa forma, a base da copa, onde se concentra o crescimento, vai sendo alterada e o crescimento em diâmetro ocorre de forma mais distribuída ao longo do tronco, sendo gerado uma madeira de maior densidade nos espaçamentos menores. Adicionalmente, de acordo com Hawley (1946) algumas características comumente inerentes as árvores cultivadas em espaçamentos adensados são: forma do fuste cilíndrica, copa estreita, porém maior suscetibilidade a lesões causadas por tempestades, incêndios, insetos e fungos.

### 1.3.2.2. Espaçamento x Nodosidade

Por definição, o nó é a base de um galho que está inserido no tronco de uma árvore ou em outro galho maior, crescendo do centro para a periferia. O tamanho e a quantidade de nós na madeira são indiretamente influenciados pelos fatores que afetam a formação do tronco, pois dependem de sua posição e das características da tora. Esta, por sua vez, é formada sobre efeitos de fatores genéticos, ambientais, do espaçamento e do manejo a que foi submetida (SCOLFORO, 1997).

Speltz (2000) relata que em espaçamentos amplos a insolação recebida pelas plantas é maior, e com isto há uma intensificação no crescimento de galhos e um atraso da desrama natural da parte inferior da copa. Em consequência disto, ocorre um aumento do número e do diâmetro dos galhos e redução da qualidade da madeira. Já os espaçamentos menores o fechamento do dossel ocorre mais rapidamente proporcionando internódios maiores (distância vertical entre galhos) devido a maior velocidade de crescimento das árvores em altura, ocasionando o sombreamento dos galhos inferiores da copa e conseqüentemente a morte destes quando ainda são de menor diâmetro facilitando a desrama natural, característica desejada para a produção de madeira livre de nós (CHIES, 2005). Portanto, espécies florestais que apresentem a característica de produzir galhos laterais inclinados e grossos devem ser submetidas à espaçamentos menores, para evitar grande número e tamanho de nós (SCOLFORO, 1997). Entretanto, espaçamentos muito adensados, apesar de reduzir a formação de nós por evitar o crescimento de galhos, geram árvores com diâmetros menores.

Diante disto, quando a qualidade desejável da madeira inclui a quantidade e tamanho de nós, recomenda-se uma pesquisa minuciosa na literatura acerca do espaçamento de plantio adequado para a espécie escolhida, bem como do manejo do povoamento, principalmente, no que se diz respeito a condução de desrama e desbaste, pois afetam diretamente o diâmetro das árvores, a forma do fuste e o número e tamanho de nós.

### 1.3.2.3. Espaçamento x casca

De uma forma geral, o termo casca compreende todos os tecidos exteriores ao câmbio vascular que envolve as raízes, os galhos e o tronco da árvore (ESAU, 1974). Ela possui tecidos específicos para conduzir a seiva bruta até as folhas, e destas conduzir a seiva elaborada para armazenar substâncias energéticas e nutrientes minerais, e para formação de

alburno e cerne que vão dar suporte, conferir resistência e proporcionar crescimento a árvore (FOEKEL, 2015). De acordo com Tsoumis (1991), a casca ocupa entre 10 a 15% do volume total da árvore, dependendo da espécie, idade e dimensões da árvore, entre outros fatores.

Do ponto de vista econômico a casca apresenta tanto vantagens quanto desvantagens. Ela constitui matéria prima para vários usos, tais como: como combustível (VITAL et al., 1989), fonte comercial de produtos químicos e incorporação no solo como matéria orgânica fazendo importante papel na ciclagem de nutrientes em solos de ecossistemas florestais (ZOETTL, 1980); VALERI et al., 1989) além da produção de taninos, que pode ser um uso em potencial para este material (MIRANDA, 2000). Por outro lado, apresenta limitações, por exemplo, nos processos de produção de pasta celulósica a partir de madeira com casca (AUCHTER, 1973), além de compor os resíduos industriais de base florestal acarretando, problemas como poluição de ar e água (HOOP et al., 1997). Outra desvantagem é que a porcentagem de casca nas toras das árvores são variáveis influenciam o rendimento em madeira serrada quando do desdobro (LIMA, 2005).

Há diversos fatores que podem afetar a formação da casca, e sua espessura pode variar consideravelmente conforme as diferentes espécies, ou até dentro de um mesmo indivíduo, podendo variar também de acordo com a idade, densidade do povoamento e dentre outros fatores (STAPE et al., 1988; SCOLFORO e THIRSCH, 2004). Foekel (2015), afirma existir uma correlação entre o crescimento em diâmetro da árvore e a porcentagem de casca. Segundo o autor, árvores maiores (em diâmetro e altura) de uma mesma espécie e a uma mesma idade, tendem a ter menor percentual de casca. Corroborando com isto, de acordo com Scolforo et al. (2004), espera-se, geralmente, que a porcentagem de casca seja maior nas árvores menores que nas maiores. Loetsch et al. (1973) ressaltam que a relação entre espessura de casca e o DAP está sujeito a influências específicas, como clima, idade e sítio.

Campos e Ribeiro (1983), em seu estudo com 486 árvores de *Eucalyptus spp.*, encontraram uma correlação positiva entre percentual de casca e diâmetro. Uma vez que, o diâmetro é altamente afetado pelo espaçamento (SIMÕES et al., 1980; HIGA e STURION, 2000; OLIVEIRANETO et al., 2010; REINER et al., 2011; NASCIMENTO et al., 2012) e que, de uma forma geral, a correlação entre diâmetro e espaçamento é inversamente proporcional, pode-se inferir que espaçamentos mais adensados promovam uma menor porcentagem de casca. Contudo, alguns estudos demonstram que pode haver uma maior produção de casca em espaçamentos adensados, como é o caso dos trabalhos de Goulart et al. (2003) e Coelho et al. (1970), os quais ao avaliaram o desenvolvimento de espécies de

eucalipto e constataram que os espaçamentos menores propiciaram maior produção de casca. Corroborando com isto, no estudo de Sereghetti (2012) o qual avaliou a biomassa inicial do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes arranjos espaciais (área vital entre 2,0 a 8,0 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>) os resultados demonstraram que a porcentagem de casca aos doze meses variou consideravelmente entre os tratamentos.

De uma forma geral, o volume de casca é uma variável de importância significativa na produção de madeira, seja pelas vantagens ou desvantagens que apresenta como relatado anteriormente. Tais vantagens ou desvantagens devem ser levadas em consideração e incluídas no planejamento, condução e manejo do povoamento. Isto inclui as tomadas de decisões em relação densidade de plantio e desbaste, uma vez que estas afetam as variáveis de crescimento, tais como DAP, o qual está intimamente ligado porcentagem de casca.

#### 1.3.2.4. Espaçamento x Densidade básica

A densidade básica da madeira destaca-se pelo fato de estar correlacionada com as características físico-químicas e anatômicas da madeira (GARCIA et al, 1998). Devido a isso, a densidade básica é referenciada, por diversos autores, como índice de qualidade da madeira (SANTOS, 2010). De forma geral, madeiras mais densas são preferidas para a produção de energia (lenha e carvão) e para peças estruturais (VITAL et al., 1986; GOULART et al., 2003; CASTRO, 2011) e madeiras com densidade intermediárias para a produção de celulose de fibra curta (RIBEIRO e ZANI FILHO, 1993).

Migliorini et al. (1980) ao avaliarem os efeitos de características silviculturais da madeira de eucalipto e seu reflexo na qualidade química do carvão vegetal, constataram que a madeira produzida sob espaçamentos menores (2 x 2 e 3 x 2 m) mostrou um aumento na densidade básica e na percentagem de lignina quando comparada a madeira produzida nos demais espaçamentos (3,0 x 2,5 m, 3,0 x 3,0 m, 3,0 x 4,0 m). Resultados semelhantes foram encontrados por Goulart et al. (2003). Garcia et al. (1991) ao estudarem o comportamento de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em diferentes espaçamentos verificaram que, com o aumento do espaçamento, ocorre uma redução da densidade básica da madeira. Isso também foi observado por Santos (2011) ao avaliar o efeito de diferentes densidades de plantio (1,5 m<sup>2</sup> até 15,75 m<sup>2</sup>) na biomassa do fuste de um clone híbrido *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Ressalta-se que a autora constatou que comportamento da densidade básica da madeira nos diferentes espaçamentos sofreu variações somente até 4,05 m<sup>2</sup> de área

vital por planta e, a partir do espaçamento com 4,95 m<sup>2</sup> de área vital, não houve mais resposta significativa da densidade com o aumento do espaçamento.

Entretanto, Berger (2000) avaliou o efeito do espaçamento na qualidade da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith e observou que o maior espaço de crescimento (12 m<sup>2</sup>) esteve associado a um aumento da densidade básica da madeira aos 10 anos. Ferreira et al. (1997) observaram uma tendência similar, em que a densidade básica das árvores de *Eucalyptus dunnii* foi maior nos espaçamentos mais amplos (3 x 3 m e 3 x 4 m) em comparação aos demais espaçamentos (3 x 1 m, 3 x 1,5 m e 3 x 2 m). Já, Sturion et al. (1988) ao avaliarem a qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* em função do espaçamento (1 x 1 m, 2 x 1 m, 2 x 1,5 m, 2,5 x 1,6 m, 2 x 2,5 m e 3 x 2 m) e da idade (quatro e sete anos) não observaram o efeito do espaçamento. De semelhante modo Brasil e Ferreira (1971) também não conseguiram detectar estatisticamente a influência do espaçamento (3 x 1,5 m e 3 x 2 m) na densidade básica da madeira de três espécies florestais (*Eucalyptus alba* Reinw, *Eucalyptus saligna* Smith e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden) aos cinco anos de idade (ROCHA, 2011). Resultados divergentes, como os citados anteriormente podem ser oriundos de diversos fatores, como por exemplo a espécie, o sítio, o manejo e a idade do povoamento.

### **1.3.3. Espaçamento versus Produção**

Assmann (1970) define produção como o processo de crescimento da floresta em relação ao tempo, sítio e as medidas econômicas e técnicas adotadas no manejo da floresta. A produção em volume e área basal de um povoamento florestal é afetada por vários fatores, como qualidade do sítio, clima, espécie, fertilização e pelo espaçamento de plantio.

O conhecimento da dinâmica do crescimento e da produção de povoamentos florestais é fundamental para o setor. Segundo Pauleski (2010) o estudo de crescimento e produção, por avaliar a relação entre uma medida de produção florestal e variáveis como idade e espaçamento de plantio, entre outros, é uma das ferramentas usadas para a compreensão desta dinâmica. Ainda segundo a autora, não basta apenas se produzir mais, é necessário que a produção esteja associada à qualidade desejada do material produzido.

#### **1.3.3.1. Espaçamento x Volume**

O espaçamento influi de forma direta na produção em volume. Isto ocorre, pois a variável volume está intimamente relacionada às características de crescimento das árvores

e do número de indivíduos por hectare, os quais afetam a produção. Segundo Leite et al. (1997), em florestas de eucalipto, é esperado que em espaçamentos mais amplos, em razão do aproveitamento inicial da maior quantidade de recursos (água, nutrientes e luminosidade) por unidade de área, em um menor intervalo de tempo, a quantidade inicial de biomassa produzida por área seja maior. Contudo, os autores fazem a seguinte ressalva: ao longo do ciclo de cultivos, as diferenças entre populações com diferentes densidades devem ser minimizadas. Isto ocorre, pois a capacidade produtiva de um local é dependente da qualidade do sítio e da espécie, ou seja, independe da densidade de plantio, o que ocorre é que o sítio atingirá sua capacidade produtiva máxima em intervalos de tempo distintos em função dos diferentes espaçamentos, desde que, os espaçamentos utilizados resguardem correlação com os limites fisiológicos das plantas.

Leite et al. (2006) avaliaram o efeito do espaçamento sobre as variáveis de produção de povoamentos de *Pinus taeda* L. e verificaram que aos 14 anos os maiores espaçamentos estudados (5, 6 e 7,5 m<sup>2</sup>) proporcionaram maiores estimativas de volume por árvore e as menores estimativas de volume por hectare em relação aos demais espaçamentos (1,5 a 4,5 m<sup>2</sup>). Para o crescimento inicial (aos 24 e 36 meses) de *Tectona grandis* L.f. em diferentes espaçamentos (3 x 2 m ; 6 x 2 m; 6 x 3 m; 6 x 4 m e 12 x 2,5 m), Macedo et al. (2005) constataram que o menor espaçamento de plantio apresentou os maiores valores de volume por hectare (3,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) e incremento de volume por hectare (1,6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Segundo os autores, dentro os fatores que possam ter influenciado estes resultados está o melhor aproveitamento da adubação padrão utilizada e a menor incidência da matocompetição, decorrente do maior adensamento de plantio. Em sua pesquisa, sobre produção de madeira de *Acacia mearnsii* De Wild, Klein et al. (1992) verificaram que a menor área vital disponível por planta (1 m<sup>2</sup>) propiciou a maior produção volumétrica por hectare. Contudo, os autores relatam que para os espaçamentos 4 e 6 m<sup>2</sup> não houve diferença estatística, mesmo que na implantação do povoamento houvesse uma diferença de 834 árvores por hectare, ocorreu um equilíbrio do número de árvore por meio na mortalidade natural nos dois espaçamentos.

Com o objetivo de analisar a dinâmica de crescimento de *Eucalyptus dunnii* dos 12 aos 36 meses Reiner et al. (2011) constataram maior produção de volume individual nos espaçamentos amplos (3 x 3 m) e maior o volume por área nos espaçamentos reduzidos (1,5 x 1,5 m). Berger et al. (2002) estudaram o efeito do espaçamento no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith e verificaram que a produção em volume comercial sem casca por hectare foi menor para o maior espaçamento avaliado (12 m<sup>2</sup>), entretanto

praticamente não diferiu entre os dois menores (6 e 9 m<sup>2</sup>). Akhtar et al. (2008) avaliaram o efeito do espaçamento no crescimento de *Eucalyptus camaldulensis* em sítios salinos na região de Punjab no Paquistão. O estudo mostrou que o volume foi afetado tanto pelos sítios quanto pelos espaçamentos. Os autores verificaram que os maiores volumes por planta após 5 anos foi obtido com os espaçamentos mais largos (3,0 m x 3,0 m e 3,5 m x 3,5 m), porém em um dos locais avaliados, o volume máximo de madeira por hectare ocorreu no espaçamento de 3,0 m x 3,0 m. Estes resultados demonstram o efeito da interação espaçamento x espécie x ambiente.

De uma forma geral, diversos estudos com espécies de eucalipto demonstram que espaçamentos geram maior volume por hectare em função do número de indivíduos, porém as árvores apresentam menor volume por planta (SCHONAU, 1974; MESKIMEN e FRANKLIN, 1978; SCHONAU, 1984; SCHONAU e COETZEE, 1989, LEITE et al., 1997; NIELSEN e GERRAND, 1999; FORREST et al., 2010). Vale ressaltar que, quando o plantio é muito adensado, ocorre uma redução no espaço de crescimento de cada indivíduo, afetando o desenvolvimento do sistema radicular e da copa, comprometendo quantitativa e qualitativamente a produção (SCOLFORO, 1997). Por outro lado, mesmo que espaçamentos mais amplos proporcionem árvores com maior volume individual, a área não deve ser subutilizada, pois assim os recursos disponíveis não serão completamente utilizados pelas plantas o que resultará numa menor produção por área.

Neste sentido o espaçamento inicial é fundamental para o manejo do povoamento (NEILSEN E GERRAND, 1999). Neilsen e Gerrand (1999) relatam que em povoamentos de eucalipto a densidade inicial escolhida deve fornecer indivíduos suficientes para ocupar completamente um sítio e permitir, por exemplo, a produção de alto volume para o desbaste de madeira para produção de celulose. Adicionalmente Gerrand et al. (1997) ressalta a que é muito importante que o número de indivíduos plantados permitam a seleção de um número necessário de árvores para uma colheita final adequada. Quanto mais adensado o espaçamento de plantio, mais cedo ocorrerá o fechamento do dossel e a ocupação completa do sítio (FORREST et al. 2010), baixos níveis de luminosidade em povoamentos adensados favorecem a redução de nós, tamanho dos galhos, melhora a forma da árvore e diminui a matocompetição (HAWLEY, 1946; ACHIES, 2005; NEILSEN e GERRAND, 1999; GERRAND e NEILSEN, 2000; PINKARD e NEILSEN, 2003; FORREST et al, 2010). Entretanto, altas densidades de plantio podem levar a uma maior competição e em consequência a mortalidade de plantas e a realização de desbaste influencia as distribuições de tamanho futuro das árvores do povoamento e os produtos que este fornecerá, então os

regimes de manejo também dependerão das demandas do mercado (FORREST et al., 2010). Deste modo, para que se encontre o espaçamento ideal de crescimento, ou seja, aquele que proporciona a maior produção em volume de madeira com forma e qualidade exigida para um determinado uso (SMITH, 1962; TONINI, 2003), são necessárias investigações detalhadas, pois esta é uma decisão complexa uma vez que se deve levar em consideração as interações espaçamento x espécie x ambiente e os aspectos econômicos.

#### **1.3.4. Espaçamento *versus* Mortalidade**

O estudo do crescimento e produção em florestas nativas ou plantadas é parte fundamental no manejo florestal e seus principais componentes são: recrutamento, corte, produções corrente e futura, e mortalidade (CAMPOS e LEITE, 2013). Esta última consiste no volume ou número de árvores que havia inicialmente em um povoamento e que morreram num determinado período. Segundo Campos e Leite (2013), o estudo da mortalidade tem a finalidade de prever o número de indivíduos sobreviventes por hectare, informação essa que frequentemente consiste no *input* de um modelo de crescimento e produção. Adicionalmente, o conhecimento da taxa de mortalidade permite o manejador avaliar o potencial do povoamento e formular as estratégias de manejo.

A mortalidade é classificada em dois tipos: regular, quando advinda de causas não catastróficas e irregular, causada por fatores exógenos, decorrente de causas não intrínsecas à árvore (LEE, 1971; SMITH, 1980; CAMPOS e LEITE, 2013). A mortalidade regular ocorre quando os indivíduos crescem tão próximos uns dos outros que competem pelo fornecimento limitado de luz, água e nutrientes (LEE, 1971) sendo mais intensiva em povoamentos densos ou superestocados (ROSSI et al., 2006). A idade está dentre os principais fatores que causam a mortalidade regular, porém a mortalidade cíclica ou esporádica causada por efeitos climáticos também é considerada regular (TONINI, 2003). Já as principais causas da mortalidade irregular são: ataques de pragas, doenças, incêndios, ventos e danos mecânicos, as quais podem acontecer esporadicamente no tempo e no espaço e promovem a morte de um elevado número de árvores ou até de todo o povoamento (TONINI, 2003; CAMPOS e LEITE, 2013). É importante lembrar que, a mortalidade não deve ser confundida com falha de plantio, pois esta se refere à morte das mudas após a regeneração ou plantio de um povoamento (CAMPOS e LEITE, 2013).

De uma forma geral, espaçamentos menores tendem a favorecer um rápido crescimento em altura (BERGER, 2000; PAULINO, 2012; LELES et al., 2014; VENTURIN

et al., 2014), influenciando tanto nas características silviculturais (redução da conicidade, menor incremento em diâmetro nos primeiros anos, menor produção em volume individual e etc), quanto nos custos de produção. Estes efeitos refletirão como vantagens ou desvantagens dependendo do produto final desejado. Porém, independente das características desejadas para a madeira produzida, com o decorrer do tempo, povoamentos submetidos a maiores densidades de plantio podem, também, gerar um aumento no número de árvores dominadas e da taxa de mortalidade devido à competição por luz, água e nutrientes (ALBER, 1980; CRECHI, 1996; SARTÓRIO, 2014). Corroborando com isto, Alber (1980) relata que a mortalidade causada pela densidade de plantio pode ser uma consequência da supressão, em que as árvores dominadas são menos vigorosas, tornando-se suscetíveis à doença ou pragas e sofrem danos a um grau muito maior do que os indivíduos mais vigorosos. O autor salienta que esse tipo de mortalidade deve ser considerado em modelos de crescimento e produção, principalmente em povoamentos onde o desbaste não foi realizado no momento adequado (antes da alta taxa de mortalidade). Esta conduta de manejo não é desejada, pois os indivíduos mortos, na maioria das vezes, não são utilizados (CAMPOS e LEITE, 2013). Portanto, de acordo com Schneider (2008), a elevação da taxa de mortalidade deve ser evitada com a antecipação de intervenções de desbastes aplicada com uma intensidade adequada, dependendo da capacidade produtiva do sítio e da velocidade de crescimento das espécies.

Schneider et al. (2005) avaliaram a mortalidade de *Acacia mearnsii* de Wild., e verificaram correlações positivas entre a mortalidade com as variáveis de crescimento (diâmetro médio, altura média, altura dominante e área basal por hectare), com a idade e com o espaço vital. Entretanto, apesar da mortalidade correlacionar-se diretamente com densidade do povoamento, a maior correlação encontrada (0,75) foi com a idade, evidenciando que no decorrer do tempo à medida que as variáveis de crescimento aumentam a mortalidade se eleva, em decorrência da maior competição. Crechi (1996) estudou o crescimento e produção de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze sob o efeito de 10 densidades iniciais de plantio (625 a 4444 árv.ha-1) em diferentes idades (6, 7, 8, 9, 11, 12, 18, 22 e 24 anos). O autor observou que até a idade de oito anos não houve diferença significativa na taxa de mortalidade entre os tratamentos. Contudo, dos nove aos 24 anos, verificou-se uma tendência crescente do incremento em mortalidade com o aumento da densidade de plantio, sendo que aos 24 anos a menor e a maior densidade apresentaram, aproximadamente, 16% e 78% de mortalidade, respectivamente. Portanto, a competição foi fator determinante na taxa de mortalidade, evidenciando um efeito direto da densidade do

povoamento na mortalidade das árvores com o aumento da idade. Resultados semelhantes foram encontrados por Loureiro (2013), a qual avaliou o crescimento dessa mesma espécie aos 24 anos, constando maior mortalidade no espaçamento mais adensado (1,5 x 1,5 m). Em sua pesquisa sobre crescimento e produção de clones de *Eucalyptus saligna* Smith, Tonini (2003) observou que a taxa de mortalidade variou em função dos diferentes espaçamentos (densidade inicial de 1111, 1667 e 2020 árv. ha<sup>-1</sup>) e índices de sítio. Segundo o autor, de uma forma geral, a taxa de mortalidade estimada para o mesmo índice de sítio, é maior nos menores espaçamentos tendendo a aumentar com a idade. Vale ressaltar que, independente do espaçamento, Tonini (2003) observou-se uma taxa de mortalidade mais elevada nos melhores sítios, argumentando que, sob o ponto de vista biológico, isto é esperado por ser a taxa de mortalidade diretamente influenciada pela taxa de crescimento da floresta, que é maior nos melhores sítios. Bouvet et al. (2003) em seu estudo sobre tendências em variâncias e herdabilidades com idade para o crescimento em experimentos de espaçamento de eucalipto (clones de *E. urophylla* x *E. grandis*, *E. urophylla* x *E. pellita* e *E. tereticornis* x *E. grandis*) observaram uma baixa porcentagem de mortalidade para as populações, com uma mortalidade ligeiramente maior para o espaçamento denso (2 x 2 m) aos 86 meses. Xue et al. (2011) avaliaram os efeitos de densidade no crescimento do povoamento de *E. urophylla* auto-desbastados e verificaram a mortalidade foi causada pela competição nas maiores densidades, de modo que a mortalidade aumentou com o aumento densidade.

Portanto, para o manejo adequado de povoamentos florestais é essencial conhecer as inter-relações entre a densidade de indivíduos por hectare, com a espécie, com a qualidade do sítio e com idade, de forma a compreender o comportamento das árvores ao longo do tempo para as melhores tomadas de decisões no gerenciamento da floresta.

### **1.3.5. Espaçamento versus custos de produção**

A densidade de plantio não influencia apenas as taxas de crescimento das plantas, qualidade da madeira, idade de corte, mas também as práticas de implantação, condução, manejo e exploração florestal e, por imediato, os custos de produção (BALLONI e SIMÕES, 1980). De acordo com Smith (1962) povoamentos manejados inadequadamente são, frequentemente, sub ou superestocados. O autor explica que se a densidade do povoamento é muito baixa, as árvores tendem a ser mal formadas, apresentando muitos galhos, e os espaços vazios ocupados por plantas daninhas. Já em florestas excessivamente densas a

produção é distribuída sobre muitos indivíduos que não desenvolvem a uma taxa ideal e perdem o vigor. Portanto, se a densidade da floresta não for cuidadosamente manejada isto pode elevar os custos de produção ou até mesmo ocasionar prejuízos no decorrer dos ciclos de corte.

Neste sentido, Mello et al. (1972), estudando, a influência da espécie (*Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus propinqua*), do espaçamento (3,0 x 1,5 m e 3,0 x 2,0 m) e da idade de corte (cinco e sete anos) no custo de produção de madeira industrial, observou diversas situações, entre elas: o custo da madeira em pé variou com a espécie; o mais baixo custo do estéreo de madeira foi obtido pelo *E. grandis* plantado no espaçamento de 3,0 x 1,5m e cortado aos 7 anos de idade; o espaçamento 3,0 x 1,5m reduziu o custo do estéreo de madeira produzida, em comparação com 3,0 x 2,0m. Klein et al. (1992) avaliaram a produção de madeira de *Acacia mearnsii* De Wild, aos sete anos, sob diferentes espaçamentos (1, 4 e 6 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>) e verificaram que a menor área vital disponível por planta (1 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>) propiciou a maior produção volumétrica por hectare. Contudo, os autores salientaram que os custos de implantação para esse tratamento foram quatro a cinco vezes maiores quando comparado aos demais espaçamentos. Isto ocorreu, pois o espaçamento de 1 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup> precisou de um número muito elevado de mudas e maior quantidade de insumos e mão de obra. Entretanto, Fishwick (1976) ressalta que espaçamentos adensados têm como vantagens a alta produção de volume total em menor tempo, reposição desnecessária pelo elevado número de plantas e rápido retorno financeiro proveniente dos desbastes. Adicionalmente, Davis (1966) relata há fortes razões econômicas para manter a floresta em um nível de estoque que possibilite alcançar um valor máximo de crescimento, pois a maior proporção dos custos envolvidos em uma floresta são relativamente constantes por área. Ou seja, proteger um povoamento subestocado de danos advindos de pragas e doenças, incêndios, custa tanto quanto proteger uma floresta bem ou completamente estocada.

A relação de custos de produção x densidade do povoamento é um assunto muito mais complexo, uma vez que os custos de produção são dependentes do crescimento da floresta, o qual não está sujeito, apenas, à densidade de plantio, mas, também, das inter-relações com a espécie, híbrido ou clone, com idade, com a qualidade do sítio, com o clima e com produto final desejado. Assim sendo, o estabelecimento, condução e manejo de uma floresta deve ser planejado minuciosamente, levando em consideração os diversos fatores anteriormente explanados e seus efeitos na qualidade e quantidade do produto final, destacando as interações genótipo x ambiente x idade.

#### 1.4. DELINEAMENTO SISTEMÁTICO TIPO “LEQUE”

A aplicação de um delineamento experimental pode ser definida como a utilização dos princípios básicos da experimentação (repetição, casualização e controle local) propostos pelo matemático Ronald Aylmer Fisher, entre 1919 e 1925 (DUARTE, 1996). A introdução dos conceitos formulados por Fisher, os quais são a base da estatística experimental da atualidade, trouxe grandes avanços na pesquisa e fez com que a estatística se tornasse uma parte fundamental no método científico. Contudo, a instalação dos experimentos propostos por Fisher, atualmente, pode, na prática, limitar o número ou tamanho de ensaios, devido as dificuldades relativas à disponibilidade de área e de recursos para instalação, manutenção e avaliação (ODA, 2005).

Os ensaios de campo envolvendo espécies florestais geralmente ocupam grandes áreas por serem de grande porte, acarretando na necessidade de locais maiores para desenvolvê-los (MORAES et al., 2013). No entanto, isso se torna um fator limitante para estes estudos, uma vez que experimentos que ocupam grandes áreas são estatisticamente indesejáveis, pois muitas vezes não atendem as premissas da experimentação e são difíceis de serem controlados (MINAMI, 1977; MORAES et al., 2013; ODA, 2005).

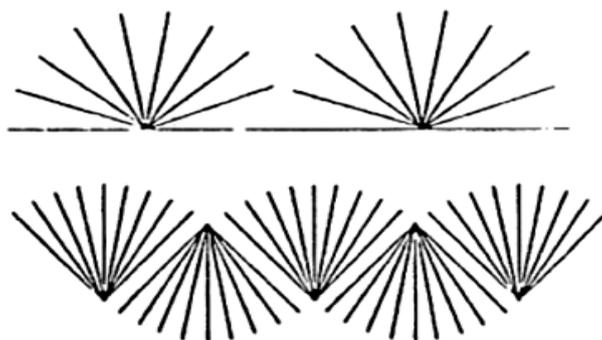
Com o objetivo de superar as limitações inerentes aos delineamentos experimentais tradicionais, Nelder (1962) propõe, como alternativa, os delineamentos sistemáticos com fator quantitativo contínuo, os quais não levam em consideração o princípio da casualização. Dentre, os delineamentos propostos por Nelder (1962), destaca-se o delineamento sistemático tipo “leque” o qual tem sido empregado em diversos trabalhos de campo (TETIO-KAGHO e GARDNER, 1988; LOPES et al., 2005; ODA, 2005; NASCIMENTO, 2011; SANTOS, 2011; DANTAS, et al., 2012; MARQUES, 2012; MORAES et al., 2013; MELOTTO, 2014).

Esse delineamento foi inicialmente proposto na área hortícola, mas não demorou a ser aplicado, também, em espécies arbóreas frutíferas como observado no experimento de espaçamentos em cacau realizado por Fremman (1964). Posteriormente o delineamento sistemático tipo “leque” passou a ser empregado também em estudos com outras espécies florestais como: TENNENT (1975) com *Pinus radiata*; MARK (1983) com oito espécies de eucalipto; STAPE (1995), STAPE e BINKLEY (2010) e ODA-SOUZA et al. (2008) com *Eucalyptus dunnii*, SANTOS (2011) com um híbrido de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, MORAES et al. (2013) com *Jacaranda cuspidifolia* e VANCLAY et al. (2013) com *Araucaria cunninghamii* e *Flindersia brayleyana*). Este delineamento consiste num

sistema de raios e arcos de círculos concêntricos, onde a retangularidade (razão entre as distâncias inter e intra linhas) é constante (NELDER, 1962). Os raios são separados por um ângulo constante e os arcos afastados por uma progressão geométrica da distância radial de forma que a área por planta aumenta conforme a distância do ponto central. Assim sendo, uma planta é instalada nas interseções de raios e arcos e naturalmente vão se formando as densidades ao longo do comprimento dos raios, dentro de um único lote, eliminando a necessidade de separar as parcelas e constituí-las de forma independente (ALEIXO, 2012). A principal vantagem deste delineamento é que o mesmo permite avaliar um maior número de espaçamentos possíveis (incluindo tratamentos extremos) em menores áreas experimentais, reduzindo assim a necessidade de grande demanda de recursos e mão-de-obra, facilitando o manejo do ensaio.

Vale ressaltar que há algumas adaptações ao delineamento original proposto por Nelder (1962), como por exemplo, o arranjo proposto por Namkoong (1966) citado por Stape (1995). O autor considera o uso do delineamento sistemático em “leques” de ampla utilidade em estudos de melhoramento florestal e silvicultura, contudo o autor recomenda um arranjo em “leques” incompletos fazendo a repetição dos mesmos, conforme ilustrado na Figura 1.

Entretanto, Bar-Hen (2002), menciona duas restrições geradas por delineamentos sistemáticos. O primeiro refere-se a impossibilidade de uso das análises estatísticas convencionais, uma vez que o arranjo sistemático das plantas não é casualizado. A falta de aleatoriedade no ensaio experimental não garante a independência dos erros associados, tornando as unidades experimentais correlacionadas (MORAES et al., 2013). O segundo fator limitante é a alta sensibilidade para valores perdidos, pois quando ocorre falha ou mortalidade o espaçamento das plantas vizinhas é modificado e a área vital disponível para estas torna-se diferente daquela instituída inicialmente para os tratamentos.



**Figura 1:** Repetições de delineamentos sistemáticos tipo “leque” no estudo de espaçamentos (NAMKOONG, 1966 apud STAPE, 1995)

Assim sendo, Nelder (1962) relata que a ocorrência de uma falha em experimentos com delineamento sistemático ocasiona a remoção de cinco observações, a falha ou morte e seus quatro vizinhos imediatos, pois estes valores não podem ser incluídos nas análises. Corroborando com isto, Gomez e De Datta (1972) ao estudarem a influência das falhas e mortes de plantas em uma série de experimentos de produtividade de arroz, a fim de corrigir este problema, propuseram eliminar da análise de dados todas as plantas adjacentes a estas, caso a ocorrência fosse baixa e aleatória. Adicionalmente, o delineamento sistemático em “leque” apresenta desvantagem também, com relação ao uso de máquinas nos trato culturais como controle da mata competição, fertilização entre outras operações que necessitam ser realizadas manualmente (STAPE, 1995).

Stape (1995) relata que o delineamento sistemático tipo “leque” possui atrativos ao pesquisador florestal devido as vantagens de compacidade, abrangência e fácil manejo, contudo são penalizados pela insegurança de análise, interpretação e extrapolação dos resultados obtidos, como mencionado anteriormente. Diante destas questões Stape (1995) se propôs comparar o uso de delineamentos tipo “leque”, no estudo de espaçamentos florestais, com delineamentos em blocos casualizados, com *Eucalyptus dunnii*, realizando medições dendrométricas até a idade de 6 anos. Stape (1995) concluiu, em sua pesquisa, que o delineamento tipo “leque” reproduziu o comportamento, individual e em conjunto das variáveis de crescimento e produção, das plantas em função do espaçamento, de maneira semelhante ao observado no delineamento em blocos ao acaso. Corroborando com isto, Stape e Binkley (2010) concluíram que, de forma geral, os delineamentos propostos por Nelder fornecem a mesma informação sobre as respostas das plantas em relação ao espaçamento quando comparados a um delineamento clássico de blocos casualizados.

Portanto, o delineamento experimental em questão, apesar de algumas desvantagens, pode ser empregado, de forma eficaz, em área reduzida e com grande espectro de variação em estudos sobre o comportamento de espécies arbóreas em função do espaçamento.

## **1.5. ANÁLISE DE DADOS DE DELINEAMENTOS SISTEMÁTICOS**

Como forma de análise estatística, Stape (1995) propõe a utilização de equações de regressão na análise de dados provenientes de delineamentos sistemáticos, sendo a variável independente a densidade de plantas, e a variável dependente a resposta em estudo, como altura, volume, diâmetro entre outras. Os modelos de regressão são frequentemente empregados na análise de dados em experimentos com delineamento sistemático (NELDER,

1962; RAO et al., 1990; ODA-SOUZA et al., 2008; SANTOS, 2011; ALEIXO, 2012; MARQUES, 2012; SCHULZE et al., 2014).

Dentre os modelos clássicos de regressão utilizados no estudo de crescimento cita-se: a equação de Bertalanffy (1934, 1957) e a equação de Chapman–Richards assim nomeada por Turnbull (1963 apud SILVA et al. 1996). Já Adams et al. (2013) relatam que diversos estudos (ZEIDE 1993; PURVES e LAW 2002; SCHNEIDER et al. 2006; ADAMS 2010) demonstram que a função de Gompertz (1825), tem se apresentado como um dos melhores descritores de crescimento de algumas espécies florestais. Segundo Mendes (2011) o modelo logístico, juntamente com a equação de Gompertz, se destaca entre os descritores de curvas de crescimento, sendo que ambos fornecem informações importantes, fundamentadas especialmente nas estimativas de seus parâmetros, e apresentam interpretação biológica, tais como taxas de crescimento e acúmulo máximo de biomassa. De uma forma geral, os modelos de regressão sigmóides são os mais utilizados na análise de crescimento de espécies florestais (HOFFMANN e BERGER, 1973; CALEGARIO et al., 2005; SANQUETTA et al., 2010; CAMPOS e LEITE, 2013; MILANI et al., 2013; MACHADO et al., 2015).

Além das análises clássicas de regressão outros métodos podem ser utilizados no estudo de delineamentos sistemáticos. Uma alternativa seria a utilização de métodos de análises espaciais de dados como, por exemplo, a geoestatística. Esse tipo de análise pode atuar como uma alternativa ou complementação das análises estatísticas tradicionais, uma vez que esta ferramenta incorpora a continuidade espacial, além de não requerer a casualização e o controle local que são pressuposições básicas da experimentação propostas por Ficher (Barbin, 2003). No método geoestatístico encontra-se a Teoria das Variáveis Regionalizadas (VIEIRA, 2000), estas variáveis são aquelas com condicionamento espacial, as quais apresentam um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e aquelas totalmente determinísticas (LANDIM, 2003). Isto ocorre porque essas variáveis são aleatórias, uma vez que os valores numéricos observados podem variar consideravelmente de acordo com a sua localização no espaço, e são espaciais porque apesar de variarem dentro do espaço, os valores numéricos observados não são inteiramente independentes (GUERRA, 1988). Caso constatada a dependência espacial da variável analisada no experimento os modelos geoestatísticos podem ser utilizados. Maiores detalhes sobre as análises geoestatísticas podem ser encontrados em: Vieira et al. (1983), Trangmar et al., (1985), Hamlett et al. (1986), Guerra (1988), Isaaks e Srivastava (1989), Cressie, (1991), Guimarães (1993), Burrough e

Mcdonnell (1998), Vieira (2000), Landim (2003), Souza et al. (2004), Miller et al. (2007), Rodrigues (2010), Aquino (2013), Aquino et al. (2016) e Rodrigues (2013).

Segundo Oda-Souza et al. (2008) em experimentos com delineamentos sistemáticos não é possível evitar que as condições ambientais induzam dependência entre as unidades medidas, uma vez que não há casualização. Portanto, os autores propuseram o uso do método geoestatístico em um experimento com delineamento sistemático tipo “leque” de *Eucllyptus dunnii* com 6 anos de idade, objetivando identificar a dependência espacial, bem como propor, analisar e comparar alternativas para tratar dados faltantes (falhas e/ou mortalidade de plantas). Em sua pesquisa, Oda-Souza et al. (2008) constataram que os métodos geoestatísticos foram adequados para verificar a existência de dependência espacial no delineamento sistemático tipo leque e que a inclusão da co-variável planta-morta, para baixos índices de mortalidade, permitiu o uso dos dados de plantas adjacentes às falhas ou mortes.

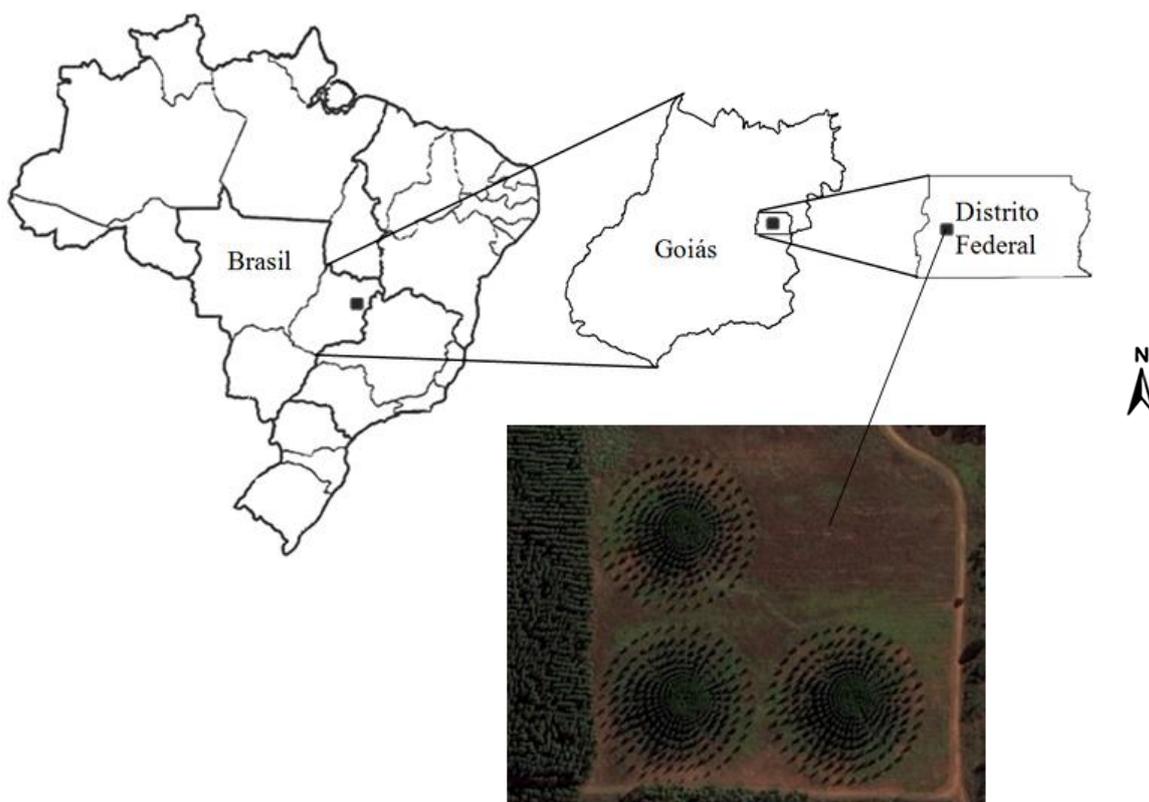
Além dos métodos anteriormente citados devem ser propostas e avaliadas outras formas de análises estatísticas para estudos de espaçamentos em delineamentos sistemáticos, uma vez que estes oferecem grandes vantagens de ordem prática e de abrangência, pois podem ser conduzidos em áreas menores e permitem o estudo de tratamentos extremos.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

O estudo foi conduzido em Brasília, DF, na Fazenda Água Limpa (FAL) (Figura 3). A Fazenda Água Limpa possui um total de 4.390 ha, com vegetação natural predominante de tipologias do bioma Cerrado, se destacando o cerrado sensu stricto sobre Latossolo Vermelho.

A altitude média da região é de 1.100 m, com latitude 15° 56' 40'' sul e longitude de 47° 56' 52'' oeste. O clima local é classificado, segundo critérios de Köppen (1936), como Aw, denominado clima tropical de inverno seco. A precipitação anual média é de 1.600 mm, com uma pronunciada estação seca de junho a setembro. As temperaturas médias são da ordem de 18°C (inverno) e 30°C (verão) e a média anual é de 21°C (FIEDLER et al., 2004).



**Figura 2:** Localização geográfica da área de estudo ( $15^{\circ} 58' 89''\text{S}$  e  $47^{\circ} 54' 52''\text{O}$ ), Brasília, DF, imagem obtida no programa Google Earth – Data da imagem: 09 de junho de 2015.

### 2.1.1. Caracterização e instalação do delineamento sistemático tipo “leque”

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de um experimento de espaçamento de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (denominado comercialmente de clone EAC 1528) instalado em um delineamento sistemático tipo “leque” denotado por 1a conforme proposto por Nelder (1962).

Assim como descrito por Nelder (1962) e explanado por Stape (1995) este delineamento se caracteriza ao definirem-se os valores do raio inicial  $r_0$  (distância do ponto central do círculo à bordadura interna), a razão da progressão geométrica dos raios ou fator de espaçamento ( $\alpha$ ), o ângulo entre os mesmos ( $\theta$ ) e a área ( $A_i$ ) entre as plantas (Figura 3). Desta forma, obtiveram-se os seguintes valores para as características do delineamento sistemático em “leque”:  $r_0 = 2,80$  m,  $\alpha = 1,11$  e  $\theta = 10^{\circ}$ . A partir desses valores o delineamento ficou definido conforme apresentado na tabela 1.

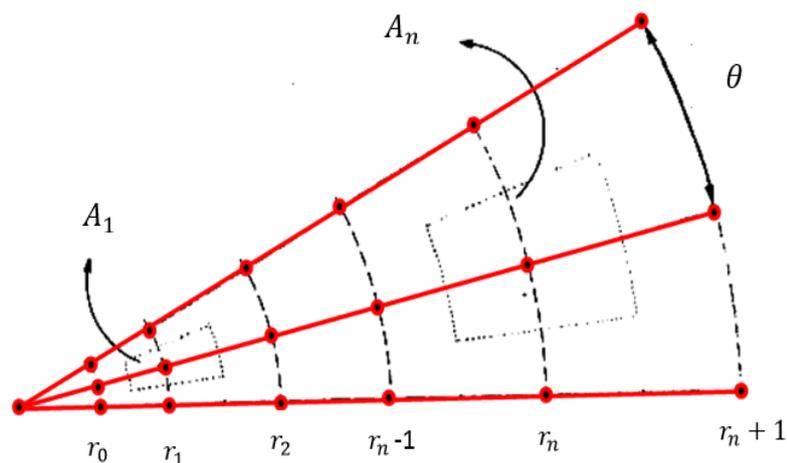


Figura 3: Valores do raio inicial ( $r_0$ ), raios dos tratamentos ( $r_1$  a  $r_n$ ) ângulo entre os raios ( $\theta$ ) e área associada a cada planta ( $A_1$  a  $A_n$ ) no delineamento sistemático tipo “leque”. Adaptado de Stape (1995).

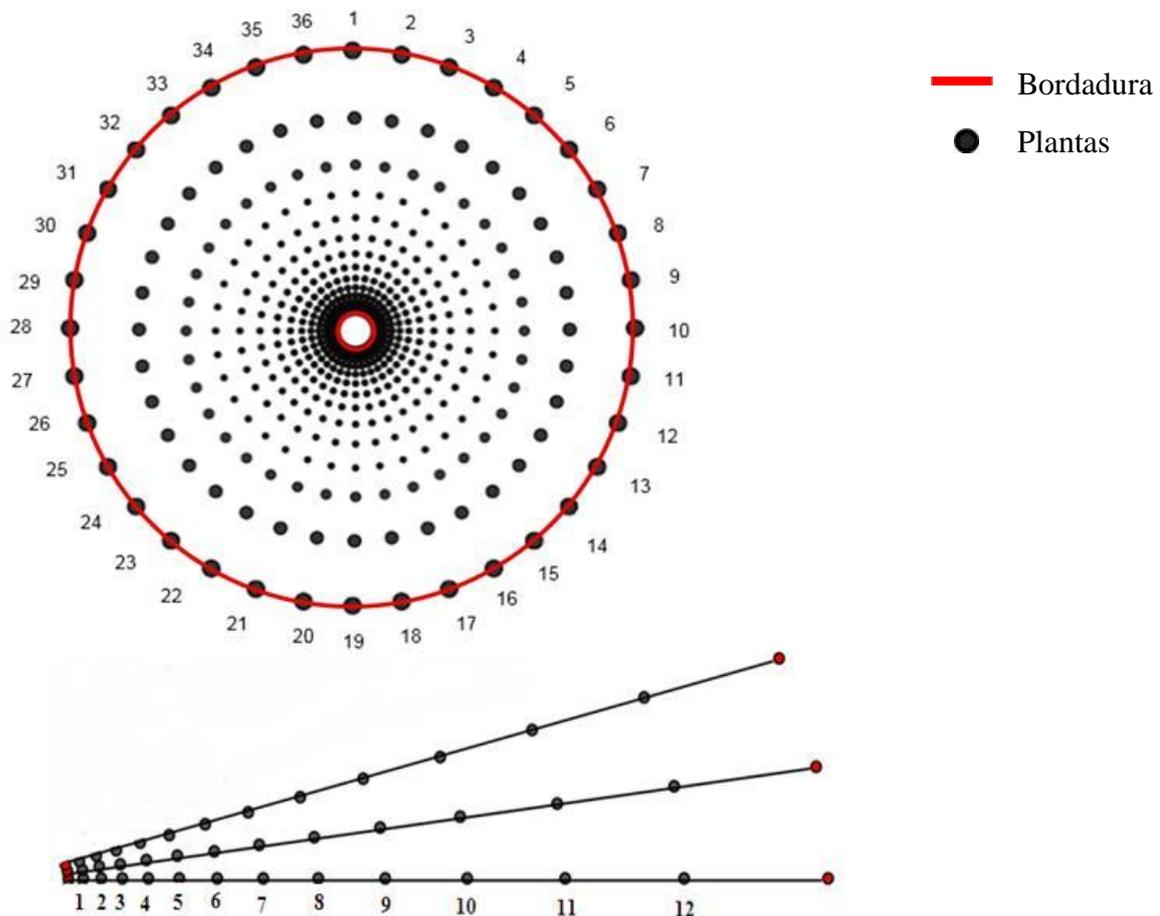
**Tabela 1:** Espaçamento de plantio, área por planta e densidade de plantas para 12 tratamentos (espaçamentos) no delineamento sistemático tipo “leque”.

Tratamento	Espaçamento (entre plantas x entre raios)	Área vital (m <sup>2</sup> )	Densidade (plantas.ha <sup>-1</sup> )	
Borda Interna	0,66 x 0,49	0,32	31.250,00	
Adensados	1	0,80 x 0,63	0,50	20.000,00
	2	0,96 x 0,80	0,77	12.987,01
	3	1,17 x 1,00	1,17	8.547,01
	4	1,41 x 1,25	1,76	5.681,82
	5	1,71 x 1,54	2,64	3.787,88
Intermediários	6	2,07 x 1,91	3,94	2.538,07
	7	2,50 x 2,34	5,86	1.706,48
	8	3,03 x 2,87	8,69	1.150,75
Amplios	9	3,66 x 3,51	12,86	777,60
	10	4,43 x 4,28	19,00	526,32
	11	5,37 x 5,22	28,03	357,02
	12	6,49 x 6,35	41,25	242,42
Borda Externa	7,85 x 7,72	60,68	164,80	

Na Figura 4 tem-se o croqui do experimento, o qual possui 12 tratamentos (arcos) e 36 repetições (raios/plantas). O primeiro e o último arco foram desconsiderados, pois são respectivamente, uma bordadura interna com raio de 2,80 m e uma bordadura externa com raio de 44,26 m.

Namkoong (1966 apud STAPE 1995) sugere o uso de leques incompletos com a repetição dos mesmos, sendo que em cada leque o conjunto de raios é considerado uma parcela (Figura 1). Entretanto, optou-se por instalar o círculo completo bem como fazer a repetição dos círculos, mas considerando os valores individuais por planta como uma repetição. Assim sendo, o ensaio é composto de dois círculos (Blocos) idênticos em que cada um perfaz uma área circular de 0,62 ha e uma área quadrada de 0,78 ha.

Os dados advindos do Bloco 2 não foram utilizados na avaliação do efeito dos tratamentos nas variáveis estudadas, mas sim para validação (generalização) da melhor equação ajustada conforme descrito no item “3.4.3” e “3.4.4”.



**Figura 4:** Croqui da instalação do experimento em delineamento sistemático tipo “leque” com 12 tratamentos e 36 repetições de com híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Após a definição das características do delineamento sistemático tipo “leque”, o ensaio experimental foi instalado no mês de dezembro de 2013, conforme mostrado nas Figuras 5.



**Figura 5:** a – Detalhe do subsolador utilizado b– Detalhe da subsolagem e aplicação do superfosfato simples por metro linear no fundo do sulco c e d - plantio das mudas e aplicação de hidrogel por cova; e e f – Detalhe do experimento após o término da instalação.

Para o preparo do solo foi realizada uma subsolagem a 70 cm de profundidade, sendo aplicado 200g de superfosfato simples por metro linear no sulco de plantio. O controle de formigas cortadeiras foi realizado utilizando-se termonebolizador e isca granulada. Antes do plantio, as mudas foram previamente tratadas com calda cupinicida, mediante do torrão por imersão do torrão da muda na solução de fipronil, com a dosagem recomendada pelo fabricante. Posteriormente realizou-se o plantio das mudas do híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* de forma manual. Na realização do plantio foi aplicado 2,5 litros de hidrogel por cova, com o intuito de garantir a maior sobrevivência e desenvolvimentos das mudas frente a veranicos. Foi realizada uma fertilização de cobertura 15 dias pós-plantio, aplicando-se 350g de NPK 20-05-20 a 30 cm de distância de cada muda, sendo esta fertilização repetida aos 12 e 24 meses de idade.

### **2.2.1. Diâmetro e Altura**

Os dados foram coletados seguindo uma malha amostral composta por 12 círculos concêntricos com 432 pontos (árvores), cuja distância corresponde ao espaçamento entre as plantas. O experimento foi avaliado a cada 120 dias durante 24 meses. Todas as plantas foram etiquetadas por meio de placas de alumínio numeradas e presas ao fuste. Na primeira avaliação foram medidos dados individuais de diâmetro a altura do solo (DAS) e altura total (Ht) de todas as plantas vivas. Foi, ainda, anotada a ocorrência de falhas e mortalidade. Para medir DAS e Ht foram utilizados: paquímetro digital e régua altimétrica, respectivamente. A partir da segunda medição foram medidos o DAS, Ht e DAP.

### **2.2.2. Dados de volume e espessura de casca**

Os dados de volume foram avaliados aos 16 e 24 meses. Para obtenção do volume sólido por planta, com casca e sem casca, foi utilizado um método direto. As árvores foram cubadas em pé, sendo coletados os dados de diâmetro em seções de 0,5 em 0,5m a partir da base (nível do solo) até a altura de 5 metros (Figura 6), calculando-se o volume de cada seção pela fórmula de Smalian, e o volume do ponteiro como um cone regular, conforme as equações (8), (9) e (10) (FINGER, 2006).

$$V_i = \frac{g_1 + g_2}{2} \cdot L \quad (1)$$

em que:  $V_i$  = volume com ou sem casca da seção, em  $m^3$ ;  $g_1$  e  $g_2$  = áreas seccionais com ou sem casca, obtidas nas extremidades da seção, em  $m^2$ ;  $L$  = comprimento da seção, em m

$$V_c = \frac{1}{3} g_n \cdot l_n \quad (2)$$

em que:  $V_c$  = Volume do ponteiro (cone);  $g_n$  = área seccional da base do cone;  $l_n$  = comprimento do ponteiro

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (3)$$

em que:  $V$  = Volume total com ou sem casca

A cubagem foi realizada em cinco plantas por tratamento em cada bloco, totalizando 120 indivíduos. A seleção das árvores foi baseada no diâmetro médio ( $q$ ) em cada tratamento calculado de acordo com a equação (4). Assim sendo as cinco árvores que apresentaram o valor igual ou próximo ao  $q$  do tratamento foram selecionadas.

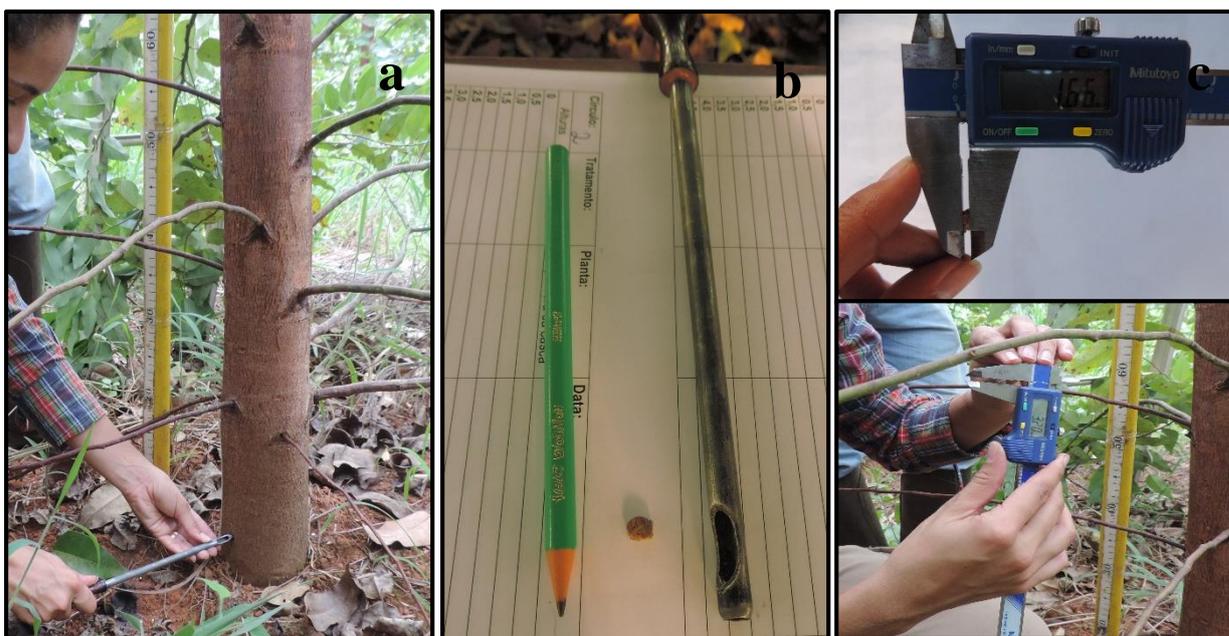
$$q = \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n DAP_i^2} \quad (4)$$

em que:  $q$  = diâmetro médio ou quadrático;  $DAP$  = diâmetro medido na altura de 1,30m; e  $n$  = número de árvores



**Figura 6:** a e b – Medições dos diâmetros das seções, a cada 0,5 m, para realização da cubagem, c – Detalhe da cubagem em pé (medições dos diâmetros das seções mais altas).

Os dados de espessura da casca foram coletados simultaneamente à cubagem. Portanto, mediu-se a espessura da casca nas seções de 0,5 m da base do fuste (nível do solo) até a altura de 5 metros em todas as árvores selecionadas para a cubagem. Para tal, foi utilizado um amostrador de casca para coleta da amostra, que foi imediatamente medida utilizando paquímetro digital, conforme a Figura 7.



**Figura 7:** a – Coleta de amostra de casca na altura do solo; b – Trado utilizado para coleta; c – Detalhes do paquímetro e medição da amostra de casca.

### 2.2.3. Fator de forma

O fator de forma foi obtido para cada árvore por meio da razão entre o volume total real da árvore em relação ao volume de um cilindro, com base no diâmetro a 1,3 m (DAP):

$$f_{1,3} = \frac{\text{Volume real}}{\text{Volume do cilindro no DAP}} \quad (4)$$

Posteriormente a obtenção do fator de forma de cada planta foi determinado o fator de forma médio por tratamento, tendo-se um  $f_{1,3}$  para cada espaço vital. Teste de agrupamento (descrito no item “3.3.4”) e gráficos foram utilizados para ilustrar a influência do espaçamento sobre a forma das árvores (espaço vital x  $f_{1,3}$ ).

#### **2.2.4. Falhas e mortalidade**

No delineamento sistemático tipo “leque” a ocorrência de uma falha ou mortalidade faz com que as plantas vizinhas tenham uma área disponível diferente daquela estabelecida inicialmente devido à inexistência de bordadura entre plantas e entre linhas e, de acordo com Nelder (1962), estes dados não podem ser inseridos na análise estatística. Com o intuito de solucionar este problema, seguiu-se a recomendação de Gomez e De Datta (1972), os quais propõem remover os dados de todas as plantas adjacentes às falhas e mortes, desde que a ocorrência destas, seja pouca e aleatória, que foi o caso deste estudo.

Foi considerada falha de plantio a inexistência da planta na primeira avaliação e mortalidade as futuras falhas ocorridas ao longo do desenvolvimento do ensaio. Devido a isso foi preciso padronizar o número de plantas por tratamento (inicialmente 36) uma vez que as falhas e mortes não ocorreram de forma idêntica em todos os tratamentos. Para tal padronizou-se o número de plantas totais por tratamento pela situação mais crítica em cada idade de avaliação, as quais foram: a perda de seis plantas no tratamento 1 do Bloco 1 e 2 na idade de 12 meses, perda de 19 plantas no tratamento 1 do Bloco 1 e sete plantas do tratamento 1 do Bloco 2 na idade de 24 meses. Deste modo fez-se necessário, por sorteio, a exclusão de diferentes números de árvores por tratamento em cada bloco e em cada idade, ou seja na idade de 12 meses foram 30 repetições (plantas) por tratamento tanto no Bloco 1 quanto no Bloco 2 e na idade de 24 meses foram 17 e 29 repetições por tratamento no bloco 1 e 2 respectivamente. O conjunto de dados sem a remoção dos vizinhos também foi submetido as mesmas análises estatísticas do conjunto com a remoção, com a finalidade de verificar a diferença ou não dos dois métodos (com e sem remoção das plantas adjacentes às falhas e/ou mortas).

#### **2.2.5. Dados climáticos**

Foram obtidos dados meteorológicos mensais de temperatura média do ar e precipitação. Os dados meteorológicos utilizados no estudo foram comparados com as Normais Climatológicas da cidade de Brasília-DF no período de 1961-1990 a fim de observar a ocorrência de algum evento atípico, como por exemplo, uma estiagem prolongada. Estes dados foram provenientes de uma estação meteorológica localizada na FAL.

## **2.3. ANÁLISE DOS DADOS**

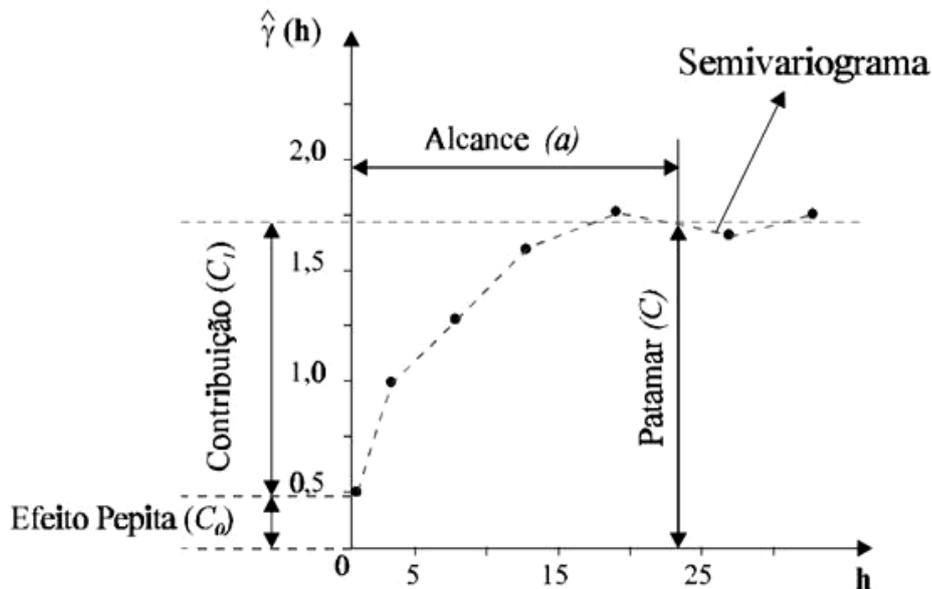
### **2.3.1. Análise descritiva**

Os dados das variáveis dendrométricas (Ht e DAP) foram submetidos à análise estatística descritiva para determinação da média, valores máximos e mínimos, coeficiente de variação (C.V.%) e desvio padrão da média. Foi realizada a correlação simples de Pearson ( $R$ ) das variáveis dendrométricas entre si e entre a área vital por planta. Os valores de  $R$  podem variar de -1 a 1 e podem ser classificados qualitativamente, segundo Callegari-Jacques (2003), da seguinte forma: 0,00 a 0,30 existe fraca correlação linear; 0,30 a 0,60 existe moderada correlação linear; 0,60 a 0,90 existe forte correlação linear; 0,90 a 1, existe correlação linear muito forte.

### **2.3.2. Análise geoestatística**

Com o intuito de verificar a ocorrência ou não de dependência espacial das variáveis dendrométricas avaliadas, os dados foram submetidos à análise espacial geoestatística. Para estimar a dependência espacial entre as amostras, bem como identificar se as variações foram sistemáticas ou aleatórias, foram utilizados modelos de semivariogramas (Figura 8) estimados com o programa *GS+*. Os modelos utilizados em cada semivariograma para as variáveis DAP e Ht em cada idade avaliada encontram-se nos gráficos dos Apêndices A e B.

Para a análise do grau de dependência espacial foi utilizada a classificação de Cambardella et al. (1994), que considera dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita igual a 25% do patamar, de dependência espacial moderada quando o efeito pepita está entre 25 e 75% e dependência espacial fraca, quando o efeito pepita é maior que 75%. Efeito pepita ( $C_0$ ) é a medida da variabilidade quando a distância  $h$  tende a 0. Se o semivariograma for constante e igual ao patamar para qualquer valor de  $h$ , tem-se o efeito pepita puro e, neste caso, há ausência total de dependência espacial, ou seja, a dependência espacial, se existir, será manifestada a distância inferior ao do menor espaçamento entre amostras (GUIMARÃES, 1993).



**Figura 8:** Exemplo de semivariograma e seus parâmetros. Fonte: Adaptado de Camargo (1998).

### 2.3.3. Análise de regressão

Devido a falta de aleatoriedade e ausência de bordadura entre os tratamentos no delineamento sistemático tipo “leque”, o experimento em questão não pode ser analisado como se fosse um delineamento casualizado. Todavia, a existência dos fatores quantitativos crescentes, mesmo que inclusos num delineamento sistemático, sugerem o uso de análise de regressão (NELDER, 1962; STAPE, 1995). Diante disso, para avaliar o efeito do espaçamento nas variáveis dendrométricas, foram adotados, neste estudo, modelos de regressão, ajustados para as variáveis: altura total, DAP e volume com e sem casca (Tabela 2) utilizando o *software* estatístico *Curve expert*. Este *software* utiliza o algoritmo *Levenberg-Marquardt*.

Apesar de alguns autores (HOLLIDAY, 1960; NELDER, 1962) recomendarem a densidade de plantas por hectare como variável independente para este tipo de análise, optou-se, assim como adotado por Stape (1995), por utilizar como variável independente a área vital disponível ( $\text{m}^2 \cdot \text{planta}^{-1}$ ), para não se trabalhar com coeficientes estimados muito pequenos. Os melhores modelos de regressão, ajustados para cada uma das variáveis dendrométricas estudadas, foram selecionados baseando-se nas seguintes estatísticas de

precisão: coeficiente de correlação ( $R$ ), coeficiente de variação ( $C.V.$  %), erro padrão da estimativa ( $S_{y,x}$ ) e gráfico dos resíduos percentuais em função dos valores estimados.

**Tabela 2:** Modelos de resposta ao espaçamento, testados para as variáveis: DAP, altura total, volume com e sem casca obtidas no experimento com delineamento experimental tipo “leque”.

Número do Modelo	Equação	Modelo
1	$y = \beta_0 \cdot e^{(\beta_1 \cdot x)} + \varepsilon$	Exponencial
2	$y = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_1 \cdot e^{(-\beta_2 \cdot x)})} + \varepsilon$	Logístico
3	$y = \frac{(\beta_0 + \beta_1 \cdot x)}{(1 + \beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot x^2)} + \varepsilon$	Função racional
6	$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot x^2 + \beta_3 \cdot x^3 + \varepsilon$	Polinomial

Em que:  $y$ = altura total ou DAP ou volume com e sem casca;  $x$ = espaçamento (área vital em  $m^2$ );  $\beta_i$ = parâmetros da equação.

Posteriormente foi realizada a validação dos melhores modelos, que consistiu em aplicar as equações ajustadas dos modelos selecionados, em um banco de dados independente, ou seja, os dados obtidos no Bloco 2, o qual não foi utilizado no ajuste dos modelos. A validação teve como objetivo selecionar a equação que melhor se ajustou aos dados e consequentemente melhor descreve o comportamento dos mesmos em função dos espaçamentos avaliados. Nesta fase os critérios de seleção foram: maior valor de  $R$ , menor valor de  $C.V\%$  e melhor distribuição gráfica dos resíduos percentuais. Adicionalmente, as equações ajustadas foram comparadas por meio do *Critério de Informação de Akaike (AIC)* de forma que a melhor equação é aquela que apresentar o menor valor de  $AIC$ . De acordo com Floriano (2006) o teste  $AIC$  pode ser utilizado para comparar qualquer tipo de modelo (lineares, não-lineares, aninhados e não-aninhados) e possui uma base teórica matemática complexa, a qual combina teoria da máxima verossimilhança, teoria da informação e o conceito de entropia da informação. Deve-se ressaltar que o  $AIC$  não foi utilizado como critério de validação das equações ajustadas para a variável volume, uma vez que o número de observações ( $n$ ) destas foi de 60 amostras e segundo Burnham e Anderson (2003) só é recomendável usar o  $AIC$  para selecionar modelos quando o número de observações,  $n$ , é maior do que pelo menos 40 vezes o número de parâmetros,  $p$ . Maiores detalhes sobre o

*Critério de informação de Akaike* podem ser encontrados em Burnham e Anderson (2003). O *AIC* pode ser definido pela seguinte equação:

$$AIC = -2l + 2p \quad (5)$$

em que:  $l$  é o ln da função da máxima verossimilhança;  $p$  é o número de parâmetros do modelo considerado.

#### **2.3.4. Teste Scott-Knott**

Para análise comparativa das médias dos fatores de forma e da porcentagem de casca foi utilizado o teste de agrupamento Scott-Knott a 1% de significância. Este teste tem o intuito de separar as médias em diferentes grupos, por meio da minimização da variação dentro dos grupos e maximização da variação entre grupos (SCOTT e KNOTT, 1974).

#### **2.3.5. Teste de Identidade de modelos com variáveis *Dummy***

Foi empregado o teste de identidade de modelos para avaliar a necessidade de remoção das plantas adjacentes às falhas e/ou mortas da análise dos dados. Assim sendo o teste consistiu em verificar se os modelos com a exclusão dos dados provenientes dos vizinhos imediatos à falhas/mortas e os modelos sem a exclusão destes apresentam diferença estatística significativa.

Para os modelos ajustados considerou-se como variável dependente a altura total (Ht) e diâmetro (DAP) e como variável independente a idade (4 a 24 meses para Ht e 8 a 24 meses para DAP). Para a aplicação do teste de identidade de modelos, criou-se variáveis *Dummy* ( $D_i$ ) com valores binários de 0 e 1, conforme descrito em Regazzi (2003), para cada tratamento, da seguinte forma:  $D_1 = 1$ , se a planta compor o banco de dados contendo as plantas adjacentes às falhas e mortas;  $D_2 = 0$ , se a planta compor o banco de dados que considera a remoção das plantas adjacentes às falhas e mortas.

O teste de identidade de modelos testa a hipótese de igualdade entre um grupo de modelos empregando o teste F, a partir de um modelo completo (dados estratificados) e um modelo reduzido (dados agrupados) (Tabela 3). Maiores detalhes podem ser encontrados em Regazzi (2003).

O modelo completo foi composto pelos dados considerando e desconsiderando as plantas adjacentes às falhas e mortas separados pelas variáveis *Dummy* e o modelo reduzido

composto pelos dados agrupados. Ressalta-se que para o ajuste do modelo completo desconsiderou-se o parâmetro “ $\beta_0$ ”, ou seja a constante é zero. Assim, o modelo completo e o reduzido ajustado para as variáveis altura total e diâmetro foram expressos por:

Modelos completos:

$$Ht = \beta_1.D1 + \beta_2.D2 + \beta_3.D1.X^2 + \beta_4.D2.X^2 + \beta_5.D1.X + \beta_6.D2.X + \varepsilon \quad (6)$$

$$DAP = \beta_1.D1 + \beta_2.D2 + \beta_3.D1.X^2 + \beta_4.D2.X^2 + \beta_5.D1.X + \beta_6.D2.X + \varepsilon \quad (7)$$

Modelos reduzidos:

$$Ht = \beta_0 + \beta_1.X^2 + \beta_2.X + \varepsilon \quad (8)$$

$$DAP = \beta_0 + \beta_1.X^2 + \beta_2.X + \varepsilon \quad (9)$$

Em que:  $Ht$  é a altura total para cada tratamento;  $DAP$  é o diâmetro para cada tratamentos;  $X$ =diferentes idades;  $\beta_i$  são os parâmetros do modelo;  $D_i$  são as variáveis *Dummy*.

**Tabela 3:** Estrutura da análise de variância para o teste de identidade de modelos.

Fonte de Variação	SQ	gl	QM	Fcalculado
Modelo completo	SQ.C	$n_1$		
Modelo reduzido	SQ.R	$n_2$		
Redução	SQ.Red	$(n_1-n_2)$	SQ.Red/ $(n_1-n_2)$	QM.Red/QM.Res
Resíduo	SQ.Res	$N-n_1$	SQ.Res/ $(N-n_1)$	
total	SQT	$N$		

Em que: SQ=Soma dos quadrados; gl=graus de liberdade;  $n_1$ =número de parâmetros do modelo completo;  $n_2$ =número de parâmetros do modelo reduzido;  $N$ =número total de observações; QM=quadrado médio.

A Soma dos quadrados foram calculadas da seguinte forma:

$$SQ.C = SQT - \sum(Y - \hat{Y}_c)^2 \quad (10)$$

$$SQ.R = SQT - \sum(Y - \hat{Y}_r)^2 \quad (11)$$

$$SQ.Red = SQ.C - SQ.R \quad (12)$$

$$SQ.Res = SQT - SQ.C \quad (13)$$

$$SQT = \sum Y^2 \quad (14)$$

Em que:  $\hat{Y}_c$  e  $\hat{Y}_r$  são os estimadores para os modelos completo e reduzido, respectivamente.

Desta forma a regra de decisão é definida por: se  $F_{calculado} \geq F_{tabelado}$  ao nível de probabilidade de erro de 5%, rejeita-se  $H_0$ , ou seja, os modelos com a exclusão dos dados

provenientes dos vizinhos imediatos à falhas/mortas e os modelos sem a exclusão destes apresentam diferença estatística significativa.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. SOBREVIVÊNCIA

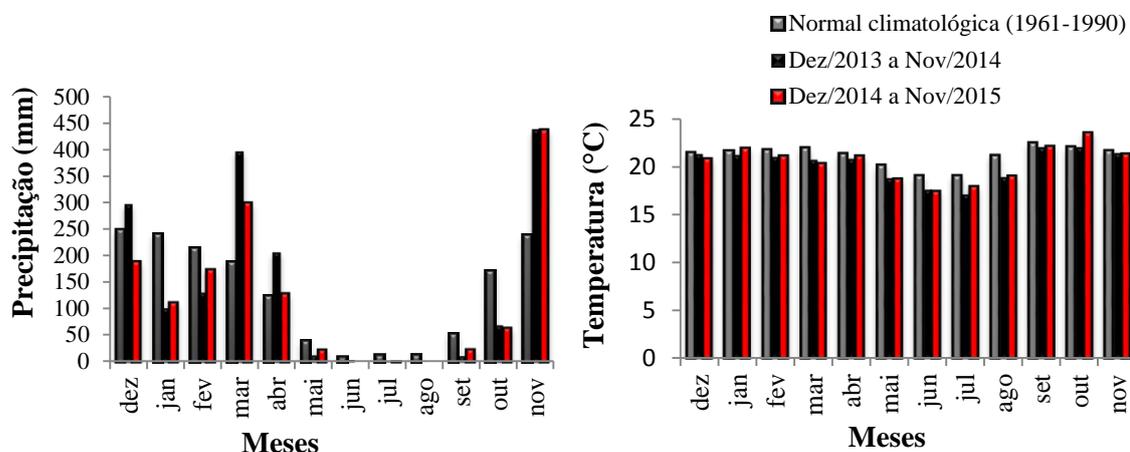
O híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* demonstrou bom desenvolvimento inicial na região de estudo o que pode ser verificado pelos valores médios de altura total (Ht) e diâmetro (DAP) (Tabelas 7 e 11 – Itens “4.4” e “4.5”). Além disso, o experimento apresentou sobrevivência média (Bloco 1) de 99% e 97% aos 12 e 24 meses respectivamente (Tabela 4), totalizando cinco falhas e uma morte no primeiro ano de avaliação e sete mortes no segundo ano. É importante destacar que no primeiro ano o tratamento 1 apresentou uma falha e uma morte e os tratamentos 6, 9, 11 e 12 apresentaram uma falha cada. Já no segundo ano o tratamento 1 apresentou seis mortes e o tratamento 2 apresentou 1 morte, ou seja toda mortalidade ocorreu em tratamentos adensados. Desta forma entende-se que a mortalidade observada no estudo pode ser classificada como regular pois ocorreu principalmente devido a competição e segundo Lee (1971) e ROSSI et al. (2006) é mais intensiva em povoamentos densos ou superestocados.

**Tabela 4:** Porcentagem de sobrevivência das árvores em cada tratamento aos 12 e 24 meses.

	Tratamento	Área Vital (m <sup>2</sup> )	Sobrevivência (%)	
			12 meses	24 meses
Ad	1	0,50	94	81
	2	0,77	100	97
	3	1,17	100	100
	4	1,76	100	100
	5	2,64	100	100
In	6	3,94	97	97
	7	5,86	100	100
	8	8,69	100	100
Am	9	12,86	97	97
	10	19,00	100	100
	11	28,01	97	97
	12	41,25	97	97

Em que: Ad = adensados; In = Intermediários e; Am = amplos.

Os dados de precipitação acumulada e temperatura média foram comparados com as Normais Climatológicas da cidade de Brasília-DF no período de 1961-1990 e encontram-se na Figura 9



**Figura 9:** Temperatura média mensal e média de 30 anos de dados (1961-1990) (a) e precipitação mensal acumulada e média de 30 anos de dados (1961-1990) (b) em Brasília, DF.

Constatou-se que nos anos de avaliação do experimento os dados de temperatura não apresentaram nenhum evento climático atípico, ou seja, seguiram a mesma tendência de comportamento da normal climatológica. Já para os dados de precipitação observou-se uma leve variação, especialmente nos meses de março e novembro em ambos anos avaliados. Nestes meses houve uma quantidade maior de precipitação quando comparados aos dados da normal climatológica (Figura 10). Isto pode ter favorecido o bom desenvolvimento inicial dos indivíduos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* no estudo como relatado anteriormente

### 3.2. ANÁLISE GEOESTÍSTICA

Os parâmetros e gráficos dos modelos de semivariogramas das variáveis altura total (Ht) e diâmetro (DAP) encontram-se na Tabela 5 e Apêndice A e B respectivamente. Verifica-se que tanto a Ht quanto o DAP apresentaram efeito pepita puro, ou seja ausência de dependência espacial (Tabela 5). Comumente quando isto ocorre sugere-se que a continuidade espacial da variável estudada, caso exista, está ocorrendo em uma distância

inferior ao do menor espaçamento entre as amostras aplicado no estudo (RODRIGUES, et al., 2012; AQUINO, 2013; AQUINO, et al., 2014).

No presente trabalho o menor espaçamento é de 0,50 m<sup>2</sup>, uma distância que pode ser considerada pequena para as variáveis em estudo, portanto pode-se inferir que tanto a altura total quanto o DAP possuem distribuição aleatória na área experimental. Resultados semelhantes foram observados por Oda (2005) ao avaliar métodos geoestatísticos para identificação da dependência espacial na análise de dados de volume de *Eucalyptus dunnii* provenientes de um experimento em delineamento sistemático tipo “Leque”. A autora observou que a dependência espacial foi considerada fraca o que não justificaria considerá-la com aplicação de um modelo geoestatístico. Deste modo a ausência de dependência espacial para Ht e DAP no presente estudo pode ser devido à alta homogeneidade de solo e relevo em que o experimento foi instalado, associada a erros de medida desprezíveis como relatado por Oda-Souza et al. (2008). A dependência espacial pode, também, ser dependente do fator tempo e se manifestar apenas em idades futuras.

Essa análise espacial prévia é fundamental, pois garante a confiabilidade da aplicação da estatística clássica, já que com a aleatoriedade da variável, a premissa de independência dos erros é atendida e os resultados não serão viesados.

### **3.3. TESTE DE IDENTIDADE DE MODELOS COM VARIÁVEIS *Dummy***

Na Tabela 5 é apresentado o resultado do teste de identidade de modelo, com o objetivo de verificar se as equações do modelo quadrático ajustadas para DAP e altura total (Ht) com a exclusão das plantas adjacentes à falhas e/mortas e equações incluindo tais dados são iguais ou apresentam diferença significativa. Para melhor entendimento e facilitação da discussão, optou-se por chamar os modelos que incluem os dados dos indivíduos adjacentes à falhas e mortas e os modelos com a exclusão destes de “modelo com mortas” e “modelo sem mortas” respectivamente.

Constatou-se que os resultados do teste para cada tratamento em função da idade, indicam que o valor calculado foi inferior ao valor tabelado em todas equações ajustadas tanto para DAP quanto para Ht (Tabela 5). Assim sendo, aceita-se H<sub>0</sub> a qual sugere que uma única equação pode ser utilizada para descrever o crescimento das variáveis analisadas com ou sem exclusão dos dados, ou seja, os modelos apresentaram igualdade pelo teste não diferindo estatisticamente entre si. Este resultado sugere que não há necessidade de exclusão

dos dados para análise do crescimento em DAP e altura total podendo, estes dados, serem incluídos em todas as análises estatísticas do estudo.

**Tabela 5:** Teste de identidade aplicado aos modelos completo e reduzido para o crescimento em altura total e diâmetro das árvores de eucalipto em diferentes espaçamentos, em Brasília, DF.

DAP (cm)			Altura total (m)		
P-value	Tratamento	Conclusão	P-value	Tratamento	Conclusão
0,3455 <sup>ns</sup>	1	Combinação	0,963 <sup>ns</sup>	1	Combinação
0,9741 <sup>ns</sup>	2	Combinação	0,964 <sup>ns</sup>	2	Combinação
0,8857 <sup>ns</sup>	3	Combinação	0,793 <sup>ns</sup>	3	Combinação
0,7191 <sup>ns</sup>	4	Combinação	0,677 <sup>ns</sup>	4	Combinação
0,6819 <sup>ns</sup>	5	Combinação	0,585 <sup>ns</sup>	5	Combinação
0,8518 <sup>ns</sup>	6	Combinação	0,796 <sup>ns</sup>	6	Combinação
0,2131 <sup>ns</sup>	7	Combinação	0,884 <sup>ns</sup>	7	Combinação
0,6460 <sup>ns</sup>	8	Combinação	0,897 <sup>ns</sup>	8	Combinação
0,7778 <sup>ns</sup>	9	Combinação	0,932 <sup>ns</sup>	9	Combinação
0,6140 <sup>ns</sup>	10	Combinação	0,977 <sup>ns</sup>	10	Combinação
0,6539 <sup>ns</sup>	11	Combinação	0,872 <sup>ns</sup>	11	Combinação
0,0678 <sup>ns</sup>	12	Combinação	0,487 <sup>ns</sup>	12	Combinação

<sup>ns</sup>: não significativo

Combinação: uma única equação pode ser utilizada para descrever o crescimento das variáveis analisadas

É importante lembrar que no delineamento sistemático tipo “leque” a ocorrência de uma falha ou morte faz com que os indivíduos vizinhos tenham uma área disponível diferente daquela estabelecida inicialmente e, de acordo com Nelder (1962), estes dados não podem ser inseridos na análise estatística. Compartilhando deste mesmo entendimento Gomez e De Datta (1972) com o objetivo de solucionar este problema propõem remover os dados de todas as plantas adjacentes às falhas e mortas, desde que a ocorrência destas seja pouca e aleatória.

Entretanto, a definição de mortalidade como “pouca e aleatória” pode ser um tanto subjetiva e de difícil de padronização, uma vez que o delineamento sistemático tipo “leque” pode ser empregado para análise de diversas espécies de plantas as quais podem apresentar mortalidade em diferentes frequência, idade e quantidade. Para exemplificar tal fato observa-se os seguintes estudos: Venturin et al. (2014) avaliou o desempenho silvicultural de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades e considerou

como alta taxa de mortalidade os valores entre 16,7% a 33,3% aos 48 meses. Sartório (2014) analisou o crescimento de florestas energéticas de eucalipto plantadas em diferentes densidades iniciais e considerou 20% de mortes como alta taxa de mortalidade aos 30 meses. Rosa (2013) considerou valores entre 20,05% e 39,63% nas idades de 12 a 42 meses como intensa mortalidade para *Eucalyptus dunnii* Maiden em diferentes espaçamentos de plantio. Vale ressaltar que Gomez e De Datta (1972) ao sugerirem a remoção das plantas adjacentes às falhas e mortas estudaram a influência das mesmas em uma série de experimentos de produtividade de arroz, uma cultura com características fisiológicas e desenvolvimento diferente ao de espécies florestais. Outro aspecto que deve ser considerado é que a ocorrência de mortalidade é um fenômeno que, frequentemente, ocorre de forma natural nas florestas e inclui-la como variável ou considerar os seus efeitos possibilita uma análise mais coerente do desenvolvimento do povoamento.

Apesar do exposto, a remoção de indivíduos vizinhos às falhas e mortas é uma recomendação que tem sido aplicada em alguns trabalhos que utilizam o delineamento sistemático tipo “leque” (STAPE, 1995; SANTOS, 2011). Desta forma, autores recomendam o uso de algumas análises de forma alternativa a remoção dos dados, como é o caso de Wilkinson et al. (1983) que relatam sobre o uso de análise de covariância com os dados de parcelas vizinhas. Adicionalmente, Oda-Souza et al. (2008) relatam que a inserção da co-variável planta morta, para baixos índices de mortalidade, possibilitou a utilização dos dados de plantas vizinhas às falhas ou mortas.

Assim sendo o resultado do presente estudo pode ser considerado relevante pois demonstra a possibilidade de não excluir dados (adjacentes às falhas e mortas) das análises e mesmo assim obter estimativas confiáveis. Diferente das recomendações de Wilkinson et al. (1983) e Oda-Souza et al (2008), o presente estudo não utilizou a co-variável planta morta, mas constatou pelo teste de identidade que para idade inicial (24 meses) do povoamento as plantas de eucalipto adjacentes as falhas/mortas não sofreram o efeito destas significativamente a ponto de necessitar de uma metodologia específica, como, por exemplo, a remoção dos dados ou o acréscimo de uma co-variável. Ou seja, os modelos de regressão utilizados para avaliar o comportamento das variáveis de crescimento em função do espaçamento pode ser aplicados sem a exclusão de dados. Além dos resultados apresentados na Tabela 5, observa-se no Apêndice C e D que tanto para a variável Ht quanto para o DAP as curvas geradas pelo modelo “com mortas” e o modelo “sem mortas” quase se sobrepõem, o que demonstra a semelhança entre elas. Da mesma forma a curva gerada com o modelo reduzido é praticamente idêntica as curvas obtidas por meio do modelo completo.

Vale destacar que o presente estudo apresenta resultados para um povoamento em desenvolvimento inicial (24 meses) sob as condições climáticas da região do Planalto Central do Brasil. Apesar de o teste de identidade de modelos indicar que as falhas e mortes não afetaram significativamente o desenvolvimento de suas plantas adjacentes isso não significa que o aumento da área vital não represente uma vantagem competitiva para as vizinhas remanescentes, como pôde-se observar por meio do comportamento de crescimento das plantas em cada tratamento, sendo tal fato discutido nos tópicos a seguir. Assim sendo sugere-se que nos anos seguintes seja verificado se a ocorrência das falhas e mortes continuarão a não afetar de forma significativa as plantas adjacentes a ponto de não necessitar excluí-las das análises ou aplicar alguma metodologia que as leve em consideração como, por exemplo, as sugeridas por Oda-Souza et al. (2008) e Wilkinson et al. (1983).

### 3.4. CRESCIMENTO EM ALTURA

Os diferentes espaçamentos influenciaram o crescimento em altura total (Ht) das árvores de eucalipto, observados a partir da idade de quatro meses até os 24 meses. Os resultados das estatísticas de precisão para a variável Ht e correlação linear de Pearson encontram-se na Tabela 6 e 8 respectivamente. Para melhor entendimento dos resultados os tratamentos foram distribuídos em três grupos de espaçamentos: adensados (Ad) sendo os tratamentos de 1 a 5, intermediários (In) para os tratamentos de 6 a 8 e amplos (Am) para os tratamentos de 9 a 12.

**Tabela 6:** Estatísticas descritivas para a variável altura total das árvores para cada tratamento dos quatro aos 24 meses.

Estatística	Tratamento	Área Vital (m <sup>2</sup> )	Meses					
			4	8	12	16	20	24
			Ht (m)					
Média			2,25	5,18	6,50	8,35	9,10	10,05
Máximo			2,50	5,70	7,20	9,50	11,40	12,60
Mínimo	1	0,50	1,20	2,00	5,90	6,50	6,60	7,90
C.V.%			9,85	12,33	4,60	9,37	11,91	11,33
Desvio padrão			0,221	0,639	0,297	0,782	1,085	1,139
Média			2,22	5,40	6,67	8,97	10,52	11,13
Máximo			2,50	5,95	7,85	10,00	12,40	13,45
Mínimo	2	0,77	1,80	3,30	5,85	6,70	7,20	7,20
C.V.%			6,66	8,44	4,22	8,17	11,02	12,46
Desvio padrão			0,148	0,456	0,282	0,732	1,158	1,386

**Tabela 6:** Estatísticas descritivas para a variável altura total das árvores para cada tratamento dos quatro aos 24 meses.

			(continuação)					
Média			2,04	5,43	6,71	9,43	11,30	11,92
Máximo			2,35	6,00	7,20	10,20	13,00	13,65
Mínimo	3	1,17	1,30	4,30	5,95	8,40	9,60	9,00
C.V.%			10,70	6,15	4,68	5,20	7,37	9,85
Desvio padrão			0,218	0,334	0,314	0,491	0,833	1,173
Média			1,89	5,34	6,74	10,14	12,02	12,48
Máximo			2,10	5,90	7,35	10,80	13,55	14,30
Mínimo	4	1,76	1,40	4,90	5,80	9,30	10,50	4,70
C.V.%			9,65	5,99	6,44	3,96	6,32	16,94
Desvio padrão			0,158	0,320	0,434	0,401	0,760	2,115
Média			1,65	4,77	6,45	10,10	12,22	13,40
Máximo			2,00	5,75	7,50	11,40	14,00	15,00
Mínimo	5	2,64	0,40	2,50	4,40	7,50	8,70	10,00
C.V.%			23,08	14,92	12,51	9,61	9,89	8,44
Desvio padrão			0,381	0,711	0,807	0,970	1,209	1,131
Média			1,61	4,33	6,35	10,32	12,76	13,47
Máximo			1,95	5,10	7,30	11,50	14,00	15,00
Mínimo	6	3,94	0,90	0,50	5,25	9,40	11,00	4,70
C.V.%			15,70	18,29	8,53	5,35	5,53	17,25
Desvio padrão			0,253	0,792	0,542	0,553	0,705	2,324
Média			1,59	4,19	6,08	9,87	12,87	13,95
Máximo			2,00	4,75	6,80	10,80	14,20	15,13
Mínimo	7	5,86	0,75	3,10	5,10	8,80	11,90	12,50
C.V.%			16,59	8,23	7,42	5,71	4,57	4,47
Desvio padrão			0,263	0,345	0,451	0,563	0,587	0,624
Média			1,55	3,95	5,62	9,10	12,33	13,44
Máximo			2,00	4,60	6,45	10,20	13,80	14,60
Mínimo	8	8,69	0,70	2,90	3,10	6,00	8,00	10,00
C.V.%			16,44	8,22	10,69	8,17	8,55	7,68
Desvio padrão			0,255	0,325	0,601	0,744	1,054	1,032
Média			1,40	3,45	5,16	8,50	11,59	12,76
Máximo			1,80	4,20	6,20	9,65	13,20	14,12
Mínimo	9	12,86	0,35	1,10	3,40	7,00	9,90	11,90
C.V.%			23,13	18,48	10,55	6,88	6,86	4,87
Desvio padrão			0,325	0,638	0,545	0,584	0,795	0,622
Média			1,46	3,40	5,10	8,24	11,06	11,83
Máximo			1,85	4,40	5,90	9,10	12,50	13,00
Mínimo	10	19,00	0,75	1,60	3,70	7,40	9,00	10,80
C.V.%			15,44	16,79	10,22	5,88	7,25	4,20
Desvio padrão			0,226	0,571	0,521	0,485	0,802	0,497
Média			1,44	3,42	4,97	7,85	10,49	11,19
Máximo			1,95	4,25	6,00	9,00	11,80	12,60
Mínimo	11	28,01	0,40	2,30	4,00	6,90	9,40	10,60
C.V.%			24,42	12,76	9,15	6,71	6,74	4,55
Desvio padrão			0,353	0,436	0,455	0,527	0,707	0,509
Média			1,30	3,06	4,60	7,42	9,60	10,24
Máximo			1,85	4,00	5,55	8,50	10,95	11,50
Mínimo	12	41,25	0,70	1,60	2,45	5,00	6,70	8,50
C.V.%			24,14	18,03	13,59	9,55	8,60	7,62
Desvio padrão			0,314	0,553	0,624	0,708	0,826	0,781

De acordo com a Tabela 6 os Tratamentos 11 e 12 (28,03 e 41,25 m<sup>2</sup>) apresentaram os maiores valores de C.V.% sendo 24,42% e 24,14% respectivamente, seguidos do Tratamento 9 (12,86 m<sup>2</sup>) com 23,13% e do Tratamento 5 (2,64 m<sup>2</sup>) com 23,08%, todos na

idade de 4 meses. É possível que os valores de *C.V.%* mais elevados para os tratamentos de maior área vital podem ser devido a redução da uniformidade do crescimento devido à falta de competição intraespecífica e aumento da matocompetição a qual pode afetar o crescimento em altura (TOLEDO et al. 2000). De uma forma geral o crescimento em altura apresentou valores de *C.V.%* menores quando comparados ao crescimento em DAP (item “4.4”). Observou-se, também, que com o decorrer do tempo de avaliação a dispersão dos resultados de Ht foi diminuindo para os tratamentos intermediários 7 e 8 (5,86 e 8,69 m<sup>2</sup>) e para os tratamentos amplos (12,86 a 41,25 m<sup>2</sup>).

Constatou-se que o espaçamento influenciou o crescimento em altura mais fortemente na idade de 12 meses, sendo que as maiores médias de altura foram encontradas nos tratamentos Ad com destaque para o tratamento 4 (1,76 m<sup>2</sup>) que apresentou a maior altura total média (Tabela 6). Esta forte tendência inversa de crescimento de altura em função da área vital também foi confirmada pelo valor de *r* dado pela correlação linear de Pearson (Tabela 7).

**Tabela 7:** Valores dos coeficientes de correlação linear de Pearson (*R*) entre a variável altura total e as variáveis área vital disponível em cada tratamento e DAP nas idades de 4 e 24 meses.

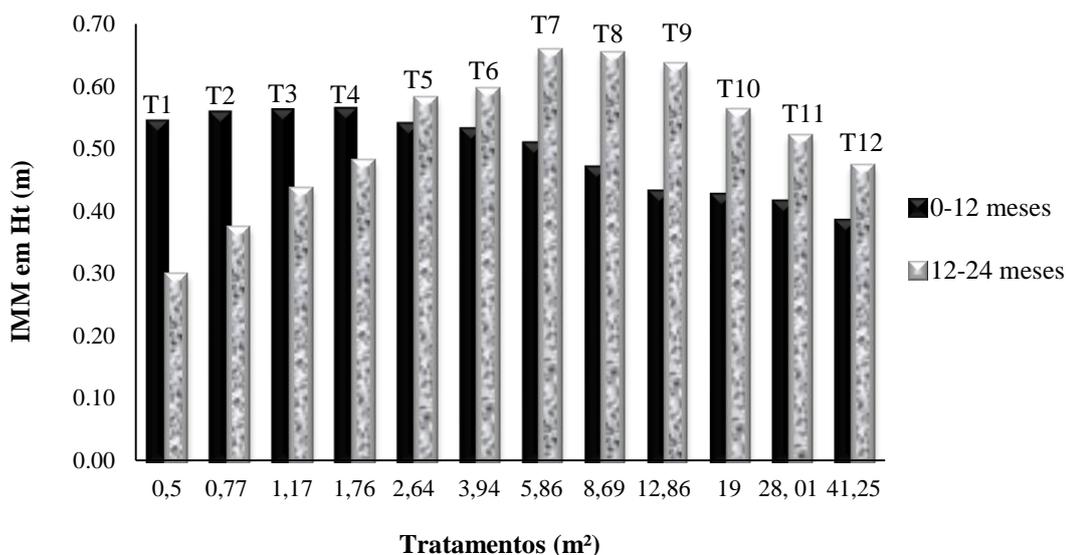
Idade/meses	<i>R</i>	
	Ht x Área	Ht x DAP
4	-0,552*	-
8	-0,716*	0,725*
12	-0,760*	0,241*
16	-0,634*	0,109*
20	-0,328*	0,471*
24	-0,294*	0,494*

ns = não significativo; \* = Significativo a 5%.

Aos 12 meses de idade é observado o declínio das médias da velocidade do crescimento para os indivíduos submetidos aos Ad, In e Am respectivamente. Estes resultados demonstram que os espaçamentos adensados (Ad) induziram a um rápido incremento em altura, atribuído a precoce competição por recursos (luz, água, nutrientes etc.) a que foram submetidos. Observou-se por meio dos baixos valores do coeficiente de variação (*C.V.%*) que aos 12 meses os tratamentos mais adensados apresentaram maior uniformidade de altura, ou seja, menor dispersão dos resultados em relação à média (Tabela 6).

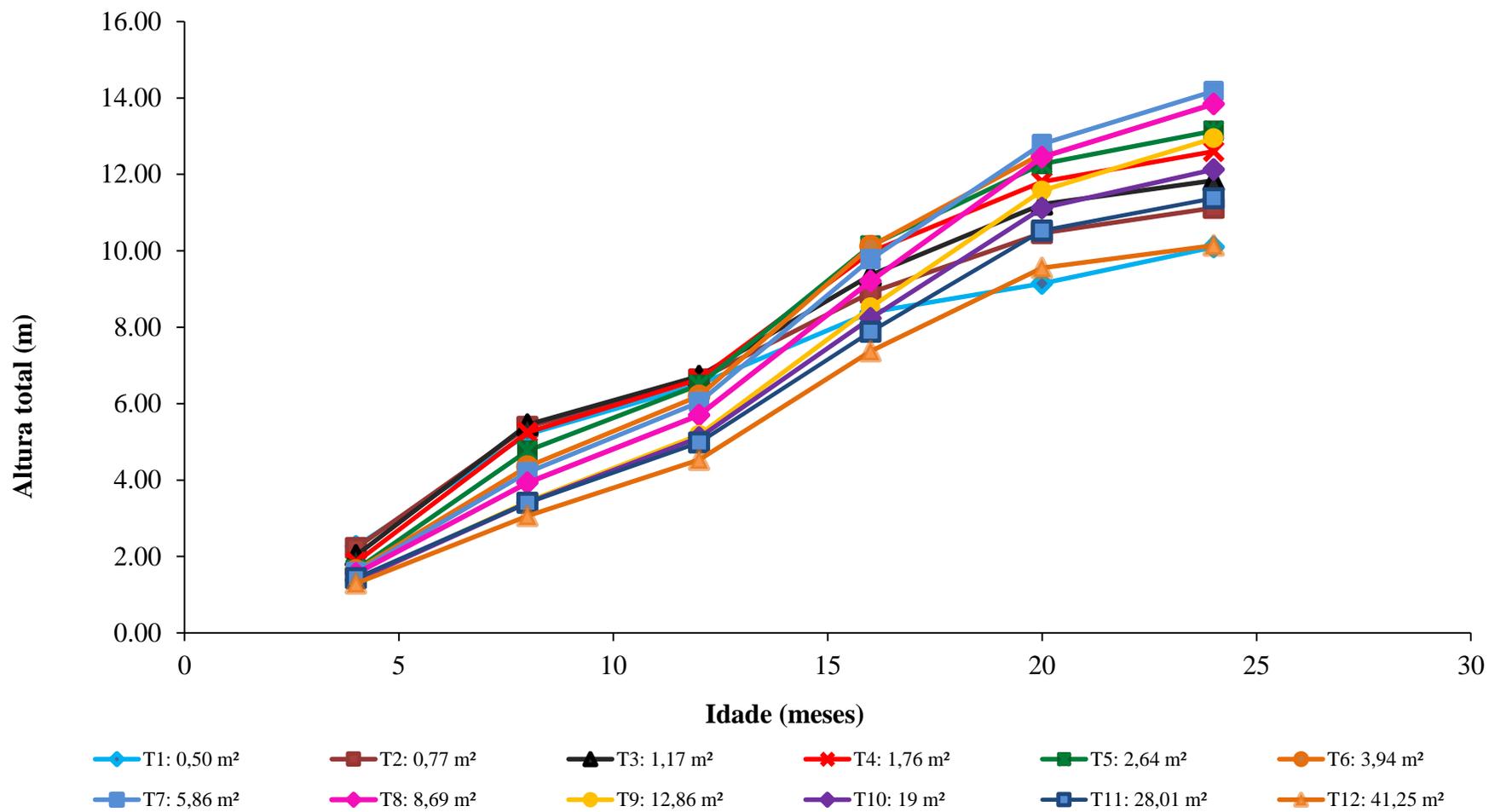
Entretanto, aos 24 meses ocorreu uma tendência inversa, ou seja os espaçamentos adensados (0,50 a 2,64 m<sup>2</sup>) apresentaram valores de *C.V%* muito mais elevados que os tratamentos intermediários e amplos. Esse comportamento pode estar associado ao aumento de plantas suprimidas e da elevada taxa de mortalidade ocorrida no Tratamento 1 (0,50 m<sup>2</sup>) (Tabela 4), o que é uma característica de plantios adensados (ALBER, 1980; CRECHI, 1996; SARTÓRIO, 2014) devido a competição. A intensificação da competição pelos recursos vitais, em que os plantios com menor espaçamento atingem a capacidade de sitio mais rapidamente, com a diminuição das dimensões dos produtos obtidos (ASSMANN, 1970), que passa a impor maior pressão de sobrevivência, diferencia o povoamento em estratos de altura de copa passando a ter indivíduos de classes de copa dominante, intermediária e dominada. Adicionalmente segundo Schneider et al. (2015), a maioria das espécies de *Eucalyptus* é intolerante à competição, ocorrendo uma rápida segregação em estratos, dependente do espaçamento, espécie, qualidade do sítio e interação entre estes fatores. Tanto a supressão quanto a mortalidade causam mudanças na área vital disponível para as plantas adjacentes de forma que estas são favorecidas pelo maior espaço disponível e consequentemente a apresentam melhor desenvolvimento ocasionando maior desuniformidade no crescimento podendo assim elevar os valores de *C.V.%*.

A evolução do crescimento da Ht ao longo do tempo (4 aos 24 meses) é apresentado nas Figuras 10 e 11.



**Figura 10:** Incremento médio mensal (IMM em altura total (Ht) das árvores nos diferentes espaçamentos ao longo do tempo

Notou-se que a partir da idade de 12 meses a correlação entre a área vital e o incremento em altura diminuiu gradativamente a cada avaliação, apresentando aos 24 meses um baixíssimo valor de  $r$ , porém significativo (Tabela 7). Corroborando com este resultado, verifica-se na Figura 10 que dos 12 aos 24 ocorreu maior incremento em altura nos tratamentos intermediários, com destaque para o tratamento 7 (5,86 m<sup>2</sup>), conferindo a estes tratamentos o melhor desenvolvimento inicial, o que também foi confirmado pelas maiores médias (Tabela 6). Vale ressaltar que os dois tratamentos extremos (0,50 e 41,25 m<sup>2</sup>) aos 24 meses apresentaram os menores valores de incrementos médios em altura. Isto sugere que para o tratamento 1 o adensamento contribuiu para a redução da velocidade de crescimento em altura aos 24 meses, devido a extrema competição a que foram submetidos os indivíduos. Para o tratamento 12 (41,25 m<sup>2</sup>) foi a ausência de competição por recursos que não estimula o crescimento em altura em comparação aos demais tratamentos.



**Figura 11:** Incremento médio mensal (IMM) da Altura total (Ht) das árvores nos diferentes espaçamentos ao longo do tempo.

### 3.4.1. Ajuste e validação dos modelos de regressão para a variável altura total (Ht)

Com o intuito de melhor compreender o comportamento das variáveis avaliadas (Ht, DAP e Volume) em função do espaçamento, utilizou-se análises de regressão conforme proposto por Nelder (1962). Os dados das plantas vizinhas às falhas e mortas não foram removidos do banco de dados utilizados para o ajuste dos modelos de regressão devido aos resultados apresentados no item “4.3”. Na Tabela 8 são apresentadas as medidas de precisão e os coeficientes dos quatro modelos ajustados para as variável Ht dos quatro aos 24 meses.

**Tabela 8:** Estatísticas de precisão e coeficientes dos quatro modelos ajustados para altura total (m) das árvores do híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* avaliadas dos até 24 meses de idade.

Meses	Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$S_{xy}$	C.V.%	R
4	1	1,926514	-0,013759	-	-	0,394	20,35	0,58
	2	1,398609	-0,450332	0,310595	-	0,284	16,79	0,74
	3	2,852078	1,589848	1,153713	0,001813	0,282	16,66	0,74
	4	2,174306*	-0,132196*	0,006345*	-8,89E-05*	0,297	17,58	0,71
8	1	5,054138	-0,016876	-	-	0,662	15,28	0,74
	2	3,139603	-0,447972	0,098233	-	0,554	12,67	0,83
	3	5,728610	0,374178	0,153531	-0,000439	0,564	12,97	0,83
	4	5,553635*	-0,293892*	0,012418*	-1,64E-04*	0,546	12,61	0,83
12	1	6,544875	-0,010688	-	-	0,619	10,48	0,75
	2	4,384956	-0,357050	0,049219	-	0,585	9,90	0,78
	3	6,820842	0,155834	0,050464	-0,000117	0,585	9,91	0,78
	4	6,83165*	-0,181722*	0,006223*	-7,66E-05*	0,582	9,86	0,78
16	1	9,614444	-0,006627	-	-	0,927	10,28	0,60
	2	0,289247	-0,969978	0,000230	-	0,929	10,32	0,60
	3	-3754099,1	36278987	3427702,1	42603,886	0,795	8,84	0,73
	4	9,300249*	0,090143*	-0,0103583*	1,72E-04*	0,896	9,96	0,63
20	1	11,684538	-0,003242	-	-	1,480	13,09	0,29
	2	11,632546	1,431339	3,315592	-	1,373	12,13	0,46
	3	0,285521	53,081533	3,825315	0,043163	1,071	9,48	0,72
	4	10,516869*	0,447994*	-0,028448*	4,15E-04*	1,268	11,21	0,57
24	1	12,762924	-0,003487	-	-	1,649	13,40	0,30
	2	12,705924	0,784184	2,199663	-	1,556	12,64	0,44
	3	7,301870	15,216226	0,934445	1,42E-02	1,141	9,27	0,75
	4	11,220832*	0,580646*	-0,036138*	5,22E-04*	1,317	10,70	0,65

Em que: 1 = Exponencial; 2 = Logístico; 3 = Função racional; 4 = Polinomial.  $B_i$  = parâmetros da equação;  $S_{xy}$  = Erro padrão; C.V.% = Coeficiente de Variação e R = Coeficiente de Correlação

\* Significativo a 5% de probabilidade

Os melhores ajustes foram obtidos aos oito e 12 meses, com destaque para o modelo 4 (modelo polinomial) o qual apresentou os menores valores para erro padrão ( $S_{xy}$ ) e coeficiente de variação (C.V.%). A partir dos 16 meses observou-se uma redução na qualidade dos ajustes e aos 20 e 24 meses constatou-se que a qualidade dos ajustes foi inferior quando comparado as idades anteriores. Diante disso, a seleção dos modelos para o

processo de validação nas idades avaliadas foi baseada nos maiores valores do  $R$ ,  $S_{xy}$  e distribuição gráfica dos resíduos percentuais.

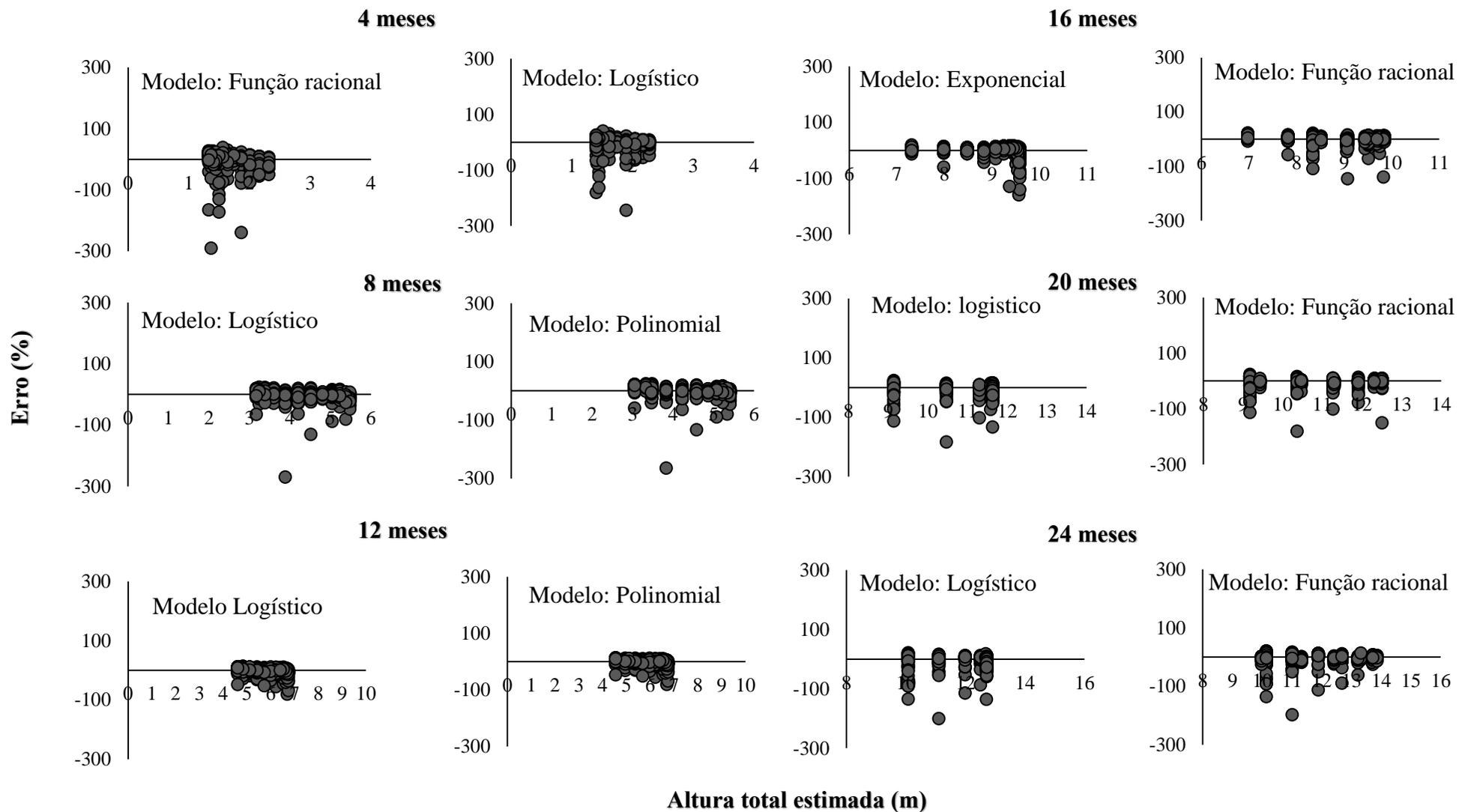
Na Tabela 9 e na Figura 12 encontram-se as medidas de precisão obtidas na validação das equações selecionadas e a distribuição gráfica dos resíduos percentuais respectivamente. O desempenho dos modelos no processo de validação foi ligeiramente inferior quando comparadas as estatísticas de precisão obtidas nos ajustes. Apesar disto, é possível observar que os dados dos modelos ajustados apresentam um padrão comportamento semelhante aos modelos validados, em que as idades oito e 12 mantiveram-se como as que apresentam as equações de melhor desempenho.

**Tabela 9:** Estatísticas de precisão das equações ajustadas para a variável altura total em função da área vital dos quatro aos 24 meses selecionadas para a validação.

Meses	Modelo	$S_{xy}$	$C.V. \%$	$R$	$AIC$
Altura Total (m)					
4	Logístico	0,31	17,74	0,66	10,71
	Função racional	0,31	17,81	0,65	12,70
8	Logístico	0,571	13,31	0,79	8,26
	Polinomial	0,578	13,48	0,79	10,21
12	Logístico	0,640	11,19	0,73	7,34
	Polinomial	0,640	11,19	0,73	9,80
16	Exponencial	1,050	11,59	0,45	3,44
	Função racional	1,019	11,24	0,60	7,94
20	Logístico	1,742	15,84	0,43	4,35
	Função racional	1,385	12,60	0,72	7,23
24	Logístico	2,042	17,11	0,43	3,71
	Função racional	1,595	13,37	0,73	6,70

Em que:  $S_{xy}$  = Erro padrão;  $C.V. \%$  = Coeficiente de Variação e  $R$  = Coeficiente de correlação;  $AIC$  = Critério de informação de Akaike.

Na fase inicial de crescimento (quatro meses) observa-se que os modelos que melhor se ajustaram aos dados foram: função racional e logístico. Nesta mesma idade, verifica-se por meio das estatísticas de precisão, que a o modelo logístico se mostrou moderadamente superior ao modelo função racional. Contudo, na avaliação gráfica dos resíduos percentuais (Figura 12) os dois modelos foram muito semelhantes, ambos com presença de *outliers*, porém com tendência a homocedasticidade. Vale ressaltar que na Figura 12 a presença de *outliers* não ocorre apenas aos quatro meses, mas em todas as idades. No entanto, os valores que não correspondiam a tendência geral dos dados foram mantidos com o intuito de verificar a capacidade dos modelos em estimar valores extremos, uma vez que estes não advieram de erros de medição.



**Figura 12:** Distribuição gráfica dos resíduos da variável altura total para os modelos validados dos quatro aos 24 meses.

Nota-se que o modelo polinomial foi selecionado para validação aos oito e 12 meses. Tal seleção ocorreu devido ao seu bom desempenho no ajuste das equações considerando as estatísticas de precisão (Tabela 8). Entretanto, Batista et al. (2001) em seu trabalho sobre desempenho de modelos de relações hipsométricas relata que modelos polinomiais possuem pouco ou nenhum significado biológico quando aplicado a curvas de crescimento, porém são comumente utilizados devido a facilidade do seu ajuste. Neste sentido, é importante considerar não usar o modelo polinomial para o estudo de crescimento em altura de árvores, apesar das medidas de precisão apresentarem resultados satisfatórios.

O modelo logístico foi selecionado para validação praticamente em todas as idades, exceto aos 16 meses. Aos quatro, oito e 12 meses a função logística se mostrou superior em todas as medidas de precisão, apresentando baixos valores de  $S_{xy}$  e  $C.V.\%$  e maiores valores de  $R$ . Este modelo, apesar de ter sido inicialmente proposto para estudo de crescimento em populações humanas (KINGSLAND, 1985 apud BATISTA et al., 2001), tem sido amplamente utilizado em estudo de crescimento de espécies florestais (LEITE et al., 2006; CARVALHO et al., 2011; SALLES et al., 2012; MILANI et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015). É importante destacar que o fato do modelo logístico ter apresentado um melhor desempenho deve-se a um padrão sigmoide do crescimento em altura em função do espaçamento. Corroborando com isto, Vendruscolo et al. (2017) também verificaram resultados satisfatórios na estimativa da altura total de árvores de teca em diferentes espaçamentos utilizando modelos sigmoidais, entre eles a função logística.

Com relação a análise gráfica dos resíduos percentuais (Figura 12) o modelo logístico não apresentou diferença expressiva, mas um comportamento muito semelhante aos modelos em comparação (função racional e polinomial). Ambos gráficos apresentaram comportamento com tendência a homocedasticidade, apesar da presença de *outliers*. Entretanto, o modelo logístico deve ser preferido por ser consistente.

O modelo logístico é considerado um modelo consistente pois apresenta significado biológico, em que o parâmetro beta é o valor médio máximo da variável resposta, ou seja, representa a assíntota para a equação (REGAZZI, 2003; CARVALHO et al, 2011). É interessante que o modelo tenha um poder explicativo biológico o que deve ser considerado na escolha do mesmo, não apenas baseando-se em parâmetros de seleção meramente estatísticos. Adicionalmente Navarro e Myung (2004) relatam que há diversos fatores a ser levados em consideração quando se avalia um modelo, como por exemplo métodos estatísticos e capacidade de generabilidade (ferramentas utilizadas no presente estudo), como também avaliar a qualidade de um modelo baseando-se na sua interpretabilidade e

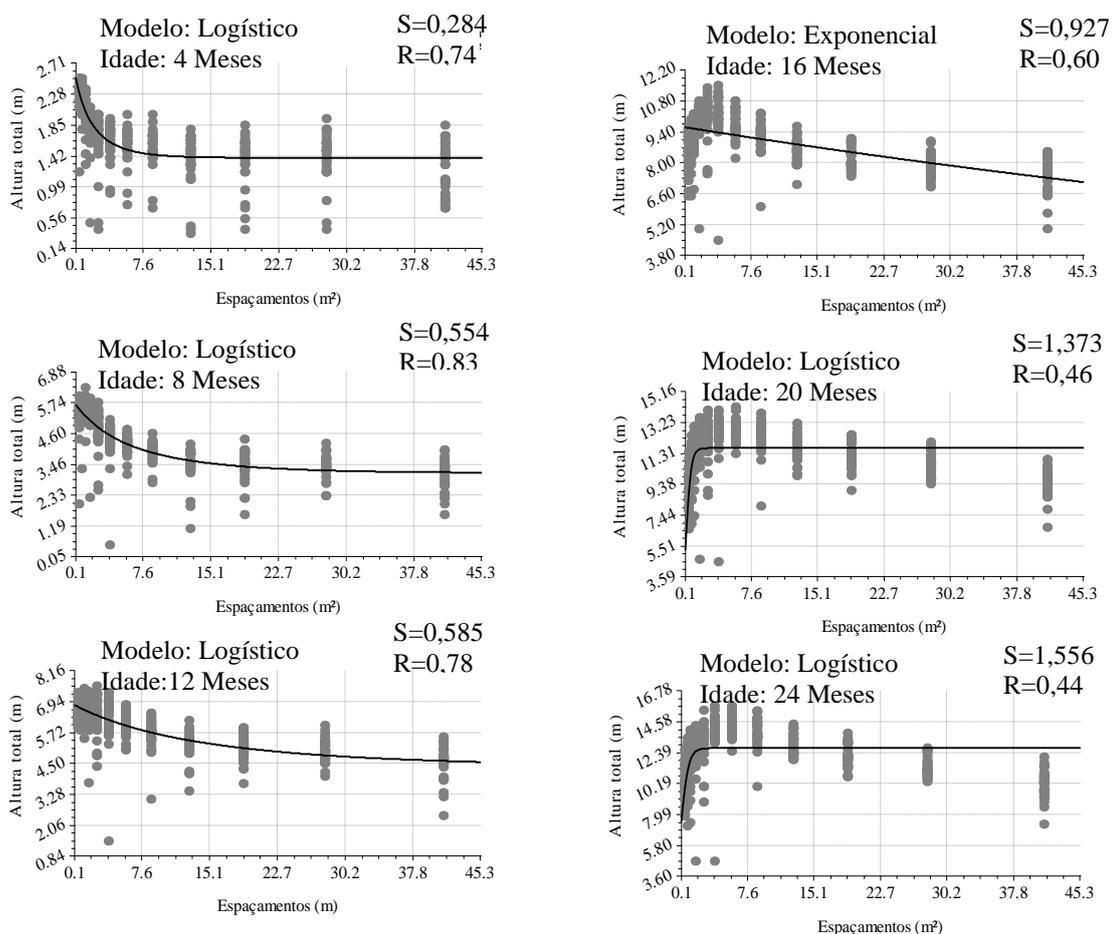
consistência, fazendo uso muitas vezes de julgamentos subjetivos mas não menos importantes.

O modelo função racional mostrou um bom desempenho no processo de validação em todas as idades nas quais foi selecionado (4, 16, 20 e 24 meses). A função racional é um modelo convexo e não é comumente empregado para o ajuste de dados crescimento em altura de plantas. Na modelagem de dados ecológicos este modelo é mais utilizado em estudos envolvendo técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto como os trabalhos de Santos (2006), Lamonaca et al. (2008) e Forzieri (2012). Citam-se alguns trabalhos como os de Flather (1996) e Tjørve (2003), em que os autores avaliaram a função racional na modelagem de curva espécie-área. Já Singh et al. (2014) em seu estudo sobre modelagem do crescimento em altura de plantas de eucalipto para uso de biodrenagem, constataram que a função racional não apresentou bom desempenho no ajuste de dados de altura em função da idade. Apesar disto, este modelo apresentou resultados satisfatórios para o ajuste da variável altura total em função da área vital no presente estudo, como se verifica pelos resultados das medidas de precisão obtidas no processo de validação (Tabela 9) e pela distribuição gráfica dos resíduos percentuais (Figura 12). Contudo para idade de 16 meses o modelo exponencial se mostrou superior ao modelo função racional devido ao baixo valor de *AIC* (*Critério de informação de Akaike*)

Neste sentido, por meio dos resultados das medidas de precisão a análise gráfica dos resíduos percentuais apresentadas na validação, verifica-se que os modelos função racional e logístico apresentaram desempenho ligeiramente superior aos demais. Entretanto o modelo selecionado para a representação gráfica do comportamento da variável altura total (exceto aos 16 meses) em função do espaçamento foi o modelo logístico, pois além do bom desempenho e de possuir significado biológico em seus parâmetros, o mesmo apresentou os menores valores do *Critério de informação de Akaike (AIC)* indicando ser o modelo mais parcimonioso para os dados em questão. Os 16 meses o modelo selecionado como de melhor desempenho foi o modelo exponencial devido ao baixo valor de *AIC*. Neste sentido estes modelos foram considerados mais adequados para avaliação das variações de Ht no presente estudo. Portanto, segue-se adiante a discussão dos resultados dos ajustes do modelo logístico e exponencial nas idades: 4, 8, 12, 20-24 e 16 respectivamente. Portanto a Figura 13 é apresentado a altura total nas idades avaliadas em função da área vital dos tratamentos e representação gráfica do modelos ajustados anteriormente citados.

O valor de *R* (Tabela 8) encontrado dos 4 aos 12 (0,74; 0,83 e 0,78) e dos 16 aos 24 meses (0,60; 0,46 e 0,44) demonstrou haver nos primeiros meses uma forte correlação entre

os dados observados e estimados e a partir dos 16 meses uma correlação moderada entre os mesmos. Essa correlação (forte e moderada) encontrada nos ajustes dos modelos indicam que o espaçamento influenciou o incremento em altura total no presente estudo. Tais resultados foram satisfatórios e de uma forma geral corroboram com diversos estudos que relatam a influência do espaçamento na velocidade de crescimento em altura total em espécies florestais (ELOY et al., 2012; LELES et al., 2014; VENTURIN et al., 2014). Na Figura 13, observa-se nitidamente que nas idades de 4, 8 e 12 meses que os menores espaçamentos propiciaram um maior crescimento em altura, porém nota-se também que a curva torna-se cada vez menos acentuada indicando que com o passar da idade o comportamento da variável vai mudando em relação aos diferentes espaçamentos. A partir da idade de 16 meses verifica-se pela representação gráfica dos modelos avaliados que o maior incremento em altura é observado nos espaçamentos intermediários (Figura 13).



**Figura 13:** Altura total (m) aos 4, 8, 12, 16, 20 e 24 meses em função da área vital dos tratamentos e representação gráfica do modelo logístico.

De uma forma geral para os espaçamentos usuais (3 x 2 m, 3 x 1,5 m, 3 x 3 m), em plantios de espécies florestais, a variável altura total é pouco ou nada afetada. O que também ocorreu neste estudo, pois os tratamentos intermediários (3,94, 5,86, 8,69 m<sup>2</sup>), os quais possuem área vital semelhante aos dos espaçamentos usuais (2 x 2; 2 x 3 e 3 x 3), tiveram pouca variação na altura total média (Tabela 6). Reiner et al. (2011) avaliando a dinâmica de crescimento de *Eucalyptus dunnii* em diferentes espaçamentos dentre eles alguns considerados usuais (3 x 3 m, 3 x 2 m, 2 x 2 m e 1,5 x 1,5 m) observaram que altura de plantas não mostrou diferença significativa entre eles aos 12 e 24 meses.

### 3.5. CRESCIMENTO EM DIÂMETRO (DAP)

Assim como para o crescimento em Ht os diferentes espaçamentos influenciaram o crescimento em DAP das árvores de eucalipto, observados a partir dos oito até os 24 meses após o plantio. Os resultados das estatísticas de precisão para a variável DAP encontram-se na Tabela 10.

**Tabela 10:** Estatísticas descritivas para a variável DAP das árvores para cada tratamento dos quatro aos 24 meses.

Estatística	Tratamento	Área Vital (m <sup>2</sup> )	Meses				
			8	12	16	20	24
DAP							
Média			2,6	3,1	3,7	3,9	4,1
Máximo			3,3	3,8	4,9	5,2	5,2
Mínimo			2,0	2,3	2,7	2,7	3,5
q			2,6	3,1	3,8	4,0	4,1
C.V.%			20,39	10,76	15,04	15,55	10,52
Desvio padrão			0,524	0,330	0,562	0,607	0,434
Média	2	0,77	3	3,6	4,7	5,3	5,4
Máximo			3,5	4,0	5,9	6,7	7,1
Mínimo			2,3	2,8	3,2	3,2	3,2
q			3,0	3,6	4,7	5,4	5,5
C.V.%			10,91	8,75	12,76	17,48	19,00
Desvio padrão			10,56	0,310	0,597	0,925	1,025
Média	3	1,17	3,2	4,0	5,4	6,1	6,5
Máximo			3,9	4,5	6,4	7,3	8,3
Mínimo			2,1	3,1	4,0	4,0	4,3
q			3,2	4,0	5,4	6,2	6,6
C.V.%			12,43	8,41	11,37	13,27	17,34
Desvio padrão			0,393	0,335	0,611	0,810	1,121
Média	4	1,76	3,4	4,4	6,1	7,1	7,1
Máximo			3,9	4,9	7,1	8,4	8,3
Mínimo			2,9	3,6	4,2	5,4	1,9
q			3,4	4,4	6,1	7,2	7,3
C.V.%			7,81	6,99	8,61	7,93	21,46
Desvio padrão			0,280	0,305	0,527	0,566	1,525



Assim, como para a variável altura total, o tratamento de maior área vital proporcionou os maiores valores de *C.V.%* para o DAP. Este comportamento pode ser devido a matocompetição a qual indivíduos submetidos a espaçamentos maiores estão mais sujeitos, podendo causar desuniformidade. Corroborando com isto, Zen (1987) relata efeitos significativos da matocompetição em algumas espécies de eucalipto. Adicionalmente, Toledo et al. (2000) verificou que o crescimento inicial tanto em diâmetro quanto em altura de plantas de eucalipto podem ser afetados pela presença das plantas infestantes. Estes autores verificaram também que o diâmetro foi mais afetado pela presença das plantas daninhas do que a altura das plantas de eucalipto o que poderia explicar o maiores valores de *C.V.%* no maior espaçamento do que encontrados para altura no presente estudo. Vale ressaltar que no presente trabalho pôde-se observar a presença de plantas infestante como *Brachiaria decumbens* contudo tal fato não foi avaliado. Santos (2011) também observou valores de *C.V.%* elevados para alguns tratamentos testados em seu estudo de espaçamento com *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*.

Na idade de 8 meses observou-se que o crescimento em DAP foi maior nos espaçamentos adensados e intermediários. Estes resultados se diferem do que normalmente é encontrado em estudos de espaçamentos (Oliveira Neto et al., 2010; Reiner et al., 2011; Benin et al., 2014). Contudo, é importante ressaltar que este comportamento pode ter ocorrido pelo fator idade (8 meses) na qual a competição entre plantas dos espaçamentos adensados e intermediários não fora suficiente para reduzir o incremento em DAP assim como a quantidade elevada de recursos disponíveis para as plantas dos espaçamentos amplos favoreceram o lento crescimento das mesmas. Na idade de 12 meses é observado que o crescimento apresentou resposta proporcional ao espaçamento, ou seja quanto maior a área vital disponível maior o DAP, destacando-se o tratamento 7 (5,86 m<sup>2</sup>) com a maior média (Tabela 10).

Aos 16, 20 e 24 meses as médias de DAP apresentaram claramente uma resposta proporcional ao espaçamento, com destaque para os tratamentos amplos 10 e 11 (19,00 e 28,03 m<sup>2</sup>) aos 24 meses. Esta forte tendência proporcional de crescimento em DAP em função da área vital também foi confirmada pelo valor de *R* dado pela correlação linear de Pearson (Tabela 11).

**Tabela 12:** Valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre a variável DAP e a variável área vital disponível em cada tratamento na idade de 8 e 24 meses.

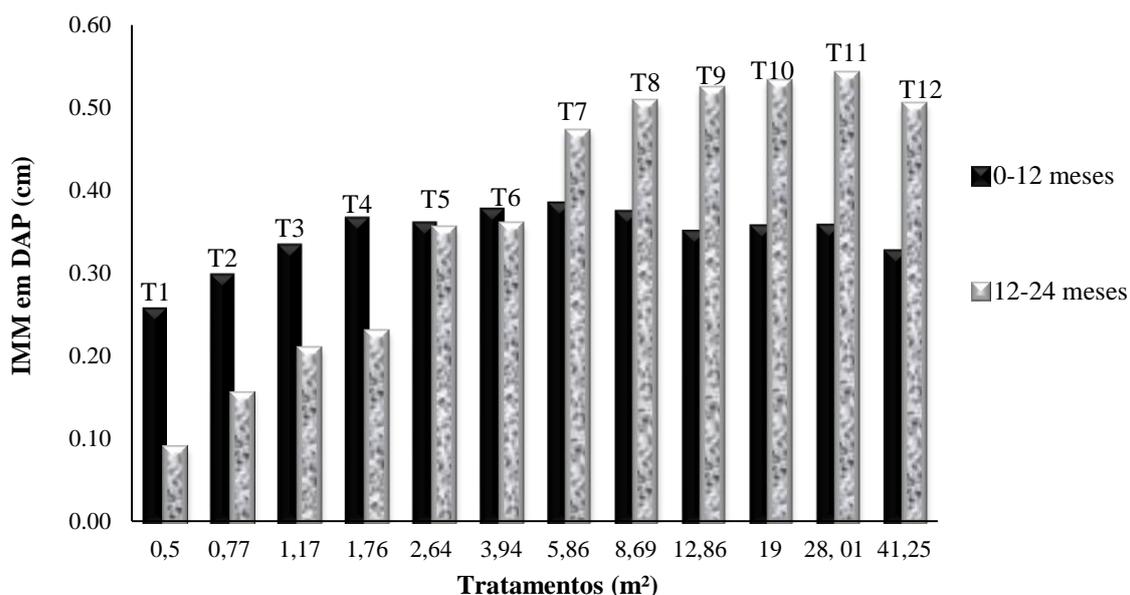
Idade/meses	<i>R</i>	<i>R</i>
	DAP x Área	H x DAP
4**	-	-
8	-0,445*	0,725*
12	0,056 <sup>ns</sup>	0,241*
16	0,475*	0,109*
20	0,544*	0,471*
24	0,548*	0,494*

ns = não significativo; \* = Significativo a 5%.; \*\* O variável DAP foi coletada a partir de oito meses de idade.

Observou-se que o tratamento de maior espaçamento (41,25 m<sup>2</sup>) apresentou média de DAP inferior à de alguns espaçamentos intermediários (Tabela 10). Em virtude disso, cabe ressaltar que se o espaçamento for tão grande a ponto que os recursos disponíveis excedam a capacidade fisiológica de assimilação da planta, não haverá aumento de diâmetro, tornando a área subutilizada. O que pode explicar o fato de que neste estudo alguns tratamentos adensados, tais como o tratamento 4 e 3 (1,76 e 2,64 m<sup>2</sup>) apresentaram maior DAP médio quando comparados ao tratamento mais amplo (41,25 m<sup>2</sup>). Contudo, deve-se levar em consideração que os resultados do presente estudo é para dados de crescimento inicial de forma que não se pode afirmar que o maior espaçamento testado causará subutilização da área em idades futuras. De uma forma geral, os resultados estão em concordância com o que é relatado em outros estudos, ou seja, espaçamentos de plantio mais amplos induzem um rápido crescimento em diâmetro das plantas nos primeiros anos, quando comparadas com plantas de plantios adensados (CLUTTER, 1983; CARDOSO, 1989; ALCORN et al., 2007; REINER et al., 2011; BENIN et al., 2014).

Nas Figuras 14 e 15 é demonstrada a evolução do crescimento do DAP ao longo do tempo (8 aos 24 meses). Na Figura 14 é mostrado o incremento médio mensal (IMM) do DAP de cada tratamento ao longo do período de acompanhamento, onde observa-se, claramente, a partir dos 12 meses o efeito proporcional do aumento da área vital sobre o crescimento em diâmetro das plantas, confirmando os resultados apresentados na Tabela 10. Reiner et al. (2011) relatam terem observado este efeito proporcional (área vital-DAP) em árvores de *Eucalyptus dunnii* apenas a partir dos três anos de idade. No presente estudo este efeito proporcional foi observado logo nos primeiros meses e mais claramente a partir dos 16 meses (Tabela 10, 12 e Figura 14). Vale ressaltar que esta verificação precoce do efeito do espaçamento no incremento em DAP pode estar relacionada a amplitude de espaçamentos

testados o que pode ter favorecido a captação deste comportamento tão precocemente. Isto destaca a eficiência do delineamento sistemático tipo “leque”, pois por meio deste pôde-se observar o mencionado comportamento em um espaço temporal (12 meses) e físico (área experimental = 0,62 hectares) reduzidos. Outro fator que pode ter levado a constatação precoce do efeito do espaçamento sobre o crescimento em DAP é a frequência da coleta de dados, a qual foi realizada a cada quatro meses, distinguindo-se da maioria dos estudos de espaçamentos florestais que em geral ocorre uma vez por ano ou em um intervalo de tempo maior como feito por: Reiner et al. (2011), Araújo et al. (2012), Leles et al. (2014), Venturin et al. (2014) entre outros. Corroborando com isto, Benomar e Des Rochers (2012) ao estudarem a influência do espaçamento sobre o crescimento, morfologia e biomassa em dois clones de *Populus* spp no Canadá, constataram que o efeito do espaçamento no crescimento foi dependente do tempo.

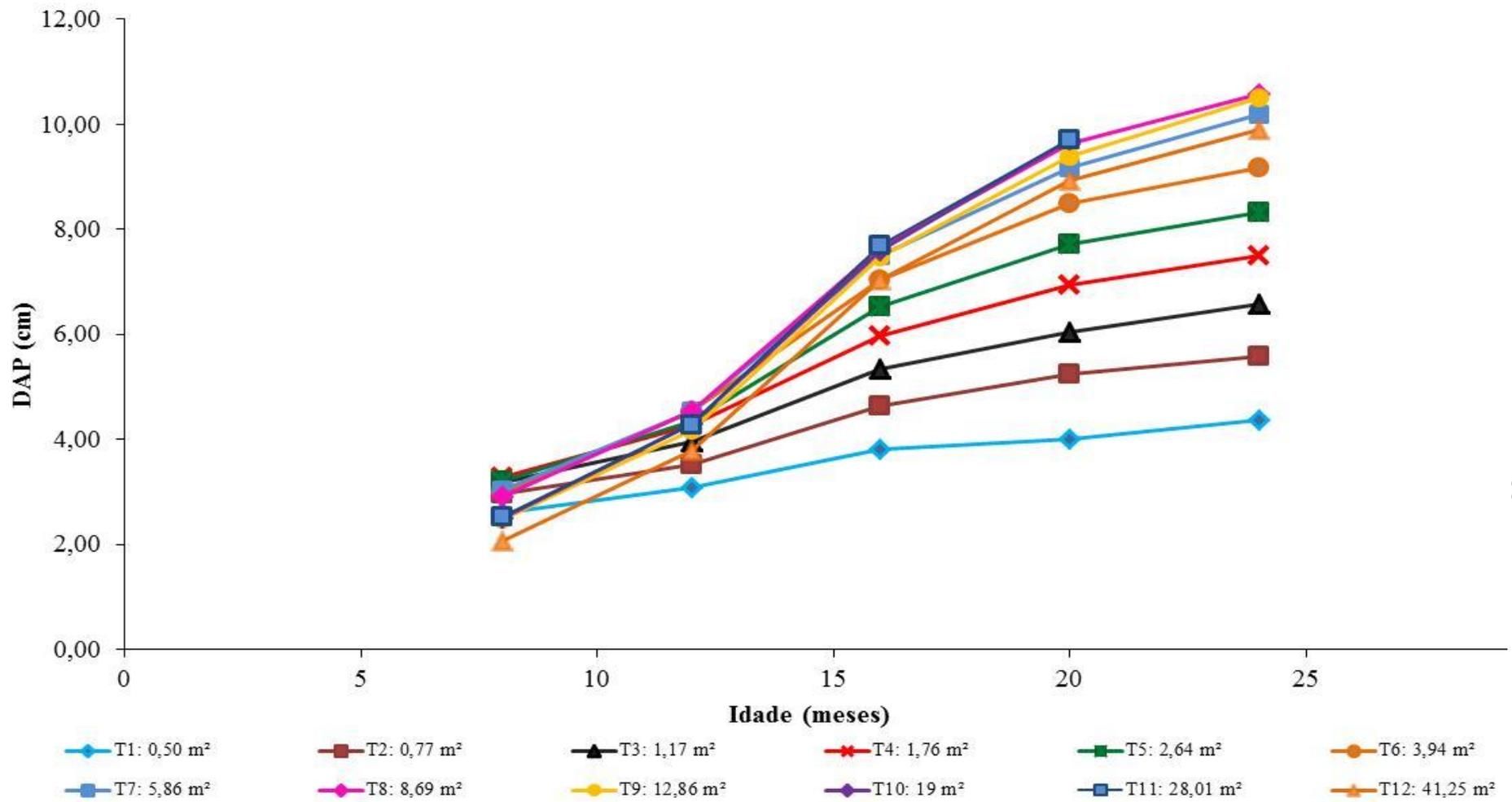


**Figura 14:** Incremento médio mensal (IMM) do DAP das árvores nos diferentes espaçamentos ao longo do tempo

No entanto, assim como relatado anteriormente nota-se por meio das Figuras 14 e 15 que o tratamento 12 (41,25 m²) teve incremento em DAP menor do que outros tratamentos intermediários e amplos, evidenciando que a área era tão grande e os recursos disponíveis eram abundantes a ponto de retardarem o incremento em DAP nesses primeiros anos (24 meses). Portanto, esse comportamento deve ser avaliado ao longo do desenvolvimento do

povoamento nos próximos anos. Uma vez comprovada a sub-estocagem, esta leva à subutilização dos recursos do local o que traz efeitos negativos no rendimento do povoamento (ETIGALE et al, 2014) inferindo que tal densidade de plantio não é adequada para a espécie em questão em condições semelhantes às do estudo (clima, solo, topografia e etc).

Conforme apresentado na Figura 14 na primeira medição (8 meses) os valores de DAP foram semelhantes entre todos os tratamentos com uma pequena superioridade de alguns tratamentos adensados e intermediários como apresentado. Já aos 12 meses existe uma relação direta do incremento em DAP em função da maior disponibilidade de área vital, que é ainda mais evidente aos 24 meses como apresentado e discutido anteriormente. Observa-se, também nas Figura 14 e 15 que os maiores incrementos em diâmetros ocorreram nos tratamentos 8, 10 e 11 os quais possuem respectivamente 8,69, 19 e 28,01 m<sup>2</sup> de área vital.



**Figura 15:** Diâmetro a altura do peito (DAP) com casca das árvores nos espaçamentos ao longo do tempo.

### 3.5.1. Ajuste e validação dos modelos de regressão para a variável diâmetro (DAP)

Assim como para a variável altura total, a análise do comportamento da variável diâmetro (DAP) em função do espaçamento foi avaliada por meio de análises de regressão. A Tabela 12 apresenta os coeficientes e as estatísticas de precisão dos seis modelos ajustados para as variável DAP dos oito aos 24 meses.

**Tabela 13:** Estatísticas de precisão e coeficientes dos quatro modelos ajustados para diâmetro das árvores do híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* avaliadas dos quatro aos 24 meses.

Meses	Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$S_{xy}$	C.V.%	R
DAP (cm)								
8	1	3,083068	-0,0092835	-	-	0,58	20,62	0,43
	2	0,083283	-0,973110	0,000302	-	0,59	20,64	0,45
	3	-6,99E+08	7,00E+09	2,06E+09	3432998	0,57	20,40	0,50
	4	3,080074*	-0,0278943 <sup>ns</sup>	0,000129 <sup>ns</sup>	-8,03E-07 <sup>ns</sup>	0,58	20,67	0,44
12	1	4,364308	-0,000558	-	-	0,92	21,19	0,03
	2	4,492651	1,0531	2,558883	-	0,87	20,05	0,33
	3	-114737,11	761736,01	153960,66	850.26038	0,85	19,65	0,38
	4	4,0043026*	0,137046*	-0,007566*	1,03E-04*	0,89	20,49	0,27
16	1	6,036480	0,007132	-	-	1,34	20,51	0,43
	2	7,470113	1,317488	0,913766	-	0,83	12,72	0,83
	3	1,442734	8,781981	1,025146	0,004420	0,81	12,47	0,84
	4	4,630383*	0,557843*	-0,026622*	3,53E-04*	0,97	14,82	0,76
20	1	7,153679	0,009191	-	-	1,80	22,68	0,50
	2	9,413376	1,613961	0,799629	-	0,97	12,25	0,88
	3	1,530433	8,418688	0,760227	0,003577	0,94	11,86	0,89
	4	5,055890*	0,822682*	-0,038675*	5,11E-04*	1,16	14,59	0,83
24	1	7,863630	0,009435	-	-	1,98	22,69	0,51
	2	10,447296	1,571664	0,716997	-	1,08	12,32	0,88
	3	2,073685	7,800658	0,625163	0,003190	1,04	11,95	0,89
	4	5,479194*	0,915646*	-0,042637*	5,61E-04*	1,26	14,37	0,84

Em que: 1= Exponencial; 2= Logístico; 3= Função racional; 4= Polinomial.  $\beta_i$ = parâmetros da equação;  $S_{xy}$ =Erro padrão; C.V.%= Coeficiente de Variação e R= Coeficiente de correlação.

\* Significativo a 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade

Observa-se na Tabela 12 que todos modelos avaliados não apresentaram resultados de ajuste satisfatórios para o DAP na idade de 12 meses. Nesta idade os valores de R foram muito baixos. Ressalta-se que que tanto aos oito quanto aos 12 meses os resultados das estatísticas de precisão foram muito semelhante para todos os modelos.

Já aos 16 meses houve uma melhora significativa no ajuste dos modelos, sendo que o modelo 2 (modelo logístico) e o modelo 3 (função racional) apresentaram bons resultados. Estes últimos conferiram valores de R de 0,83 e 0,84 respectivamente, o que demonstra que

para esta idade o espaçamento de plantio influenciou fortemente o crescimento em diâmetro uma vez que os valores de  $R$  indicaram uma forte correlação entre os valores observados e estimados. Os modelos 2 e 3, também, apresentaram os menores valores de erro padrão ( $S_{xy}$ ) e coeficiente de variação ( $C.V.\%$ ) quando comparado aos demais.

Os melhores ajustes foram observados aos 20 e 24 meses. Novamente os modelos 3 e 2 se destacaram apresentando os maiores valores  $R$  e menores valores de  $S_{xy}$  e  $C.V.\%$ , seguidos pelo modelo 4 (modelo polinomial).

Assim sendo, os dois modelos que demonstraram melhor desempenho baseando-se nos valores de  $S_{xy}$ ,  $C.V.\%$ ,  $R$  e também na melhor distribuição gráfica dos resíduos percentuais em cada idade avaliada foram selecionados para o processo de validação. Na Tabela 13 encontram-se as estatísticas de precisão dos modelos validados e na Figura 16 a distribuição gráfica dos resíduos percentuais dos mesmos. Os resultados das estatísticas de precisão dos modelos obtidos no processo de validação foram muito semelhantes às obtidas nos ajustes para todas as idades avaliadas (Tabela 12 e 14).

**Tabela 14:** Estatísticas de precisão das equações ajustadas para a variável DAP em função da área vital dos oito aos 24 meses selecionadas para a validação.

Meses	Modelo	$S_{xy}$	$C.V.\%$	$R$	$AIC$
DAP (cm)					
8	Logístico	0,575	20,86	0,23	8,23
	Função racional	0,569	20,65	0,28	10,28
12	Logístico	0,716	17,43	0,53	7,35
	Função racional	0,743	18,09	0,44	9,19
16	Logístico	0,877	13,29	0,82	6,54
	Função racional	0,874	13,24	0,83	8,55
20	Logístico	1,037	13,35	0,87	5,85
	Função racional	1,011	13,01	0,87	7,94
24	Logístico	1,168	13,65	0,87	5,40
	Função racional	1,140	13,33	0,88	7,50

Em que:  $S_{xy}$  = Erro padrão;  $C.V.\%$  = Coeficiente de Variação e  $R$  = Coeficiente de correlação;  $AIC$  = Critério de informação de Akaike.

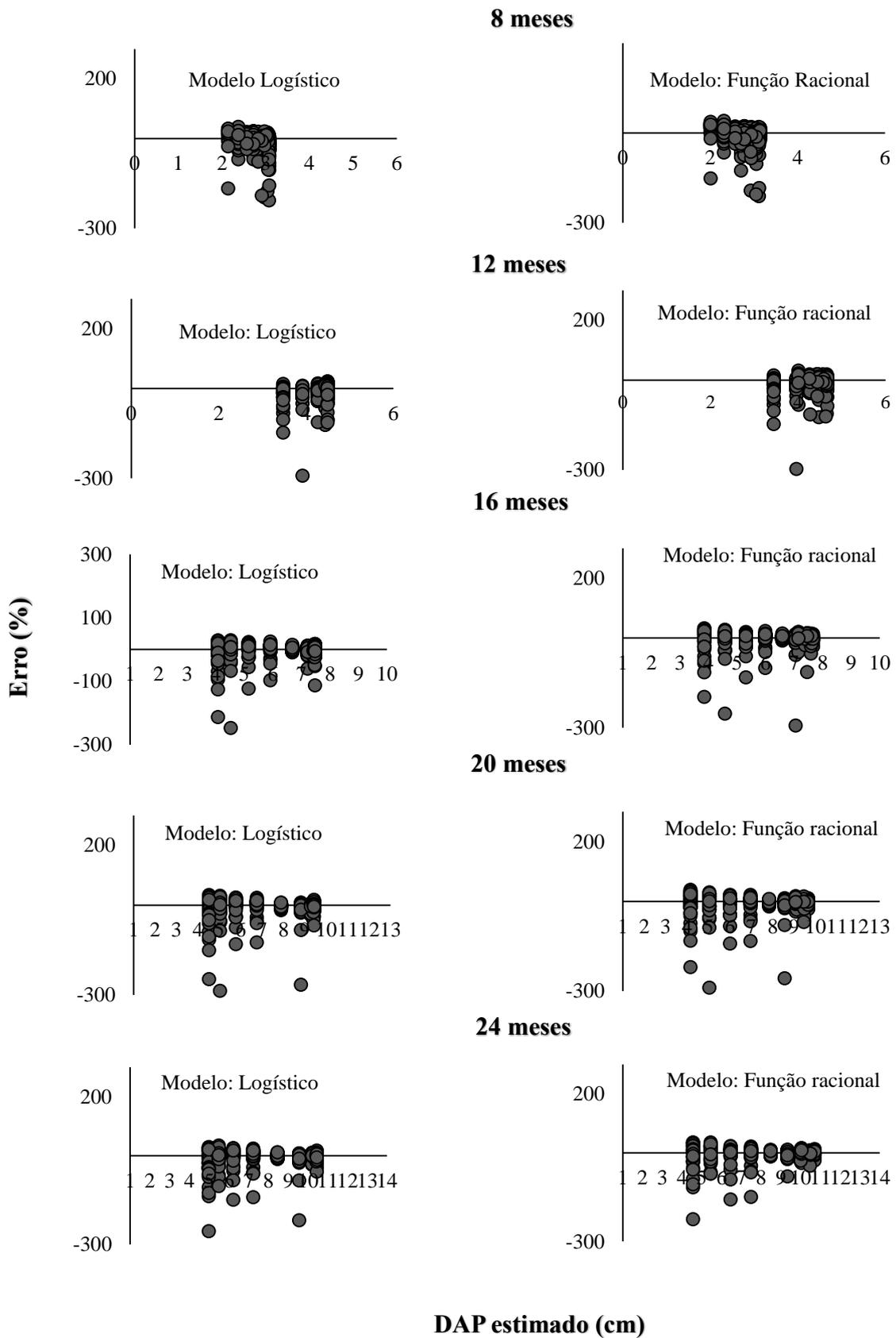
Assim como observado no ajuste dos modelos, verificou-se por meio dos resultados obtidos na validação que para as idades de oito e principalmente aos 12 meses as equações não se ajustaram bem aos dados de diâmetro. Nestas idades as duas equações selecionadas apresentaram baixos valores de  $R$ . Ainda que para a idade de 12 meses os valores de  $R$  obtidos na validação foram superiores aos apresentados nos ajustes dos modelos, tais valores podem ser considerados baixos quando comparados aos ajustes nas idades seguintes (Tabela 13). Vale ressaltar que na distribuição gráfica dos resíduos (Figura 16) que a variação do

DAP entre os espaçamentos testados aos oito meses foi muito pequena o que sugere que os modelos testados não apresentaram um bom desempenho para captar a variação ou o espaçamento não exerce grande influência sobre o DAP nesta idade e condições experimentais o que ocasionou ajustes ruins constatados pelas estatísticas de precisão (Tabela 13).

Já para idade de 16, 20 e 24 meses os modelos selecionados tiveram uma adequada capacidade de generalização, uma vez que os resultados das estatísticas de precisão da validação (Tabela 13) foram muito semelhantes às obtidas no ajuste do modelo (Tabela 12). Vale destacar que no processo de validação a equação função racional teve um desempenho levemente superior aos demais modelos avaliados apresentando menores valores de  $S_{xy}$  e C.V.% e maiores valores de  $R$  (exceto na idade de 12 meses).

Assim como para a variável altura total a equação função racional apresentou resultados satisfatórios para o ajuste da variável DAP em função da área vital no presente estudo. Isto se constata pela sua capacidade de generalização observada por meio dos resultados das medidas de precisão obtidas no processo de validação (Tabela 13) e pela distribuição gráfica dos resíduos percentuais (Figura 16). Contudo ao observar os valores obtidos por meio do  $AIC$ , os quais foram superiores aos obtidos pela função logística, verifica-se que este não é a equação mais parcimoniosa.

A presença de alguns *outliers* é observada na Figura 16, contudo, assim como realizado para os dados de altura total, tais valores foram mantidos afim de verificar a capacidade dos modelos em estimar valores extremos. Considerando as idades de 16, 20 e 24 meses os gráficos de resíduos percentuais advindos da validação (Figura 16) se mostraram adequados para as duas equações validadas, pois apesar de apresentarem *outliers*, de uma forma geral apresentam tendência a homocedasticidade. Somando-se os resultados das medidas de precisão, aos valores de  $AIC$  e a análise gráfica dos resíduos percentuais, verifica-se que a função logística apresentou desempenho ligeiramente superior a função racional e portanto mais adequado para avaliação das variações de DAP no presente estudo.



**Figura 16:** Distribuição gráfica dos resíduos da variável diâmetro para os modelos validados dos oito aos 24 meses.

Diante disso, pode-se discutir com segurança os ajustes da função logística para a variável DAP. Na Figura 17 é apresentado o DAP nas idades avaliadas em função da área vital dos tratamentos e representação gráfica do modelo logístico.

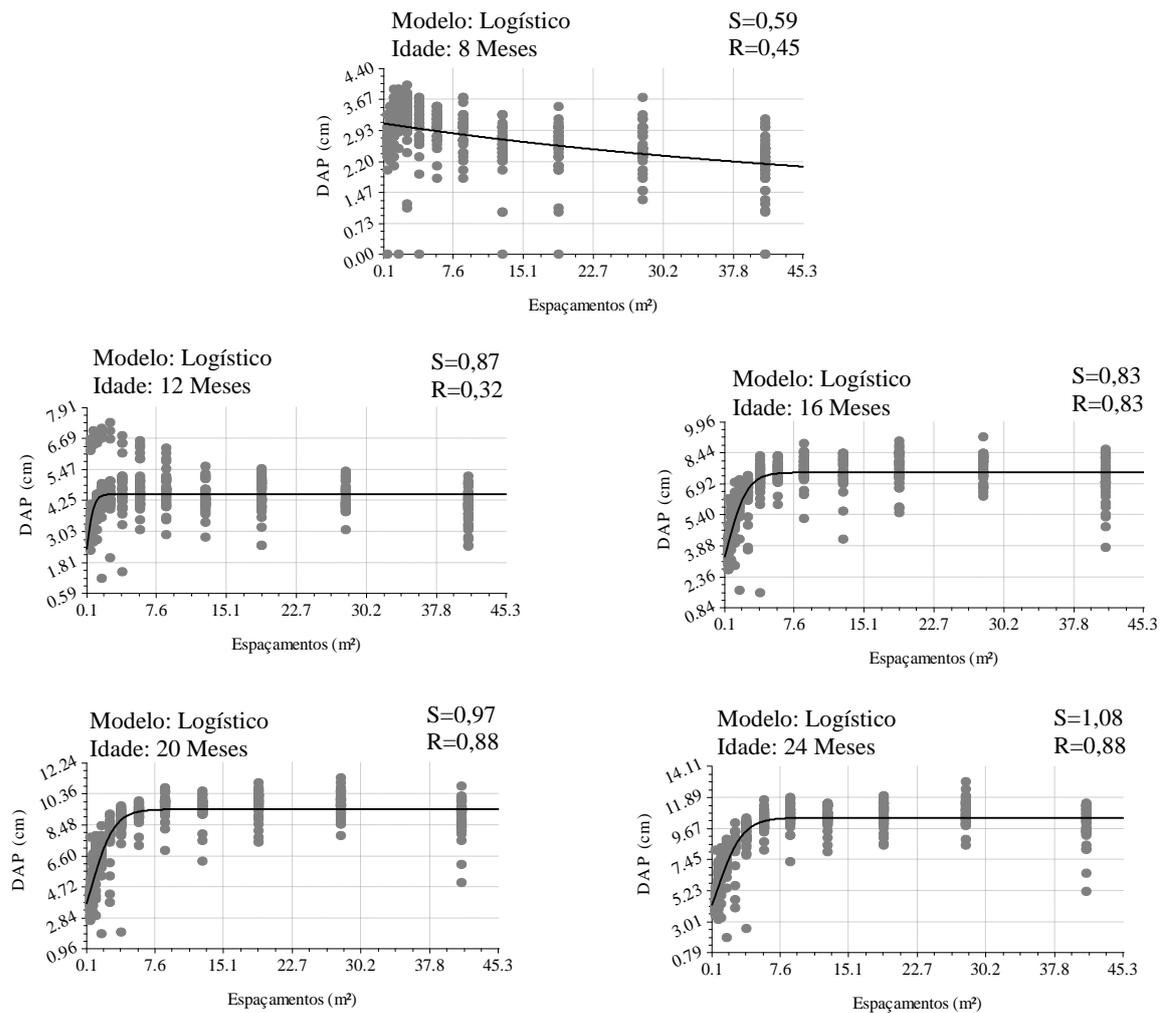
Como relatado anteriormente ao observar os altos valores de  $R$ , encontrados especialmente aos 20 e 24 meses, pode-se inferir que há uma forte correlação entre os valores observados e os valores obtidos pela regressão (Tabela 12). Estes resultados evidenciam que o espaço de crescimento disponível influencia o crescimento em diâmetro de espécies florestais assim como observado por: Leite et al. (2006), Kruschewsky et al. (2007), Magalhães et al. (2007), Oliveira Neto et al. (2010), Nascimento et al. (2012) e Vidaurre et al. (2015).

Isto ocorre, pois, em povoamentos florestais, a área útil de uma árvore pode ser restringida pelas plantas adjacentes, ocasionando competição entre raízes e copas, o que influi no crescimento em diâmetro (HILEY, 1959). Tal fato foi confirmado pela tendência proporcional de crescimento do DAP em função do espaçamento como apresentado na Tabela 11 (com exceção da idade de 8 meses).

Na Figura 17, apesar da pouca variação do DAP em função da área vital, observa-se aos 8 meses que os menores espaçamentos propiciaram um maior crescimento em DAP. Este resultado contraria a tendência de que maiores espaçamentos propiciam maior incremento em diâmetro. Entretanto, nota-se que esse comportamento ocorreu exclusivamente na idade de 8 meses na qual observou-se, também, maior crescimento em altura nos espaçamentos adensados (Item “4.5”). Isto evidencia que o crescimento em DAP é influenciado pelo fator tempo, de forma que o comportamento da variável diâmetro também muda em função da idade. Aos 12 meses é possível observar nitidamente alguns *outliers* nos espaçamentos mais adensados, com valores que não seguem a tendência geral dos dados (Figura 17). Tais pontos apresentam valores demasiadamente elevados quando comparados com os demais pontos dos mesmos tratamentos. É possível que estes valores extremos pertencem as plantas vizinhas às falhas, mortas ou plantas suprimidas, fato que provavelmente favoreceu o um maior crescimento em DAP nestes indivíduos devido a redução da competição. Vale destacar que esse comportamento pôde ser constatado claramente durante a fase de coleta de dados em campo, porém isto não foi avaliado no presente trabalho. Contudo, a presença desses *outliers* não afetaram expressivamente a qualidade dos ajustes, pois como relatado anteriormente o modelo ajustado apresentou boa capacidade de generalização.

A partir da idade de 16 até os 24 meses observa-se claramente que o diâmetro tende a aumentar a medida que a área vital por planta aumenta (Figura 17). Porém, este

comportamento não se mantém constante, mas pelo contrário, nota-se que há uma queda nos valores de DAP para alguns tratamentos com espaçamentos maiores. Santos (2011) relata que este resultado é coerente do ponto de vista ecológico, uma vez que evidencia a hipótese lógica relativa à biologia do crescimento das árvores que a partir de um determinada área vital disponível, a planta já fez uso de todos os recursos necessários para se desenvolver, logo não ocorre mais resposta de crescimento com o aumento do espaçamento.



**Figura 17:** Diâmetro (DAP) aos 8, 12, 16, 20 e 24 meses em função da área vital dos tratamentos e representação gráfica do modelo logístico.

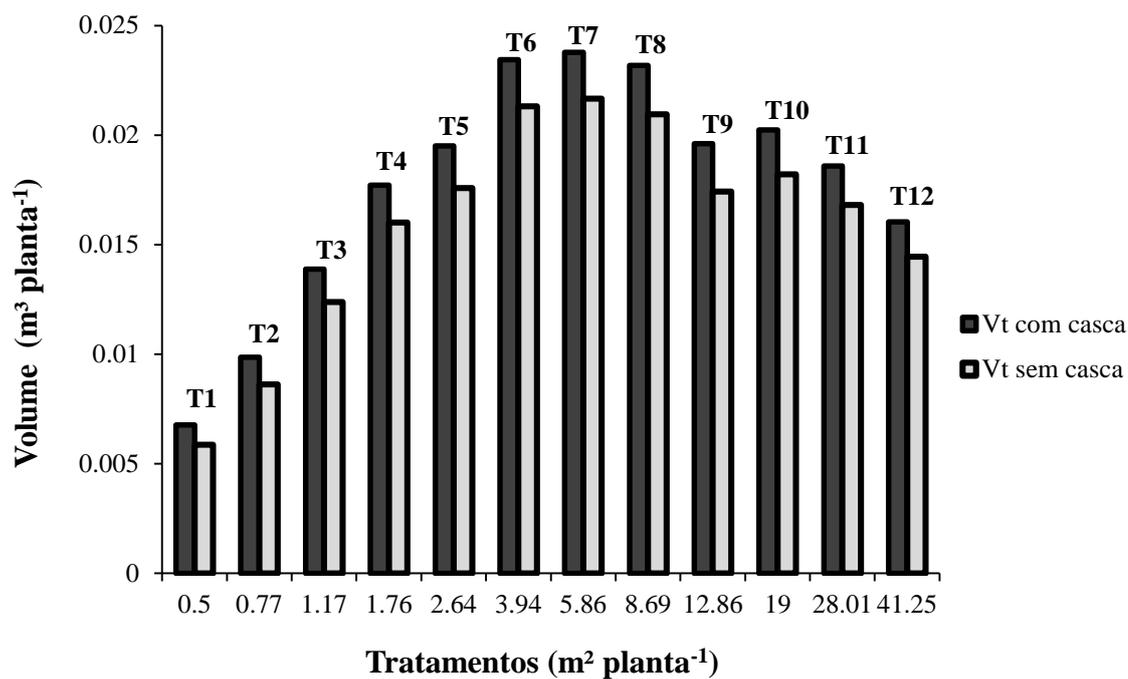
### 3.6. PRODUÇÃO EM VOLUME

O volume por árvore foi determinado aos 16 e 24 meses, idades em que realizou-se a cubagem rigorosa em todos os tratamentos de espaçamento. As Figuras 18, 19, 20 e 21

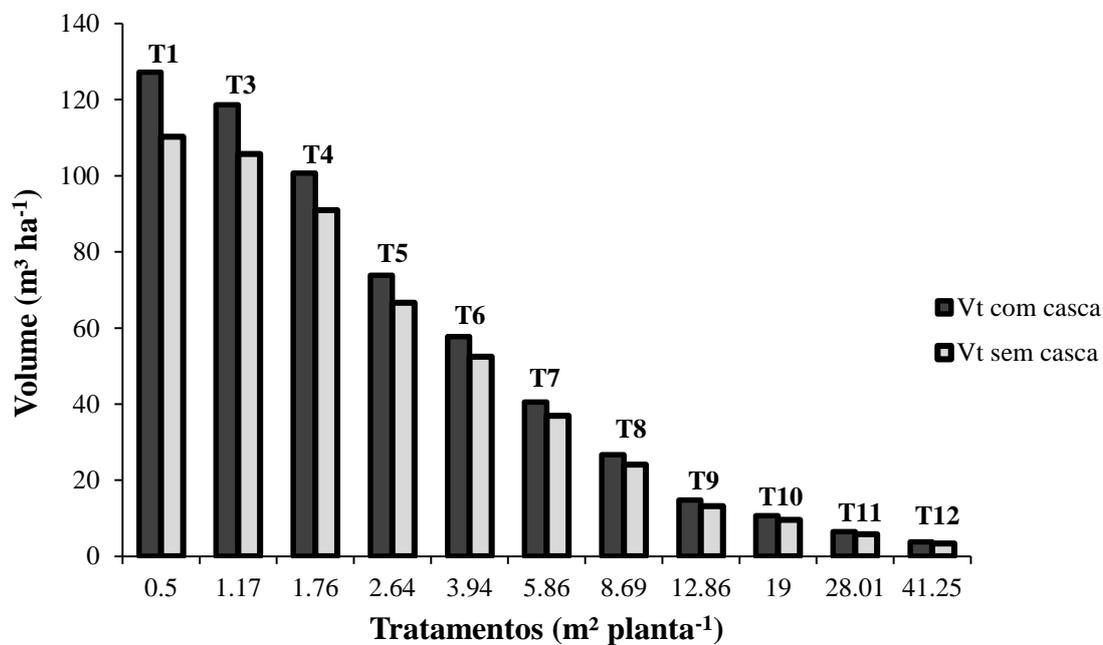
apresentam o volume médio com e sem casca por árvore e por hectare para os espaçamentos estudados.

Observa-se que na figura 18 que aos 16 meses de idade a menor produção volumétrica individual no povoamento ocorreu nos tratamentos mais adensados, no entanto a maior produção volumétrica por área ocorreu nos espaçamentos menores, com destaque para o tratamento 1 (0,50 m<sup>2</sup>). Este tratamento apresenta as árvores com menor volume por planta entretanto possui 36%, 58% e 72% mais indivíduos que os tratamentos 2, 3 e 4 (0,77, 1,17, 1,76 m<sup>2</sup>) respectivamente. A maior densidade de plantas faz com que o tratamento 1 (0,50 m<sup>2</sup>) forneça a maior quantidade de volume por hectare e que as plantas apresentem boas características como: tronco mais cilíndrico, menor nodosidade e redução da matocompetição (HAWLEY, 1946; NEILSEN e GERRAND, 1999; GERRAND e NEILSEN, 2000; PINKARD e NEILSEN, 2003; ACHIES, 2005; FORREST et al, 2010). Por outro lado a competição interespecífica inicia-se precocemente o que pode gerar desuniformidade nas plantas pela diferenciação do extrato arbóreo e aumento da taxa de mortalidade (ASSMANN, 1970; ALBER, 1980; CRECHI, 1996; SARTÓRIO, 2014). Outros fatores a serem considerados na alta densidade de plantio é a idade para intervenção por desbaste e custos de implantação e produção (SMITH, 1962; BALLONI e SIMÕES, 1980) os quais podem ser maiores em espaçamentos menores como relatado por Klein et al. (1992). Adicionalmente segundo Forrest et al. (2010) a realização de desbaste influencia as distribuições de tamanho futuro das árvores do povoamento e os produtos que este fornecerá, então os regimes de manejo também dependerão das demandas do mercado. Fishwick (1976) ressalta que altas densidades de plantio têm como vantagens a alta produção de volume total em menor tempo, reposição desnecessária pelo elevado número de plantas e rápido retorno financeiro proveniente dos desbastes. Contudo, os fatores econômicos não foram objetos de investigação do presente trabalho, de forma que sugere-se estudos posteriores para tal averiguação.

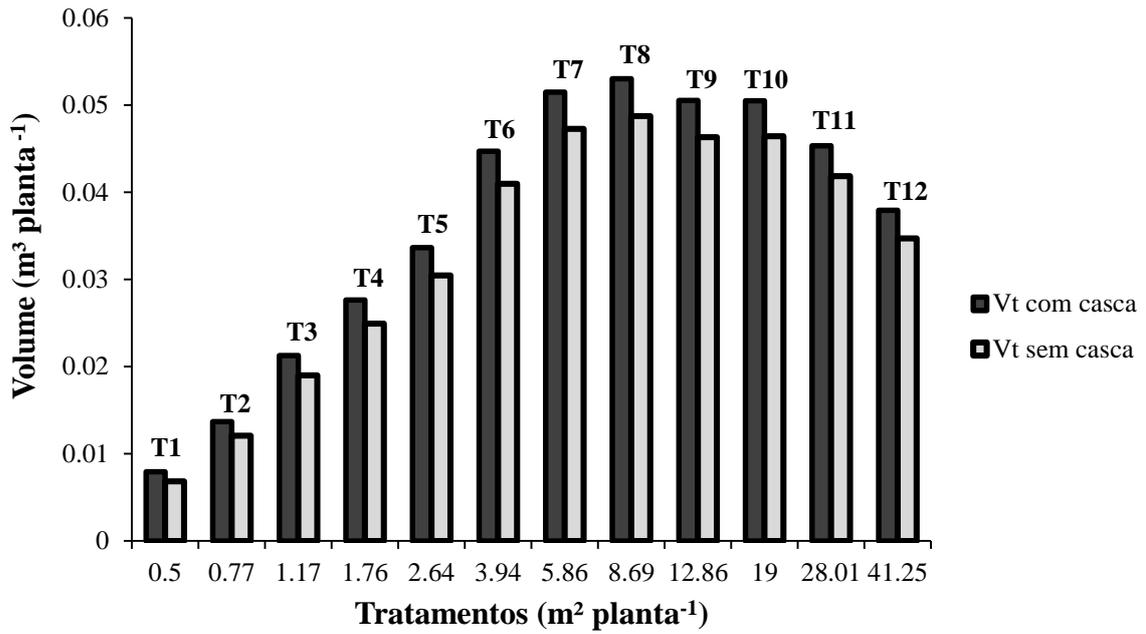
De uma forma geral, resultados semelhantes foram encontrados por Leite et. al. (2006), Reiner et al.(2011) e Cardoso et al. (2013). Corroborando com isto Leite et al. (1997) relata que em florestas de eucalipto é esperado que espaçamentos mais amplos apresentem maior produção volumétrica por indivíduo.



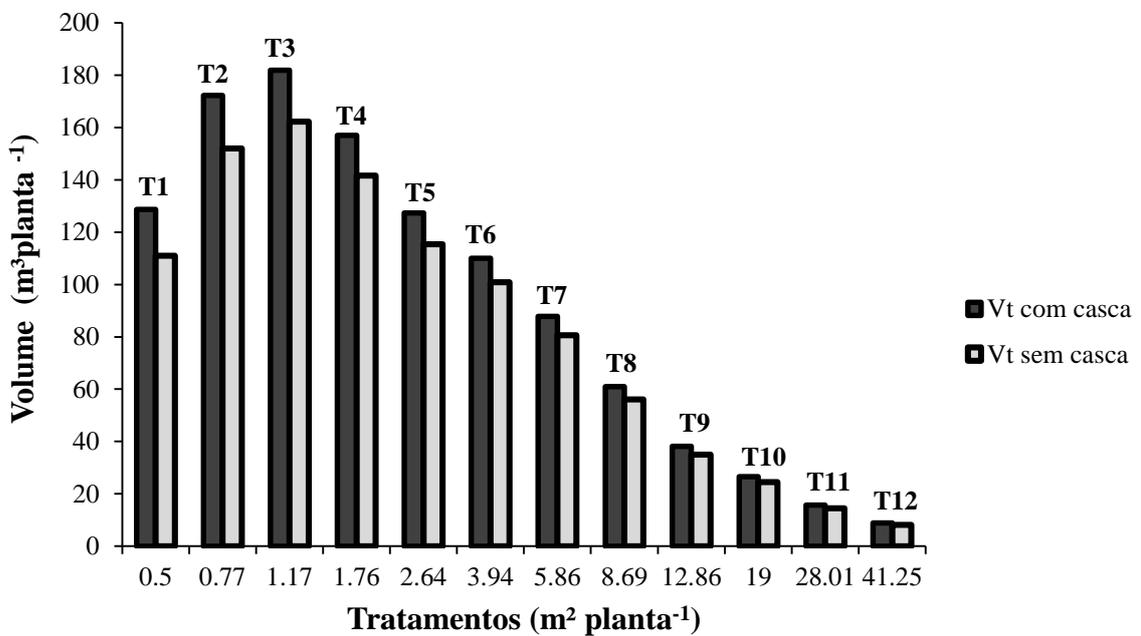
**Figura 18:** Volume médio por árvore nos diferentes espaçamentos aos 16 meses de idade.



**Figura 19:** Volume médio por hectare nos diferentes espaçamentos aos 16 meses de idade.



**Figura 20:** Volume médio por árvore nos diferentes espaçamentos aos 24 meses de idade.



**Figura 21:** Volume médio por hectare nos diferentes espaçamentos aos 24 meses de idade

No presente estudo, o volume médio por planta aos 16 meses não apresentou uma resposta inversamente proporcional. Apesar de constatado maior produção por planta nos espaçamentos maiores o inverso não foi confirmado, pois observa-se na Figura 18 que a maior produção ocorreu nos espaçamentos intermediários e não nos espaçamentos amplos. Vale ressaltar que os espaçamentos intermediários apresentaram resultados muito semelhantes entre si, o que reforça que a amplitude de tratamentos testados é importante para detectar a influência da área vital na produção volumétrica. Para evidenciar este fato, Cardoso et al (2013) não encontraram diferença significativa no volume ao final de *Pinus taeda* L de um ciclo de 24 anos nos espaçamentos testados. Entretanto, os espaçamentos testados pelos autores correspondem aproximadamente o tratamento 6 ao 9 (3,94 a 12,86 m<sup>2</sup>) no presente estudo os quais como dito anteriormente apresentaram valores muito semelhantes. Deve-se considerar como um fator importante a idade, pois observa-se por meio da Figura 18 e 20 que a curva de produção volumétrica por planta está deslocando-se a direita ao longo do tempo, ou seja com o passar da idade evidencia-se que os maiores espaçamentos tendem a proporcionar maior volume por planta. Como o experimento foi realizado em um povoamento em idade juvenil aconselha-se estudos posteriores para análise do comportamento da produção volumétrica em função das diferentes densidades de plantio com idades mais avançadas.

Portanto diante o exposto acima, pode-se inferir para o presente estudo que os espaçamentos amplos, em idade juvenil (24 meses), ocasionam a subutilização da área para a produtividade das plantas, ou seja os recursos disponíveis excederam a capacidade fisiológica de assimilação das plantas. Resultados semelhantes foram encontrados por Morais (2006) a qual avaliando o desenvolvimento de eucalipto em diferentes espaçamentos, verificou que os maiores espaçamentos (24 e 30 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>) apresentaram menor produtividade quando comparados aos espaçamentos intermediários (12 e 18 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>). Semelhantemente Bernardo (1995) apud Morais (2006) relata que espaçamentos muito amplos resultam na subutilização e menor produtividades das Florestas. Da mesma forma ressalta-se que os espaçamentos adensados em idade juvenil (24 meses) demonstraram esgotamento e declínio em função da competição excessiva estabelecida precocemente.

A produtividade volumétrica por planta aos 24 meses apresentou um comportamento semelhante ao da idade de 16 meses, mantendo-se uma menor produtividade individual nos espaçamentos reduzidos e maior produtividade individual nos espaçamentos intermediários, com destaque para os tratamentos 7 e 8 com 5,86 e 8,69 m<sup>2</sup> respectivamente (Figura 20). Vale destacar que aos 24 meses, apesar da produtividade por hectare apresentar-se

inversamente proporcional, os tratamentos 1 e 2 (0,50 e 0,77 m<sup>2</sup>) apresentaram menor produtividade por área que o tratamento 3 (1,17 m<sup>2</sup>), o qual apesar de ser adensado possui uma área por planta maior. Uma das causas deste fato é o aumento da ocorrência de mortalidade e plantas suprimidas nos espaçamentos menores, reduzindo assim a produtividade. Este resultado é esperado uma vez que povoamentos submetidos a maiores densidades de plantio podem ocasionar um aumento no número de plantas dominadas e da taxa de mortalidade devido à competição por luz, água e nutrientes (ALBER, 1980; CRECHI, 1996; SARTÓRIO, 2014). Apesar disso, segundo Balloni e Simões (1980) os espaçamentos reduzidos mesmo com maior percentagem de falhas e plantas dominadas, permitirão que se tenha um maior volume total de madeira por área e também um maior número de árvores para a segunda rotação, o que segundo os autores é uma situação desejável, por exemplo, em regimes de talhadia. Porém, Schneider (2008) relata que a elevação da taxa de mortalidade deve ser evitada com a antecipação de intervenções de desbastes aplicada com uma intensidade adequada, dependendo da capacidade produtiva do sítio e da velocidade de crescimento das espécies. Ressalta-se que apesar de relevantes, estas considerações não podem ser aplicadas a todos os tipos de manejo, uma vez que o uso da madeira, os custos de implantação, manutenção e colheita, qualidade do sítio, entre outras questões devem ser consideradas.

Na Tabela 14 e 16 são apresentadas as estatísticas de precisão e os coeficientes dos quatro modelos ajustados para o volume por árvore por hectare, respectivamente.

**Tabela 15:** Estatísticas de precisão e coeficientes dos quatro modelos ajustados para volume com casca por planta e por hectare das 60 árvores medidas aos 16 e 24 meses.

Meses	Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$S_{xy}$	C.V.%	R
Volume com casca (m <sup>3</sup> planta-1)								
16	1	0,017116451	0,003206966	-	-	0,005	29,6	0,15
	2	0,020613194	5,3506876	2,0217155	-	0,002	13,49	0,89
	3	-0,008021686	0,036466114	1,2004763	0,027220511	0,001	8,24	0,96
	4	0,01098239	0,0024957	-1,38E-04	1,96E-06	0,003	19,30	0,77
24	1	0,032376853	0,010635572	-	-	0,004	39,25	0,38
	2	0,048029344	5,842832	1,1047659	-	0,005	13,44	0,95
	3	-0,004456907	0,027870846	0,32214971	0,009341782	0,003	8,33	0,98
	4	0,012454874	0,007663177	-3,85E-04	5,21E-06	0,006	16,57	0,92
Volume com casca (m <sup>3</sup> ha-1)								
16	1	149,6903	-0,22264	-	-	8,275	13,80	0,99
	2	-51,25912	-1,3084522	-0,088992327	-	7,23	12,05	0,99
	3	179,72661	-14,094638	0,44868827	-0,041544166	8,24	13,75	0,99
	4	133,91522	-19,020655	8,43E-01	-1,11E-02	11,58	19,31	0,97
24	1	187,53227	-0,1212117	-	-	16,91	17,54	0,97
	2	-215,59009	-2,1131817	-0,081001509	-	16,80	17,44	0,97
	3	205,43639	-10,731212	0,17988206	-0,01207649	18,59	19,29	0,96
	4	184,74477	-19,853618	7,64E-01	-9,36E-03	16,88	17,52	0,97

Em que: 1= Exponencial; 2= Logístico; 3= Função racional; 4= Polinomial.  $\beta_i$ = parâmetros da equação;  $S_{xy}$ =Erro padrão; C.V.%= Coeficiente de Variação e R= Coeficiente de correlação.

**Tabela 16:** Estatísticas de precisão e coeficientes dos quatro modelos ajustados para volume sem casca por planta e por hectare das 60 árvores medidas aos 16 e 24 meses.

Meses	Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$S_{xy}$	C.V.%	R
Volume sem casca (m <sup>3</sup> planta <sup>-1</sup> )								
16	1	0,015383988	0,003297951	-	-	0,005	30,46	0,15
	2	0,018610149	5,8394724	2,0658897	-	0,002	14,00	0,89
	3	-0,008004528	0,033519335	1,2119384	0,028403838	0,001	8,90	0,96
	4	0,009775911	0,002284644	-1,27E-04	1,80E-06	0,003	20,24	0,76
24	1	0,029467579	0,010907459	-	-	0,013	40,07	0,38
	2	0,0441384	6,1634526	1,1056446	-	0,005	13,72	0,95
	3	-0,004474974	0,025159024	0,312156	0,009294965	0,003	8,67	0,98
	4	0,010906125	0,007118607	-3,56E-04	4,81E-06	0,006	16,94	0,92
Volume sem casca (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )								
16	1	130,43383	-0,21181359	-	-	7,39	13,85	0,99
	2	-61,122897	-1,4306592	-0,10001895	-	6,78	12,71	0,99
	3	152,93919	-11,858359	0,39578794	-0,036625725	7,81	14,64	0,99
	4	118,16365	-16,53526	7,27E-01	-9,56E-03	9,81	18,39	0,97
24	1	165,0791	-0,11465349	-	-	15,87	18,35	0,96
	2	-309,18606	-2,8337608	-0,087521628	-	15,91	18,40	0,96
	3	-243,94361	1585,7509	4,6471715	2,7254429	13,89	16,07	0,97
	4	163,34523	-16,928621	6,35E-01	-7,66E-03	15,79	18,26	0,96

Em que: 1= Exponencial; 2= Logístico; 3= Função racional; 4= Polinomial.  $\beta_i$ = parâmetros da equação;  $S_{xy}$ =Erro padrão; C.V.%= Coeficiente de Variação e R= Coeficiente de correlação.

Constatou-se que tanto para os dados de volume com casca quanto para o volume sem casca por planta o modelo 1 (exponencial) não apresentou resultados satisfatórios, pois as equações ajustadas apresentaram baixos valores de R em ambas idades avaliadas, principalmente aos 16 meses (Tabelas 15 e 16). Observou-se, também, que o modelo 1 gerou os maiores valores de coeficiente de variação (C.V.%) e erro padrão da estimativa ( $S_{xy}$ ) para o volume com e sem casca por planta o que evidencia seu baixo desempenho para os dados em questão. Entretanto, este modelo apresentou bons resultados para as estatísticas de precisão de volume com e sem casca por hectare em ambas idades avaliadas, com destaque para o ajuste dos dados aos 16 meses. Morais (2006), ao avaliar o desenvolvimento de eucalipto clonal em diferentes espaçamentos constatou que o crescimento da floresta, em volume por hectare, ocorreu de forma exponencial. Santos (2011) também verificou resultados satisfatórios de medidas de precisão ao ajustar o modelo exponencial para dados de volume por hectare na idade de 72 meses em função do espaçamento.

De uma forma geral os modelos logístico e função racional foram os que tiveram o melhor desempenho tanto para os dados de volume por planta quanto por hectare nas idades avaliadas. Estes modelos apresentaram na maioria dos ajustes os menores valores de  $S_{xy}$  e C.V.% bem como os maiores valores de R (Tabelas 15 e 16). O modelo logístico é uma função sigmoide e isto pode ter favorecido estes resultados, uma vez que as equações sigmoidais são utilizadas com sucesso para descrever diferentes relações biológicas e frequentemente empregados para descrever o crescimento de espécies florestais (PIRES e

CALEGARIO, 2007; GUREVITCH et al., 2009; CARVALHO et al., 2011; MILANI et al., 2013, MACHADO et al., 2015). Já o modelo função racional, apesar de não ser comumente empregado na análise de crescimento de plantas, apresentou resultado satisfatório com base nas estatísticas de precisão avaliadas.

Como os resultados dos ajustes dos modelos para os dados de volume com casca foram praticamente idênticos aos volume sem casca, optou-se por considerar para o processo de validação apenas as equações ajustadas para o volume com casca. Dessa forma, baseado nas melhores estatísticas de precisão (Tabelas 15) e na avaliação dos gráfico de distribuição dos resíduos, as equações ajustadas para os dados de volume com casca selecionados para o processo de validação encontram-se na Tabela 16 assim como a distribuição gráfica dos resíduos percentuais na Figura 22.

**Tabela 17:** Validação dos modelos de volume com casca médio por planta e por hectare aos 16 e 24 meses.

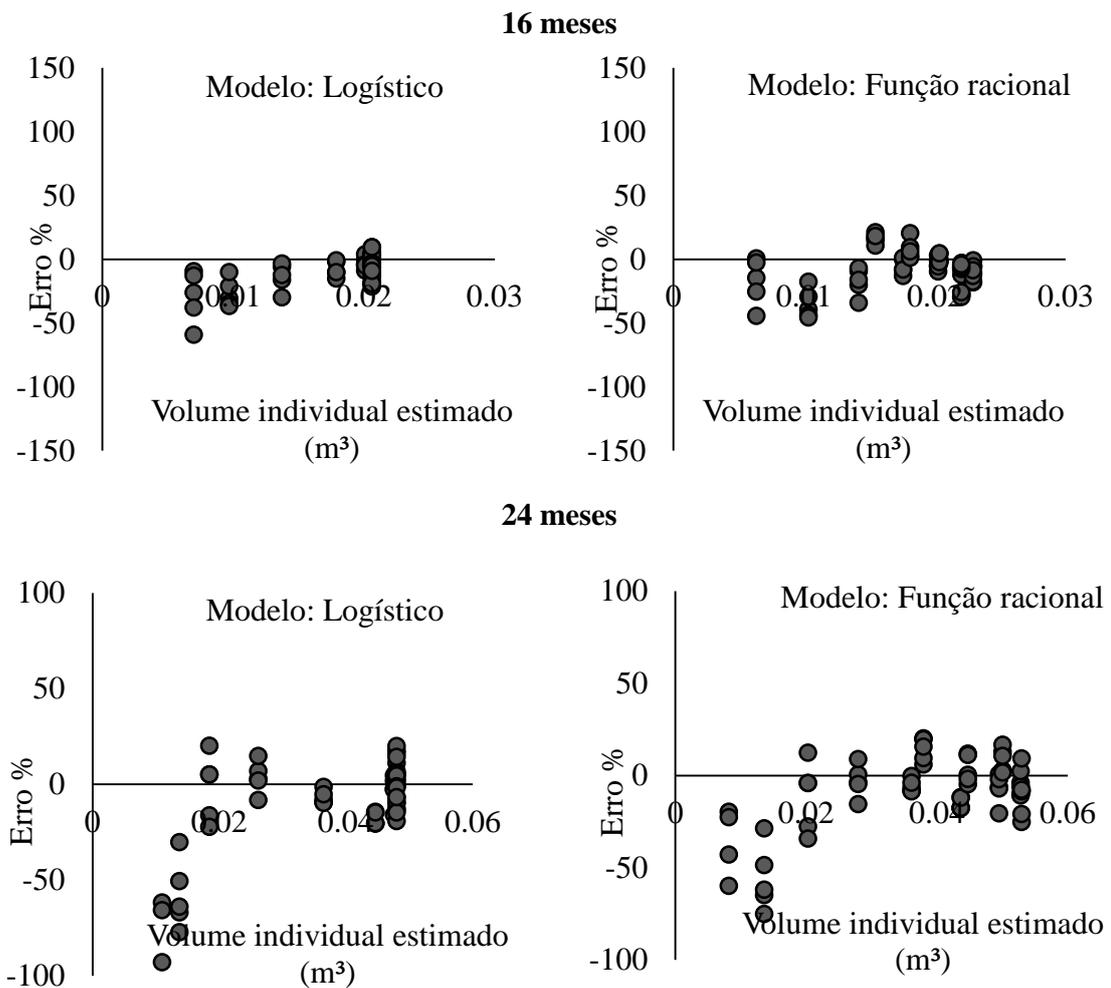
Meses	Modelo	$S_{xy}$	C.V.%	R
Volume com casca (m <sup>3</sup> planta <sup>-1</sup> )				
16	Logístico	0,002	9,90	0,97
	Função racional	0,002	13,76	0,92
24	Logístico	0,005	13,86	0,96
	Função racional	0,005	13,94	0,96
Volume com casca (m <sup>3</sup> hectare <sup>-1</sup> )				
16	Logístico	14,20	27,01	0,98
	Função racional	14,84	28,24	0,97
24	Logístico	29,43	35,36	0,91
	Função racional	28,72	34,50	0,92

Em que:  $S_{xy}$ =Erro padrão; C.V.%= Coeficiente de Variação e R= Coeficiente de correlação.

Todos as equações validadas para os dados de volume com casca por planta apresentaram baixos valores de C.V.% e elevado valor de R (Tabela 16) nas duas idades avaliadas. Já para os dados de volume por hectare ambas equações ajustadas apresentaram elevado valor de R porém elevados valores de  $S_{xy}$  e C.V.% , principalmente na idade de 24 meses o que não é desejado (Tabela 16).

As equações selecionados apresentaram generabilidade para a variável volume nas duas idades avaliadas, uma vez que os resultados das estatísticas de precisão da validação foram muito semelhantes às obtidas no ajuste do modelo. Contudo, verifica-se na distribuição gráfica dos resíduos percentuais que todos os modelos apresentam um comportamento que indicam haver autocorrelação residual. Nota-se que para o volume por

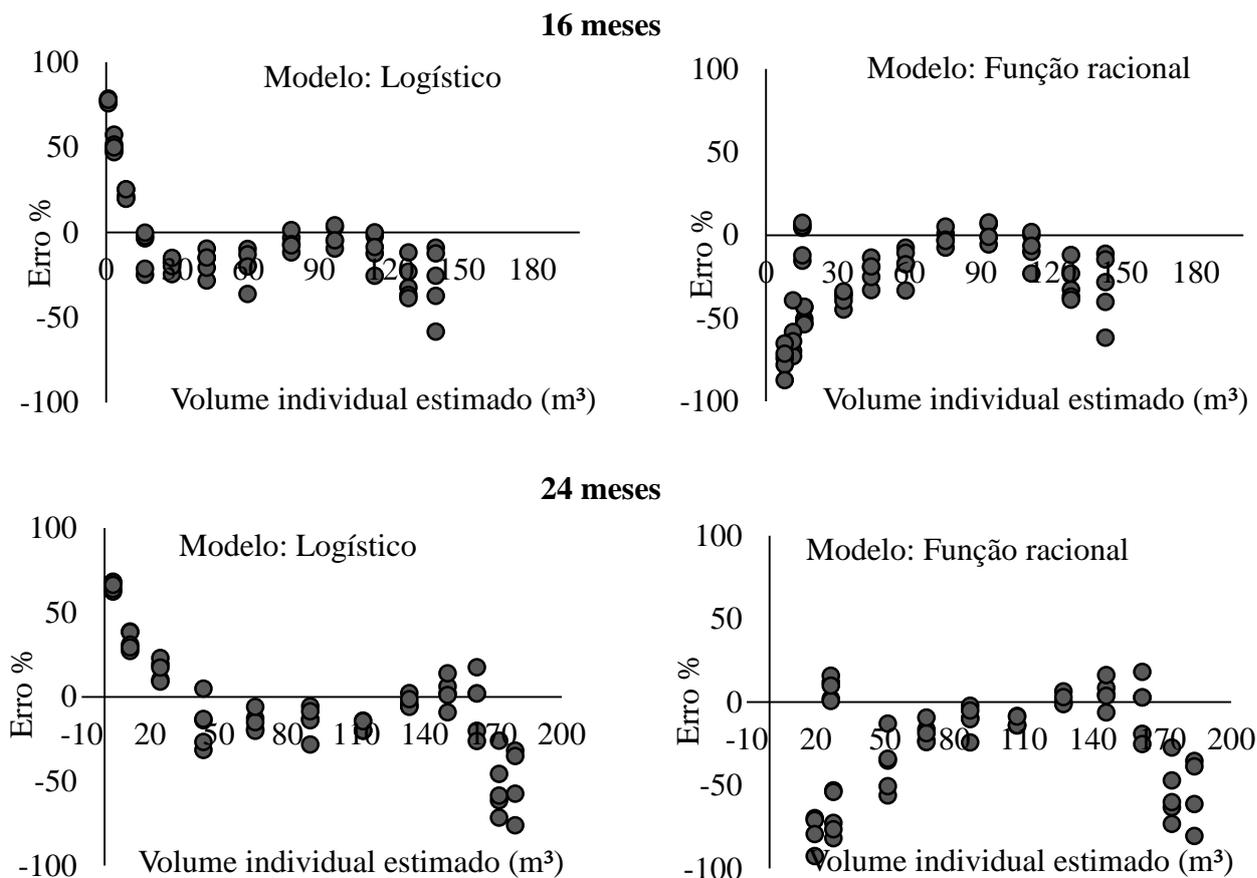
planta aos 16 meses, tanto a função logística quanto função racional apresentaram tendência de superestimação para os valores menores de 0,015 m<sup>3</sup> (Figura 22). Esse comportamento, também foi observado para os modelos avaliados na idade de 24 meses, ou seja, superestimação para os valores menores. Assim sendo os modelos não descreveram adequadamente o comportamento da produção em volume individual para os espaçamentos mais adensados os quais apresentaram as menores médias de volume por planta.



**Figura 22:** Distribuição gráfica dos resíduos percentuais da variável volume por planta para os modelos validados nas idades de 16 e 24 meses.

Com relação as estimativas de volume por hectare a equação logística apresentou tanto aos 16 quanto aos 24 meses uma tendência de subestimar os valores menores, especialmente os valores abaixo de 20 m<sup>3</sup> (Figura 23). Este modelo apresentou também a

tendência de superestimar os valores maiores, principalmente os valores acima de 120 m<sup>3</sup> aos 16 meses e 160 m<sup>3</sup> aos 24 meses. Isso indica que a equação apresentou uma deficiência na capacidade de descrever o comportamento dos dados nos espaçamentos demasiadamente amplos e adensados. Observa-se também que este comportamento é advindo da autocorrelação residual que pode ser observada nos gráficos de resíduos.



**Figura 23:** Distribuição gráfica dos resíduos percentuais da variável volume por hectare para os modelos validados nas idades de 16 e 24 meses.

Aos 16 meses a função racional proporcionou superestimação dos dados menores a 80 m<sup>3</sup> (espaçamentos amplos) e maiores de 120 m<sup>3</sup> (espaçamentos adensados) indicando uma relação quadrática entre os resíduos e os valores estimados. Este mesmo comportamento foi observado aos 24 meses, notada pela superestimação dos valores menores de 80 e maiores que 160 m<sup>3</sup> (espaçamentos adensados). Assim como para a equação logística a função

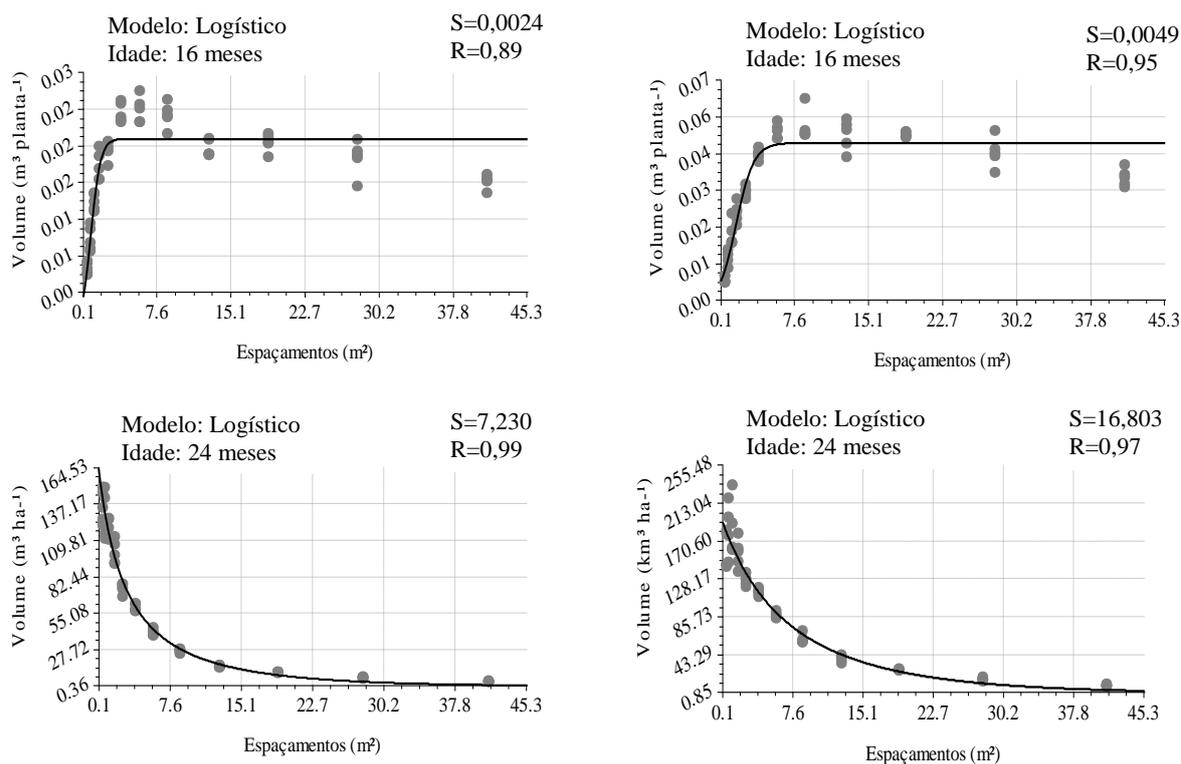
racional apresentou autocorrelação residual em ambas idades como pode ser observado na Figura 23.

A autocorrelação não é desejada uma vez que infere que os termos de erro não são independentes. Entretanto, as equações selecionadas, apesar de apresentarem um padrão de autocorrelação no gráfico de resíduos se mostraram superiores as demais equações avaliadas, além de representar adequadamente a curva de crescimento do volume por planta e por hectare em função dos espaçamentos (Figura 24).

Portanto, diante o exposto o modelo logístico foi selecionado como a equação que melhor se ajustou aos dados de volume com casca. Na figura 24 é apresentada a variável volume com casca (individual e por hectare) aos 16 e 24 meses em função da área vital dos tratamentos e representação gráfica do modelo Logístico.

Como apresentado na Tabela 14 verificou-se um alto valor de  $R$  tanto nas equações ajustadas para volume individual quanto por hectare em ambas idades indicando que a área vital afetou a resposta do povoamento em relação ao volume. Esse bom resultado pode ter sido favorecido em função da amplitude de densidades de plantio avaliadas em que há tratamentos extremos ( $0,50 \text{ m}^2$  e  $41, 25 \text{ m}^2$  por planta). Deve-se destacar que tanto aos 16 quantos aos 24 meses a partir de aproximadamente  $7,6 \text{ m}^2$  (valor correspondente a uma área entre os tratamentos 7 e 8) que não há um acréscimo significativo no volume individual (Figura 24).

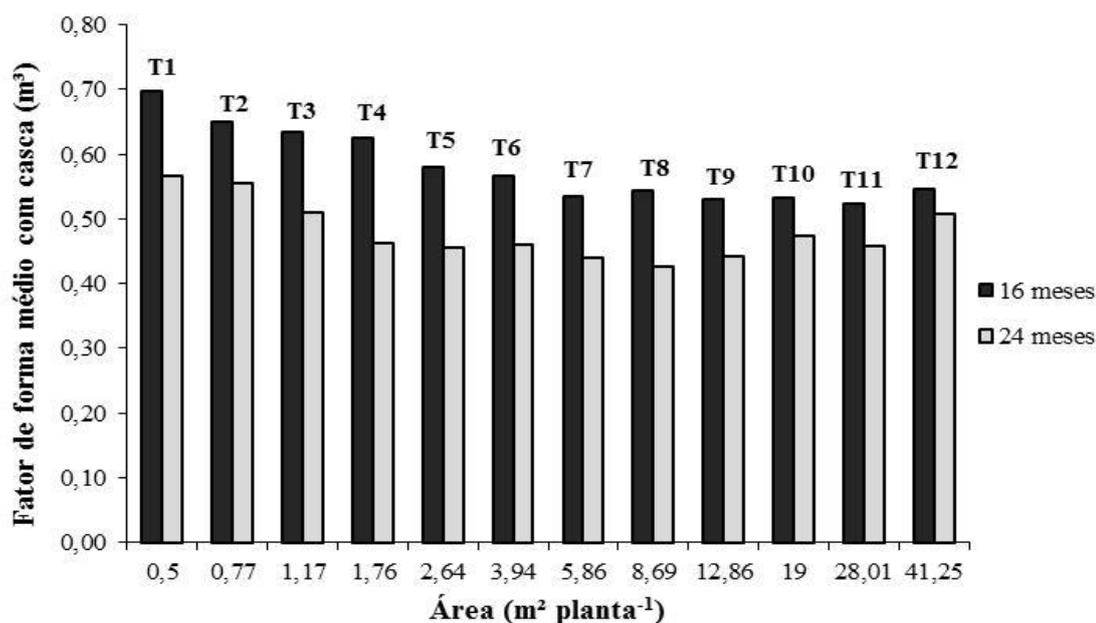
É esperado que espaçamentos mais amplos apresentem maior produção volumétrica por indivíduo (LEITE et al., 1997; LEITE et. al., 2006; REINER et al., 2011), entretanto os maiores valores médios de volume por árvore foram encontrados nos tratamentos intermediários ( $3,94$ ,  $5,86$  e  $8,69 \text{ m}^2$ ) como observado nas Figuras 18 e 20 o que confirma o comportamento anteriormente citado observado na representação gráfica dos modelos (Figura 24). Constata-se, também, que a produção em volume por hectare diminui com o aumento da área vital disponível, porém tende a estabilizar nos espaçamentos acima de  $22 \text{ m}^2$  (Figura 24). Resultados semelhantes foram encontrados por Botelho (1998), Oliveira Neto et al. (2003) e Santos (2011) em que relatam que a maior produção volumétrica por hectare ocorre nos espaçamentos mais adensados devido o maior número de plantas.



**Figura 24:** Volume com casca por planta e por hectare aos 16 e 24 meses em função da área vital dos tratamentos e representação gráfica do modelo Função racional.

### 3.7. FATOR DE FORMA

Na Figura 25 encontram-se os valores dos fatores de forma nas duas idades avaliadas. Verifica-se uma redução nos valores dos fatores de forma conforme a área vital disponível aumenta, principalmente aos 12 meses, ressaltando que quanto menor o espaçamento mais cilíndrico é o fuste da árvore. Semelhantemente Ferreira et al. (1997) verificaram que os fatores de forma de árvores de eucalipto (*Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*) diminuíram com o aumento do espaçamento. Os autores atribuíram este fato à existência de maior número e espessura de galhos de forma que a distribuição de fotoassimilados, ao longo do tronco, torna-se desigual, em função da competição exercida pelos galhos mais grossos da porção intermediária até o topo da árvore, afinando seu tronco nessa posição. Adicionalmente, de acordo com Lima e Garcia (2011) indivíduos que são plantados em espaçamento mais amplos geralmente crescem mais rapidamente em diâmetro, e em determinada idade, eles apresentaram maior conicidade além de outras características indesejáveis.



**Figura 25:** Fator de forma média para cada tratamento aos 16 e 24 meses.

Nas tabelas 18 e 19 encontra-se a análise de variância para os fatores de forma das árvores aos 16 e 24 meses. Na Tabela 19 estão apresentados os fatores de forma médios das árvores em cada tratamento nas duas idades avaliadas bem como os grupos obtidos por meio dos teste Scott-Knott os quais foram três.

**Tabela 17:** Análise de variância para os fatores de forma das árvores em cada tratamento aos 16 meses.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalculado
Tratamentos	11	0,18063	0,01642	12,0412 **
Resíduo	48	0,06546	0,00136	
Total	59	0,24609		

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade

**Tabela 18:** Análise de variância para os fatores de forma das árvores em cada tratamento aos 24 meses.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalculado
Tratamentos	11	0,11293	0,01027	7,2610 **
Resíduo	48	0,06787	0,00141	
Total	59	0,18080		

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade

**Tabela 19:** Teste de agrupamento Scott-Knott para os fatores de forma das árvores em cada tratamento.

Tratamento	Fator de Forma Médio		
	Área Vital	16 Meses	24 Meses
1	0,50	0,70 a	0,57 a
2	0,77	0,65 b	0,55 a
3	1,17	0,63 b	0,51 b
4	1,76	0,63 b	0,46 c
5	2,64	0,58 c	0,46 c
6	3,94	0,57 c	0,46 c
7	5,86	0,53 c	0,44 c
8	8,69	0,54 c	0,43 c
9	12,86	0,52 c	0,44 c
10	19,00	0,53 c	0,47 c
11	28,01	0,55 c	0,46 c
12	41,25	0,53 c	0,51 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de “Scott-Knott” com 1 % de probabilidade

Aos 16 meses de idade do povoamento os fatores de forma apresentaram tendência de redução à medida que o espaçamento aumenta. Aos 24 meses de idade o fator de forma seguiu a mesma tendência de declínio do tratamento 1 ao 11, apresentando distorção em relação a tendência par o tratamento 12 (41,25 m<sup>2</sup>) que é o de maior área vital. Esse comportamento do tratamento 12 aos 24 meses não é o esperado, porém, Larson (1969) relata que a ocorrência de maior conicidade em indivíduos adultos submetidos a espaçamentos adensados pode ser atribuída a manutenção de uma maior tamanho de copa, gerando um aumento do crescimento do diâmetro da base da mesma. Neste estudo é observado que no tratamento 12 não houve distinção da parte aérea em copa e fuste uma vez que a copa viva está em toda a extensão da parte aérea, sendo uma variável a ser considerada em estudos subsequentes.

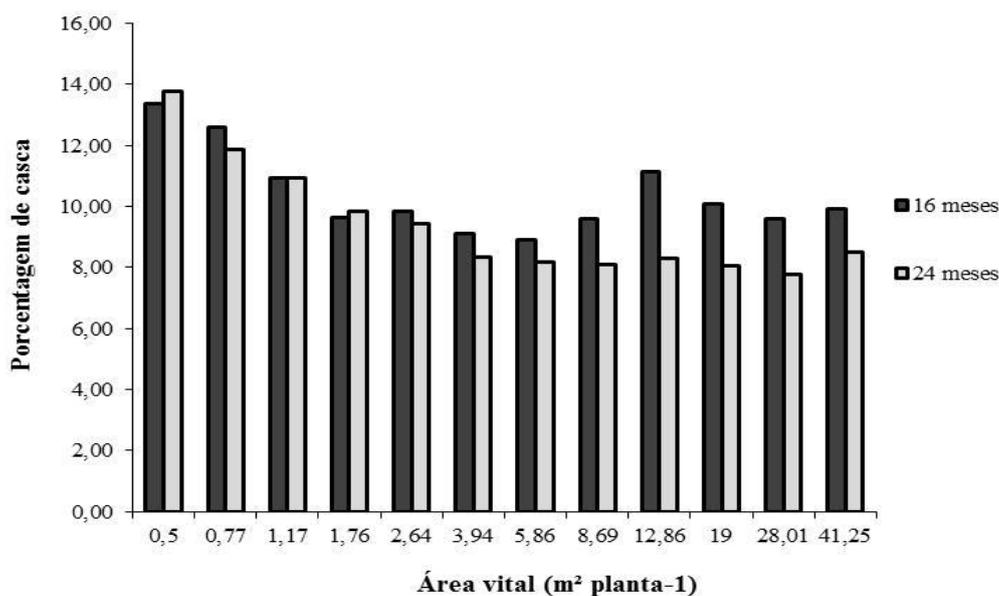
Aos 12 meses destaca-se que o espaçamento mais adensado (0,50 m<sup>2</sup>) apresenta o maior fator de forma médio, ou seja a menor conicidade, comparado aos demais. Tal tratamento diferiu estatisticamente de todos os demais compreendendo o grupo 1. No grupo 2 estão os tratamentos 2, 3 e 4 (0,77, 1,17 e 1,76 m<sup>2</sup>), os quais seguidos do tratamento 1 (0,50 m<sup>2</sup>) apresentaram os maiores fatores de forma. Isto era esperado uma vez que árvores plantadas em espaçamentos adensados normalmente apresentam troncos mais cilíndricos quando comparadas aos indivíduos de espaçamentos amplos (MELLO et al., 1971; NOGUEIRA et al., 2008; RANCE et al., 2012) como discutido anteriormente. Corroborando

com isto Rance et al. (2012), ao avaliarem plantios de *Eucalyptus grandis* submetidos a diferentes espaçamentos e sítios, na Austrália, verificaram que indivíduos em idades juvenis apresentam fustes mais cilíndricos nos espaçamentos menores quando comparados às árvores dos arranjos mais amplos. Já o grupo 3 foi composto pelos tratamentos 5 ao 12, os quais apesar de englobar todos tratamentos intermediários e amplos e um tratamento adensado (tratamento 5) não diferiram entre si e apresentaram médias muito semelhantes.

Ressalta-se que a forma da árvore também sofre influência da idade, o que foi observado no presente estudo. Apesar de ter sido constatada nas idades avaliadas a mesma tendência de comportamento das plantas, ou seja quanto menor área vital disponível maior o fator de forma médio, verificou-se que aos 24 meses houve um aumento da conicidade em todos os tratamentos, os quais apresentaram valores muito semelhantes entre si. Contudo, nesta mesma idade nota-se que o tratamento 1 (0,50 m<sup>2</sup>) aumentou sua conicidade porém se manteve como o espaçamento com maior fator de forma. Deve-se destacar que o maior espaçamento (41,25 m<sup>2</sup>) diferiu estatisticamente dos demais tratamentos amplos e intermediários, mas foi agrupado junto ao tratamento 3 (1,17 m<sup>2</sup>).

### 3.8. PORCENTAGEM DE CASCA

Na Figura 26 e Tabela 22 encontram-se a porcentagem média de casca por tratamento nas idades avaliadas bem como a análise comparativa das mesmas respectivamente.



**Figura 26:** Porcentagem de casca para cada tratamento aos 16 e 24 meses.

**Tabela 20:** Análise de variância para a porcentagem de casca das árvores em cada tratamento aos 16 meses.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalculado
Tratamentos	11	103,63208	9,42110	38,2940**
Resíduo	48	11,80896	0,24602	
Total	59	115,44104		

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade

**Tabela 21:** Análise de variância para a porcentagem de casca das árvores em cada tratamento aos 24 meses.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcalculado
Tratamentos	11	192,28063	17,48006	44,9745**
Resíduo	48	18,65597	0,38867	
Total	59	210,93660		

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade

**Tabela 22:** Teste de agrupamento Scott-Knott para a porcentagem média de casca das árvores em cada tratamento.

Tratamento	Área Vital (m <sup>2</sup> )	Porcentagem média de casca (%)	
		16 Meses	24 Meses
1	0,50	13,34 a	13,77 a
2	0,77	12,58 b	11,85 b
3	1,17	10,92 c	10,92 c
4	1,76	9,62 d	9,82 d
5	2,64	9,82 d	9,43 d
6	3,94	9,11 e	8,35 e
7	5,86	8,89 e	8,16 e
8	8,69	9,61 d	8,11 d
9	12,86	11,14 c	8,30 c
10	19,00	10,09 d	8,04 d
11	28,01	9,61 d	7,77 d
12	41,25	9,91 d	8,49 d

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de “Scott-Knott” com 1 % de probabilidade.

Verifica-se que o teste Skott-Knott forneceu cinco grupos distintos aos 16 e 24 meses, entretanto, nota-se que os valores médios de porcentagem de casca entre os tratamentos intermediários, amplos e alguns tratamentos adensados são muito semelhantes (Tabela 23). Os tratamentos 1 e 2 (0,50 e 0,77 m<sup>2</sup>) na duas idades avaliadas conferiram uma porcentagem média de casca superior aos demais. Vale destacar que o agrupamento formado em ambas

idades foi idêntico. Portanto, de uma forma geral, as maiores densidades de plantio favoreceram uma maior produção de casca no crescimento inicial do povoamento. Este comportamento também pode ser observado na Figura 26, em que é demonstrado uma tendência moderada de maior produção de casca nas maiores densidades de plantio, especialmente no tratamento 1 e 2.

Evidenciando este resultado observa-se nas Figuras 19 e 21 (item “4.6”) que os valores de produção volumétrica com e sem casca se aproximam com o aumento do espaçamento, ou seja, o percentual de casca diminui com o aumento do espaçamento. Resultados semelhantes foram observados por Goulart et al. (2003) os quais avaliaram o efeito do espaçamento na massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* e verificaram maior massa específica básica da casca nos espaçamentos mais adensados. Corroborando com isto, Coelho et al. (1970) observaram que o peso da madeira de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba* e *Eucalyptus propinqua* e relataram que madeiras de menores dimensões, produzidas em espaçamentos mais densos, apresentam aumento na porcentagem de casca.

## 4. CONCLUSÃO

As variáveis de crescimento e produção não apresentaram dependência espacial no povoamento avaliado;

O teste de identidade de modelos demonstrou não haver diferença nas análises de regressão considerando modelos com a inclusão e sem a inclusão das plantas adjacentes as falhas e mortes para idades iniciais. Esta conclusão é de suma relevância uma vez que toda a literatura sobre experimentos com delineamento tipo “leque” se fundamenta no princípio que é necessário retirar as plantas adjacentes as falhas e mortas.

O delineamento sistemático tipo “leque” permitiu conhecer os padrões de resposta das árvores do híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em função do espaçamento, tanto em termos de crescimento individual como conjunto, numa amplitude que não é comumente avaliada por meio de delineamentos tradicionais;

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo colaboram com as contínuas necessidades apresentadas pelo setor florestal do Brasil e no mundo. Em particular, há uma crescente demanda dos produtos do setor florestal brasileiro. E tal fator desencadeou, também, uma necessidade de maior conhecimento científico, tanto na modelagem do crescimento e produção, quanto nos tratamentos silviculturais, para que as empresas do setor possam desenvolver um planejamento correto do empreendimento florestal.

A maior parte da madeira produzida no Brasil é destinada para carvão vegetal e celulose seguida da produção de madeira industrializada juntamente com serrados e compensados. Isto evidencia a importância de se gerar conhecimento científico para atender as demandas deste setor, o qual faz uso dos multiprodutos da madeira. Ressalta-se que, o Brasil pode ser considerado um país “continental”, com uma grande variedade de solos e climas, de forma que as espécies florestais podem apresentar comportamentos bem distintos em relação ao seu desenvolvimento nas diversas regiões do país.

Assim sendo, recomenda-se, nos anos posteriores, avaliação sobre os multiprodutos gerados nos espaçamentos testados neste estudo afim de gerar conhecimento para setor florestal, especialmente para o manejo de povoamentos conduzidos em condições edafoclimáticas semelhantes ao do presente estudo.

O delineamento sistemático tipo “leque” não se mostrou eficiente apenas na amplitude de espaçamentos testados, mas demonstrou ser uma ferramenta importantíssima para nortear experimentos futuros. Uma vez conhecendo respostas do crescimento das plantas em tempo e área reduzidos (possibilitado pelo delineamento tipo “leque”) será possível, de forma otimizada, direcionar os estudos posteriores para propósitos específicos. Ou seja, com base nas informações obtidas no delineamento sistemático tipo “leque” pode-se utilizar delineamentos tradicionais, os quais se assemelham aos espaçamentos aplicados aos povoamentos de empresas do setor florestal para avaliar e/ou confirmar as respostas encontradas no delineamento tipo “leque”.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2012. 148p. Brasília, 2013.

ADAMS, T. P.; HOLLAND, E.P; LAW, R; PLANK, M.J; RAGHIB, M. 2013 On the growth of locally interacting plants: differential equations for the dynamics of spatial moments. **Ecology** **94**, 2732–2743.

ADAMS, T. P. 2010. **Reconstructing Scotland's pine forests**. Dissertation. University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland, UK.

AKHTAR, J.; SAQIB, Z. A.; QURESHI, R. H.; HAQ, M. A.; IQBAL, M. S.; MARCAR, N. E. The effect of spacing on the growth of *Eucalyptus camaldulensis* on salt-affected soils of the Punjab, Pakistan. **Can. J. Forest Res** 38:2434-2444, 2008

ALCORN, P. J., PYTTEL, P., BAUHUS, J., SMITH, R. G. B., THOMAS, D., JAMES, R., & NICOTRA, A. Effects of initial planting density on branch development in 4-year-old plantation grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* trees. **Forest Ecology and Management**, v. 252, n. 1, p. 41-51, 2007.

ALEIXO, V. **Desenvolvimento de *Jatropha curcas* (L.) em função da procedência, sistema de cultivo e densidade**. 2012. 78f. Tese de doutorado (Programa de Pós-graduação em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, PR.

ANDRADE, E. N. **A cultura do Eucalyptus**. São Paulo: Typographia Brazil de Rothschild & Cia, 1909.

ANDRADE, E N. de. **Manual do plantador de Eucalyptos**. São Paulo, Typographia Brazil de Rothschild & Comp., 1911, 343 p.

ANDRADE, E. D. **O eucalipto**. 2.ed. Jundiaí: Cia Paulista de Estradas de Ferro, 1961. 665p.

AQUINO, P. S. R. **Análise espacial da produtividade e acúmulo de serapilheira em mata de galeria**. 2013. 76 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

AQUINO, R. E. D.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A. D.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na Região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 397-406, 2014.

AQUINO, P. S. R.; NAPPO, M. E.; RODRIGUES, M. S.; PEREIRA, I. M.; MATRICARDI, E. A. T.; PELÁ, G. D. M. 2016. Análise Espacial da Produtividade de Serapilheira em Uma Mata de Galeria. **Ciência Florestal**, v. 26: p. 489-500, 2016

ARAÚJO, E. J. G., PELISSARI, A. L., DAVID, H. C., SCOLFORO, J. R. S., NETTO, S. P., & MORAIS, V. A. Relação hipsométrica para candeia (*Eremanthus erythropappus*) com diferentes espaçamentos de plantio em Minas Gerais, Brasil. **Brazilian Journal of Forest Research/Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, 2012.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon, 1970. 506 p

ASSIS, T. F. de **Melhoramento genético do eucalipto**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 12, n. 141, p. 36-46 set. 1986.

ASSIS, R. L.; FERREIRA, M. M.; CARGNELUTTI FILHO, A. ESTADO NUTRICIONAL DE *Eucalyptus urophylla* ST Blake SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS NA REGIÃO DE CERRADOS DE MINAS GERAIS. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 3, p. 151-157, 2006.

AUCHTER, R. J.: Effect of bark content on pulp properties - In: Paper Trade Journal. - 157(1973)14. - p. 28

AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements**. 5th ed. New York: MacGraw-Hill. 2002. 456 p.

BALLONI, E. A., SIMÕES, J. W. **O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais**. IPEF, p.1-26, 1980. (Série Técnica, 3).

BARBIN, D. **Planejamento e Análise Estatística de Experimentos Agronômicos**. Araçongas: Midas, 2003, 194 p.

BAR-HEN, A. Influence of missing data on compact designs for spacing experiments. **Journal of Applied Statistics**, v.29, n.8, p.1229-1240, 2002.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; MARQUESINI, M. Desempenho de modelos de relação hipsométrica: estudo em três tipos de floresta. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 60, p. 149-163, 2001.

BATISTA, J. L. F.; MARQUESINI, M.; VIANA, V. M. Equações de volume para árvores de caxeta (*Tabebuia cassinoides*) no Estado de São Paulo e sul do Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 162-175, jun. 2004.

BENIN, C. C.; WIONZEK, F. B.; WATZLAWICK, L. F. Initial assessments on the plantation of *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage deployed in different spacing. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 7, n. 1, p. 55-61, 2014.

BENOMAR, L.; DESROCHERS, A.; LAROCQUE, G. R. The effects of spacing on growth, morphology and biomass production and allocation in two hybrid poplar clones growing in the boreal region of Canada. **Trees**, v. 26, n. 3, p. 939-949, 2012.

BERNARDO, A. L. **Crescimento e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp. Sob diferentes espaçamentos na região de Cerrado de Minas Gerais**. 1995. 102 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 1995.

BERNARDO, A. L. REIS, M. G., 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.

BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização.** 2000. 256 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2000.

BERGER, R., SCHNEIDER, P. R., FINGER, C. A. G. Y HASELEIN, C. R. 2002. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Revista Ciência Florestal**, 12(2): 75-87.

BERTALANFFY, L von. A quantitative theory of organic growth. **Human Biology**, Detroit, v. 10, p. 181-213, 1934.

BERTALANFFY, L von. Quantitative laws for metabolism and growth. **Quaterly Review of Biology**, Stony Brook, v. 32, p. 217-231, 1957.

BOUVET, J.M., VIGNERON, P.H., SAYA, A., AND GOUMA, R. Trends in variances and heritabilities with age for growth traits in *Eucalyptus* spacing experiments. **Silvae Genetica**. V. 52, p. 121–132, 2003.

BOTELHO, S. A. **Espaçamento.** In: SCOLFORO, J.R. Manejo Florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, p.381- 419, 1998.

BRASIL, M.A.M., FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba* Reinw, *Eucalyptus saligna* Smith e *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden aos 5 anos de idade, em função do local e do espaçamento. **IPEF**, v. 2, n. 3, p. 129-49, 1971.

BURNHAM, K. P.; D.R. ANDERSON. Model selection and multimodel inference – A practical information-theoretic approach, 2<sup>a</sup> ed, 2003.

BURROUGH, P. A., MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems.** Oxford: University Press, 1998.

CALLEGARI-JACQUES, SINTIA M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CALEGARIO, N.; CALEGARIO, C. L. L.; MAESTRI, R.; DANIELS, R. F. Melhoria da qualidade de ajuste de modelos biométricos florestais pelo emprego da teoria dos modelos não lineares generalizados. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 69, p. 38-50, 2005.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. 2 ed. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998. Disponível em: <[http://www.dpiinpe.br/dpi/tutoriais/gis\\_ambiente/5geoest.pdf](http://www.dpiinpe.br/dpi/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf)>. Acesso em: 24 dez. 2012.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, J. C. C.; RIBEIRO, J. C. Produção dos povoamentos de Eucalyptus spp. na região do Triângulo Mineiro. **Boletim Técnico SIF**, Viçosa, n. 1, 1983. 43 p.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: Perguntas e respostas**. 4. Ed. Viçosa, UFV, 2013, 605p.

CARDOSO, D. J. **Avaliação da Influência dos Fatores Sítio, Idade, Densidade e Posição Sociológica na Relação Hipsométrica para Pinus taeda na Regiões Central e Sudoeste do Estado do Paraná**. Curitiba 1989. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná-Setor de Ciências Agrárias.

CARDOSO, D. J.; LACERDA, A. E. B.; ROSOT, M. A. D.; GARRASTAZÚ, M. C.; LIMA, R. T. Influence of spacing regimes on the development of loblolly pine (*Pinus taeda L.*) in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, V. 310, P. 761–769, 2013

CARON, B.O.; ELOY, E.; SOUZA, V. Q.; SCHMIDT, D.; BALBINOT, R.; BEHLING, A.; MONTEIRO, G. C. Quantificação da Biomassa florestal em plantios de curta rotação com diferentes espaçamentos. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 1, p. 106-112, 2015.

CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N.; SILVA, F. F.; BORGES, L. A. C.; MENDONÇA, A. R.; LIMA, M. P. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de *Eucalyptus* clonal. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 541-548, 2011.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. na madeira e carvão vegetal**. 2011.b. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2011.

CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N.; SILVA, F. F.; BORGES, L. A. C.; MENDONÇA, A. R.; LIMA, M. P. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de *Eucalyptus* clonal. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 541-548, out./dez. 2011

CHIES D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005. 123f. Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, PR, 2005.

CIU - **Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (Revisión 4)**. Naciones Unidas, Nueva York, 2009. Disponível em: <<http://unstats.un.org/unsd/cr/registry/isic-4.asp>> Acesso em 10 de novembro de 2015.

CLUTTER, J. L. et al. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.

COOK, D. B. 1963. Spacing and layout for coniferous plantations in the northeast. **Jour. Of For.** 61: 273-277.

COELHO, A.S.R.; MELLO, H.A.; SIMÕES, J.W. Comportamento de espécies de eucalipto face ao espaçamento. **IPEF**, n.1, p.29-35, 1970.

COUTO, C. S.; LATORRACA, J. V. F.; DE PAULA, J. C. M.; SOUZA, C. M.; MOROKAWA, T. Avaliação de propriedades físicas de clone de Eucalipto em diferentes espaçamentos. **Revista Forestal Latino americana**, v. 25, n. 1, p. 49-60, 2010.

COUTO, L.; LEITE, H. G.; ABRAHÃO, C.; MÜLLER, M. **Efeito do Espaçamento sobre a Produção de Biomassa em Florestas Energéticas de Eucalipto**. In: Documento Técnico RENABIO 01/2009. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/244478007\\_Efeito\\_do\\_Espaamento\\_sobre\\_a\\_Produo\\_de\\_Biomassa\\_em\\_Florestas\\_Energicas\\_de\\_Eucalipto](http://www.researchgate.net/publication/244478007_Efeito_do_Espaamento_sobre_a_Produo_de_Biomassa_em_Florestas_Energicas_de_Eucalipto)> Acesso em : 6 de outubro de 2015.

CRECHI, E.H. **Efeitos da densidade da plantação sobre a produção, crescimento e sobrevivência de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. em Misiones, Argentina**. 1996. 172 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: Jonh Wiley, 1991. 900p.

DANTAS, J. O.; SANTOS, M.J.C.; SANTOS, F.R.; PEREIRA, T.P.B; OLIVEIRA, A.V.S.; ARAÚJO, C. C.; PASSOS, C.S.; RITA, M.R. Levantamento da entomofauna associada em sistema agroflorestal. **Scientia Plena**, v.8, n. 44, p. 1-8, 2012.

DACOSTA, L. P. E. **Relações biométricas em povoamentos jovens de *Pinus taeda* L. na província de Corrientes, República da Argentina**. Santa Maria, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria.

DINARDI, A. J. **Viabilidade técnica e econômica de povoamentos de *Eucalyptus spp.* sob diferentes espaçamentos visando a produção de biomassa para energia**. 2014. 91p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, 2014.

DUARTE, J. B. **Princípios sobre delineamentos em experimentação agrícola**. 1996. 66f. Monografia (Especialização em Estatística). Instituto de Matemática e Física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 1996.

DUTRA, T. R.; GRAZZIOTTI, P. H.; SANTANA, R. C.; MASSAD, M. D. .  
Desenvolvimento inicial de mudas de copaíba sob diferentes níveis de sombreamento e substratos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 2, p. 321-329, 2012.

ENCINAS, J. I. SILVA, J. F. PINTO, J. R. R. **Idade e crescimento das árvores.** Comunicações Técnicas Florestais. Brasília: Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Florestal, v. 7, 2005. 43p

ESAU K. 1974. **Anatomia das Plantas com Sementes.** Editora Edgard Blucher Ltda., S. Paulo.

ETIGALE, E. B., AJAYI, S., UDOFIA, S. I., & MOSES, M. U. Assessment of Stand Density and Growth Rate of Three Tree Species in an Arboretum within the University of Uyo, Nigeria. **Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment**, v. 6, n. 1, p. 8-16, 2014.

EVERT, F. – **Spacing studies: a review.** *Information report. FMR-X*, Ottawa, (37): 1-95, dez.1971.

FERRAZ, A.S.; SOARES, V.P.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, C.A.A.S.; BINOTI, D.H.B.; LEITE, H.G. Estimativa do estoque de biomassa em um fragmento florestal usando imagens orbitais. **Floresta e Ambiente**, v.21, p.286-296, 2014.

FERREIRA, G. W.; GONZAGA, J. V.; FOELKEL, C. E. B.; ASSIS, T. F.; RATNIEK, E. SILVA, M. C. M. Qualidade da celulose kraft-antraquinona de *Eucalyptus dunnii* Maiden plantado em cinco espaçamentos em relação ao *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus saligna*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 41-63, 1997.

FERREIRA, G. W. D.; FERRAZ FILHO, A. C.; PINTO, A. L. R.; SCOLFORO, J. R. S. Influência do desbaste na forma do fuste de povoamentos naturais de *Eremanthus incanus* (Less.) Less. **Semina: Ciências Agrárias, Londrina**, v.35, n.4, p.1707-1720, 2014

FIEDLER, N. C.; AZEVEDO, I. N. C.; REZENDE, A. V.; MARCELO BRILHANTE DE MEDEIROS, M. B.; VENTUROILI, F. Efeito de incêndios florestais na estrutura e composição florística de uma área de cerrado *sensu stricto* na fazenda Água Limpa-DF. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v. 28, n. 1, p. 129-138, 2004.

FINGER, C. A. G. **Biometria Florestal**. Santa Maria: UFSM, 2006. 284p.

FISHWICK, R.W. **Estudos de espaçamentos e desbastes em plantações brasileiras**. *Brasil Florestal*, v.7, n.26, p.13-23, 1976.

FLATHER, C. H. Fitting species–accumulation functions and assessing regional land use impacts on avian diversity. **Journal of Biogeography**, v.23, p.155–168, 1996.

FLORIANO, E. P.; MÜLLER, I.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Ajuste e seleção de modelos tradicionais para série temporal de dados de altura das árvores. **Ciência Florestal**, v.16, n.2, p.177-199, 2006.

FOEKEL, C. **A casca da árvore do eucalipto**. [online]. 2015. [capturado em 10 nov. 2013] Disponível em <<http://www.eucalyptus.com.br>>.

FORRESTER, D.I., MEDHURST, J.L., WOOD, M., BEADLE, C.L., VALENCIA, J.C. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from Eucalyptus plantations: an Australian perspective. **For. Ecol. Manag.** v. 259, p. 1819–1835, 2010.

FORZIERI, G. Satellite retrieval of woody biomass for energetic reuse of riparian vegetation. **Biomass and Bioenergy**, v. 36, p. 432-438, 2012.

FRA – Global Forest Resources Assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO, Rome, 2015. Disponível em < <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/es/>> Acesso em 10 de novembro de 2015.

FREEMAN, G. H. The use of systematic design for a spacing trial with a tropical tree crop. **Biometrics**, n.20, p.200-203, 1964.

GARCIA, C.H.; CORRADINE, L.; ALVARENGA, S.F. Comportamento florestal do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em diferentes espaçamentos. **IPEF**, p. 1-8, 1991. (Circular Técnica, 179).

GARCIA, S.L.R. **Importância de características de crescimento, de qualidade da madeira e da polpa na diversidade genética de clones de eucalipto**. Viçosa: UFV, 1998.103 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

GERRAND, A.M., NEILSEN, W.A. Comparing square and rectangular spacings in *Eucalyptus nitens* using a Scotch plaid design. **For. Ecol. Manage.** v. 129, p. 1–6, 2000.

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, n.2, p.167-175, 2003

GOMEZ, K. A.; DE DATTA, S. K. Missing hills in rice experimentation plots. **Agronomy Journal**, n.64, p.163-164, 1972.

GOMPERTZ, B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new method of determining the value of life contingencies. **The Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 115, p. 513-583, 1825.

GONÇALVES, F. G., OLIVEIRA, J. T. D. S., SILVA, G. F. D., NAPPO, M. E., TOMAZELO FILHO, M. Parâmetros dendrométricos e correlações com propriedades tecnológicas em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.5, p.947-959, 2010.

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

GROSSER, D. **Defeitos da madeira**. Série Técnica FUPEF, Curitiba, n. 2, p. 1 - 62, 1980.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Ministério das Minas e Energia, Departamento de Produção Mineral. Brasília. 1988. 145p.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo**. Campinas: 1993. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

GUJARATI D.N.; PORTER D.C. (2011). **Econometria Básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH 924 p.

GUREVITCH J, SCHEINER SM, FOX GA. **Ecologia vegetal**. 2. ed. Porto Alegre: ed. Artmed; 2009

HAMLETT, J. M.; HORTON, R.; CRESSIE, N. A. C. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. **Soil Scienc Society of América Journal (USA)**, Madison, v. 50, p. 868-875, 1986.

HIGA, R. C. V.; STURION, J. A. EFEITO DO ESPAÇAMENTO NA CAPACIDADE DE BROTAÇÃO DE *Eucalyptus viminalis*. **Boletim de pesquisa florestal**, v. 40, p. 77, 2000.

HILEY, W. E. **Conifers: South African methods of cultivation**. London: Faber and Faber, 1959. 123 p

HOFFMANN, R. & BERGER, R. Determinação da idade ótima de corte de povoamentos de *Eucalyptus*. **IPEF**, Piracicaba. v.7: p. 49-69,1973.

HOLLIDAY,R. Plant population and crop yield. **Nature**, Washington, 186: 22-4, 1960.

HOOP, C. F. de; KLEIT, S.; CHANG, S. J.; GAZO, R.; BUCHART, M. E. Survey and mapping of wood residue users and producers in Lousiana. **Forest Products Journal**, v. 47, n. 3, 31-37 p, 1997.

INOUE, M. T.; FIGUEIREDO-FILHO, A.; ARAÚJO, A. J.; LIMA, R. Crescimento juvenil de Pinus taeda em função do espaço vital de crescimento. **Revista Floresta**, v. 41, p. 57-62, 2011.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JORGENSEN, J. S. - 1967 - The influence of spacing on the growth and development of coniferous plantations. In International Review of Forestry Research. Academic Press New York -London. Vol. 2: 43-88.

JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. G. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento. **BNDES Setorial**, n.16, p.3-30, 2002

KIRONGO. BB, MBELASE AS, SENELWA K, HITIMANA J, ETIÉGNI L. Spacing and genotype on height and diameter growth of four eucalyptus under short rotation. **Jurnal Manajemen Hutan Tropika** v.18 n.1, p.1-9, 2012.

KLEIN, J.E.M.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G.; FLEIG, F.D. Produção de madeira e casca de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild) em diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**. Santa Maria. v. 2, n.1, p. 87-97, 1992.

LAMONACA, A.; CORONA, P.; BARBATI, A. Exploring forest structural complexity by multi-scale segmentation of VHR imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 2839-2849, 2008.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2ª. Edição, São Paulo: Editora Unesp, 2003. 253p.

LARSON, P. R. et al. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines**. A synopsis. General Technical report 129, USDA Forest Service. 2001. 42 p.

LARSON, P. R. **Wood formation and the concept of wood quality**. Yale Univ. Sch. For. Bull n. 74,1969. 45 p

LEE, Y. Predicting mortality for even-aged stands of lodgepole pine. **Forestry Chronicle**, Saint Annede-Bellevue, v. 47, n. 1, p. 29-32, 1971

LEITE, F. P. et al. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 313-321, jul./ set. 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*, v. 30, n.4, p. 603-613, 2006.

LELES, P. S. S.; ABAURRE, G. W.; ALONSO, J. M.; NASCIMENTO, D. F.; LISBOA, A. C. Crescimento de espécies arbóreas sob diferentes espaçamentos em plantio de recomposição florestal. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 231-239, 2011.

LELES, P. S. DOS S.; MACHADO, T. F. F.; ALONSO, J. M.; DE ANDRADE, A. M.; SILVA, L. L. da. Crescimento e Biomassa de *Melia azedarach* L. em Diferentes Espaçamentos e Características Tecnológicas da Madeira Visando à Produção de Carvão. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 214-223, 2014

LIMA, I.L. **Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden**. 2005. 137 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2005.

LIMA, I.L.; GARCIA, J. N. Efeito do desbaste e da fertilização na porcentagem de casca e conicidade de toras de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 305-312, abr./jun. 2011

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. München: BLV. Verlagsgesellschaft, 1973, v2, 469p.

LOPES, S. J., STORCK, L., DAL'COL LÚCIO, A., LORENTZ, L. H., LOVATO, C., & DIAS, V. D. O. Tamanho de parcela para produtividade de grãos de sorgo granífero em diferentes densidades de plantas. **Pesq. agropec. bras**, v.40, n.6, p.525-530, 2005.

LOUREIRO, G. H. **Diagrama de manejo da densidade para *Araucaria angustifolia*** (Bert.) o. Ktze. 2013. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MACEDO, R. L. G.; GOMES, J. E.; VENTURIN, N.; SALGADO, B. G. Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* Lf (teca) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. **Cerne**, v. 11, n. 1, p. 61-69, 2005.

MACHADO, S. do A.; SOUZA, R. F.; APARECIDO, L. M. T.; RIBEIRO, A. CZELUSNIAK, B. H. Evolução das variáveis dendrométricas da Bracatinga por classe de sítio. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 199-207, 2015.

MAGALHÃES, S. R.; VEIGA, R. D.; SÁFADI, T.; CIRILLO, M. A.; MAGINI, M. Avaliação de Métodos para Comparação de Modelos de Regressão por Simulação de Dados. **Semina**, Londrina, v.25, n.2, p.-117-122, jul./dez. ,2004.

MAGALHÃES, W. M.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; HIGASHIKAWA, E. M.; YOSHITANI JÚNIOR, M. Desempenho silvicultural de clones e espécies/procedência de eucalyptus na região noroeste de minas gerais. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 368-375, 2007. <<http://www.redalyc.org/pdf/744/74413404.pdf>> 16 Jun. 2016.

MAINARDI, G. L.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Produção de *Pinus taeda* L. na região de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 39-52, 1996.

MALAN, F.S., HOON, M., 1992. Effect of initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal** 163: 13-20.

MANKIW, N. G. A quick refresher course in macroeconomics. **Journal of Economic Literature**, dez. 1990. V.XXVIII, p. 1.648.

MARK, W. B. 1983. Spacing trials using the Nelder wheel, in: Standiford R.B., Ledig F.T. (Eds.) Proceedings of a work shop on Eucalyptus in California. USDA For. Serv., Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, CA, Gen. Tech. Rep., PSW-69, pp 81-86.

MARQUES, I. C. **Uso de composto orgânico e espécies do cerrado na revegetação de área remanescente da extração de cascalho em Diamantina-MG.** 2012. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG.

MARTINI, Augusto J. **O plantador de eucaliptos: A questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade.** Dissertação (Mestrado em História Social) – Programa de Pós-Graduação em Historia Social, Universidade de São Paulo, 2004, p.332.

MELLO, H. A. et al. Influência do espaçamento na produção de madeira de eucalipto em solo de cerrado. *IPEF*, n. 2/3, p. 3-30, 1971

MELLO, H. A.; RENSI COELHO, A. S. CIERO NETTO, A.; SIMÕES, J. W.; BERGER, R.; COUTO, H. T. Z. A. Influencia da espécie, do espaçamento e da idade no custo de produção de madeira industrial. *IPEF*, n. 5, p. 17-28, 1972.

MELOTTO, A. M. **Massa de forragem e valor nutritivo de três capins em sistema silvipastoril com eucalipto.** 2014. 33f. Tese de doutorado (Pós-Graduação em Agronomia/Produção Vegetal) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

MENDES, J.B. **Estratégias e Mecanismos Financeiros para Florestas Plantadas.** Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. 2005. 66p.

MENDES, P. N. **Ajuste dos modelos Gompertz e Logístico na descrição das curvas de crescimento de tomates: uma abordagem bayesiana.** 2011. 82f. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MESKIMEN, G.; FRANKIN, E.C. Spacing *Eucalyptus grandis* in Southern Florida. **Southern journal of applied forestry**, Washington, 1(1): 3-6, 1978.

MESKIMEN, G., FRANKLIN, E.C., 1978. Spacing *Eucalyptus grandis* in southern Florida. A question of merchantable versus total volume. *S.J. Appl. For.* 2, 3±5.

MIGLIORINI, A. J.; BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Influência das práticas silviculturais na produção de carvão vegetal. **IPEF**, Circular técnica nº 104, 5p.,1980.

MILANI, E.J.; SCHNEIDER, P.R.; CUNHA T.A. Crescimento em diâmetro de árvores de *Podocarpus lambertii* em duas regiões fitogeográficas no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Ciência Florestal*, **Santa Maria**, v. 23, n. 2, p. 443-448, abr.-jun., 2013.

MILLER, J., FRANKLIN, J., ASPINALL, R. Incorporating spatial dependence in predictive vegetation models. **Ecological Modelling**, v.202, p.225-242, 2007.

MINAMI, K. **Análise de crescimento e densidade de população de *Solanum mlongera* L. Berinjela, cultivada em delineamento sistemático e convencional.** 1977. 81p. Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queriroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

MIRANDA, G. M. **Análise econômica de dois sistema de descascamento de madeiras de eucaliptos.** 2000. 39 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

MONTAGNA, R. G. ; KRONKA, F. J. N. ; MAINIERI, C. ; DIAS, R. A. ; KRONKA, S. N. . Estudo sobre o crescimento e a densidade da madeira de *Pinus elliottii* Eng. var. *elliottii* em função do espaçamento. **Silvicultura Em São Paulo**, São Paulo, v. 8, p. 33-52, 1973.

MORAES, M. A.; DE MORAES, S. M. B., DA SILVA, E. C. B., KUBOTA, T. Y. K., SILVA, A. M., DE RESENDE, M. D. V., MORAES, M. L. T. Variação genética em progênies de *Jacaranda cuspidifolia* Mart. utilizando o delineamento sistemático tipo “leque”. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 175-183, jun. 2013

MORAES NETO, S. P. de. et al. Produção de mudas de seis espécies arbóreas, que ocorrem nos domínios da floresta atlântica, com diferentes substratos de cultivo e níveis de luminosidade. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 3, p. 277-287, 2001.

MORAIS, V. M. **Dinâmica de crescimento de eucalipto clonal sob diferentes espaçamentos, na região noroeste do estado de Minas Gerais**. 2006. 63f. Dissertação (Programa de Pós graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2006.

MORI, E.S.; LELLO, L.R.B.; KAGEYAMA, P.Y. Efeitos da interação genótipo x ambiente em progênes de *Eucalyptus saligna* Smith. **IPEF**, n.33, p.19-25, 1986.

MORI, E.S, KAGEYAMA, P.Y.; FERREIRA, M. Variação genética e interação progênes X locais em *Eucalyptus urophylla*. **IPEF**, n.39, p.53-63, 1988.

NAMKOONG, G. Application of Nelder's designs in tree improvement research. In: SOUTHERN CONFERENCE ON FOREST TREE IMPROVEMENT, 8., 1965, Savannah. **Proceedings...** Macon: SCFTI, 1966. p. 24-37.

NASCIMENTO, A. S. **Avaliação de sistemas agroflorestais utilizando o modelo experimental Nelder como alternativa sustentável para a agricultura familiar no Estado de Sergipe, Brasil**. 2011. 92f. Dissertação (Mestrado em Agrossistemas), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.

NASCIMENTO, D. F. D.; LELES, P. S. D. S.; OLIVEIRA NETO, S. N. D.; MOREIRA, R. T. S.; ALONSO, J. M. Crescimento inicial de seis espécies florestais em diferentes espaçamentos. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 159-165, 2012.

NAVARRO, Daniel J.; MYUNG, In Jae. **Model evaluation and selection**. Columbus, USA: Ohio State University, Department of Psychology, 2004. 6p.

NEILSEN, W.A., GERRAND, A.M. Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacing and the effect on final crop selection, **For. Ecol. Manage.** v.123, p. 217-229, 1999.

NELDER, J. A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, n.18, p.283-307, 1962.

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**, Viçosa, v. 32, p. 855 - 860, 2008.

NUTTO, L.; TONINI, H.; BORSOI, G. A.; MOSCOVICH, F. A.; SPATHELF, P.; FINGER, C. A. G. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 42, p. 110-122, 2001.

ODA, M. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque**. 2005. 72f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2005.

ODA-SOUZA, M.; BARBIN, D.; RIBEIRO JR, P. J.; STAPE, J. L.. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 499-509, 2008.

OLIVEIRA NETO, S. N. et al. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, 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, G.; DE MELLO, J.; ALTOÉ, T.; SCALON, J.; SCOLFORO, J.; PIRES, J. Equações hipsométricas para *Eucalyptus spp.* não manejado em idade avançada com técnicas de inclusão de covariante. **Cerne**, v.21, n.3, p.483-492, 2015.

OLIVEIRA, T.K. de; 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.; DIAS, A. N.; MACHADO, S. D. A.; LIMA, R. Efeito da densidade inicial no crescimento de *Pinus taeda* L. na região Centro Sul do Paraná. **Sci. For., Piracicaba**, v. 43, n. 106, p. 353-365, jun. 2015

PADOIN, V.; FINGER, C. A. G. Relações entre as dimensões da copa e a altura das árvores dominantes em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Ci. Fl.**, v. 20, n. 1, 2010.

PATIÑO VALERA, F. Interação genótipo x espaçamento em progênies de *Eucalyptus saligna* Smith. **IPEF**, v.39, n.2, p.5-16, 1988.

PAULESKI, D. T. **Influência do espaçamento sobre o crescimento e a qualidade da madeira de *Pinus taeda* L.** 2010.196p. Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

PAULINO, E. J. **Influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica em plantios de eucalipto.** 2012. 59p. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Faculdade de Ciências Agrárias, Diamantina, MG, 2012.

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

PEREIRA, M.C.T.; SALOMAO, L.C.C.; SILVA, S.O.; SEDIYAMA, C.S.; COUTO, F.A.D'A.; SILVA NETO, S.P. Crescimento e produção de primeiro ciclo da bananeira “Para Anã” (AAB) em sete espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.35, n.7, p. 1377-1387, jul. 2000.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal**. 2012. 93f. Dissertação (Mestrado- Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PEZZUTTI R. V. 2011. **Efeitos biológicos e econômicos de tratamentos silviculturais em plantios de *Pinus taeda* L. No nordeste argentino**. 2011. 179f. Tese (Doutorado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

PINKARD, E.A., NEILSEN, W.A., 2003. Crown and stand characteristics of Eucalyptus nitens in response to initial spacing: implications for thinning. **For.Ecol. Manage.** 172, 215–227.

PIRES L.M., CALEGARIO N. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não-lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. **Revista Árvore**, v.31, n.5, p.845-852, 2007

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura Forestal**. San José, Costa Rica: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1997. 586p.

PRYOR, L. **Aspectos da cultura do eucalipto no Brasil**. IPEF, Piracicaba, n. 213, p. 53 - 59, 1971.

PRYOR, L. O. **Biology of Eucalyptus**. London: E. Arnold, 1976. 82 p. (Studies in Biology, 61.)

PURVES, D. W., AND R. LAW. 2002. Experimental derivation of functions relating growth of *Arabidopsis thaliana* to neighbor size and distance. **Journal of Ecology** 90:882–894.

RAO,M.R.; SHARMA,M.M.; ONG,C.K. A study of the potential of hedgerow intercropping in semi-arid India using a two-way systematic design. **Agroforestry Systems**, The Hauge, **11**:243-58, 1990.

REINER, D. A.; SILVEIRA, E. R.; SZABO, M. S. O uso do eucalipto em diferentes espaçamentos como alternativa de renda e suprimento da pequena propriedade na região sudoeste do Paraná. **Synergismus scyentifica**, Pato Branco, v. 6, n. 1, p. 10 - 18, 2011.

REGAZZI, A.J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. **Revista Ceres**, v.50, p.9-26, 2003.

REMADE. **O eucalipto e suas origens**. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=20](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=20)> Acesso em: 10 de novembro de 2015.

REZENDE, G.C.; SUITER FILHO, W.; MENDES, C.J. Novas técnicas de espaçamento para *Eucalyptus* spp. **Circular técnica IPEF**, n.130, p.1-9, 1981.

RIBEIRO, F. de A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, n.46, p.76-85, 1993.

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. 71f. Dissertação (Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

RODRIGUES, M. S. **Variabilidade espacial de atributos do solo e da produtividade de milho**. 2010. 102 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós graduação em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP, 2010.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Soil sampling intensity and spatial distribution pattern of soils attributes and corn yield in no-tillage system. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 5, p. 852-865, 2012.

**RODRIGUES, M. S.** Análise espacial e temporal de atributos do solo e da produtividade das culturas visando manejo específico em áreas agrícolas. **2013. 90 p. Tese de Doutorado**

(Programa de Pós graduação em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP, 2013.

ROSA, S. F. **Propriedades Físicas e Químicas do Solo e Crescimento de *Eucalyptus dunnii* Maiden em diferentes espaçamentos de plantio.** 2013. 96p. Tese de Doutorado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

ROSSI, L.M.B.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. Modelagem da mortalidade em florestas naturais. **Revista Floresta**, v.37, p.275-291, 2007.

RUY, O. F. **Variação da qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia.** Piracicaba, 1998. 69 p. Dissertação (Mestrado) – Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo.

SALLES, T. T.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SOARES, C. P. B.; PAIVA, H. N.; SANTOS, F. L. Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração Lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, p. 253 -260, 2012

SANQUETTA, C.R.; ARCE, J. E.; MELLO, A. A.; SILVA, E. Q.; BARTH, N.; MATOSKI, S. L. S.; **Produção de madeira livre de nós em povoamentos de *Pinus taeda* em função da densidade de plantio.** Cerne, Lavras, v. 9, n. 2, p. 129-140, 2003.

SANQUETTA, C. R.; WEBER, S. H.; FORMAGINI, F.; BARBEIRO, L. S.; VIEIRA, G. Equações individuais e determinação de classes de crescimento para *Nectandra grandiflora* Ness. a partir de dados de análise de tronco. **Scientia Agrária**, Piracicaba, v. 11, n. 1, p. 1-8, 2010.

SANTOS, V. T. M. **Aplicação de classificação digital de imagens orbitais no mapeamento de uso da terra.** 122p. Dissertação (Programa de Pós graduação em Geologia). Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 173p. Tese (Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras. p. 173, 2010.

SANTOS, M. D. dos. **Efeito do espaçamento de plantio na biomassa do fuste de um clone híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla***. 2011. 140f. Dissertação (Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal) Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu, Botucatu, SP.

SARTÓRIO, I. P. **Avaliação e modelagem do crescimento de florestas energéticas de eucalipto plantadas em diferentes densidades**. 2014. 136 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2014.

SCALON, S. P. Q.; MUSSURY, R. M.; RIGONI, M. R.; SCALON FILHO, H. Crescimento inicial de mudas de *Bombacopsis glabra* (Pasq.) A. Robyns sob condição de sombreamento. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p.753-758, 2003.

SCHNEIDER, P. R. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF-FATEC, 1993. 348p

SCHNEIDER, P.R.; FLEIG, F.D.; FINGER, C.A.G. et al. Crescimento da acácia-negra, *Acacia mearnsii* De Wild., em diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.10., n. 2, p. 101-112, 2000.

SCHNEIDER, M. K., R. Law, and J. B. Illian. Quantification of neighbourhood-dependent plant growth by Bayesian hierarchical modelling. **Journal of Ecology**, v.94:310–321, 2006.

SCHNEIDER, P. S. P. **Autodesbaste e diagrama de manejo da densidade em Povoamentos de *Pinus taeda* L.** 95f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Florestal)- Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G.; SCHNEIDER, P.S.P.; FLEIG, F.D.; CUNHA, T.A. 2015. Influência do espaçamento no autodesbaste de povoamento monoclonal de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal** 25(1): 119-126. 2015

SCHONAU, A.P.G., 1974. The effect of planting, espacement and pruning on growth, yield and timber density of *E. grandis*. **South African Forestry Journal**, N. 88, pp. 16-23, 1974.

SCHONAU, A.P.G. Silvicultural consideration for high productivity of *Eucalyptus grandis*. **For. Ecol. Manage.** v.9, p.295-314, 1984.

SCHONAU, A.P.G., Coetzee, J. Initial spacing, stand density and thinning in eucalypt plantations. **For. Ecol. Manage.** v.29, p. 245-266, 1989.

SCOLFORO, J.R.S. **Manejo Florestal**. Universidade Federal de Lavras. FAPE. Lavras, 1997, 433p.

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO, A.F. **Biometria Florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 310p.

SCOLFORO, J. R. et al. Estimativas de volume, peso seco, peso de óleo e quantidade de moirões para a candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish). **Cerne**, vol. 10, nº. 1, pg. 87- 102, Lavras, 2004.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C.R. 2004. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. UFLA/FAEPE, Lavras. 285p.

SCOLFORO, J. R. **O mundo eucalipto: os fatos e mitos de sua cultura**. Rio de Janeiro: Mar de Ideias, 2008. v. 1, 72 p.

SEREGHETTI, G. C. **biomassa inicial do híbrido *Eucalyptus urophylla* vs. *Eucalyptus grandis* em diferentes espaçamentos**. 2012. 41f. Dissertação (Mestrado em Ciência

Florestal)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

SEVERINO, L. S.; MORAES, C. R. A.; GONDIM, T. M. de S.; CARDOSO, G. D.; BELTRÃO, N. E. de M. Crescimento e produtividade da mamoneira influenciada por plantio em diferentes espaçamentos entre linhas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 1, p. 50-54, 2008.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Florestas do Brasil em resumo – 2013: dados de 2007-2012. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro – SFB, 2013.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v.52, p.591-611, 1965.

SHELBOURNE, C. Genotype environment interaction: its study and its implications in forest tree improvement. **In: IUFRO GENETIC SABRAO JOINT SYMPOSIA**, Tokyo, 1972. Proceedings. Tokyo, 1972. p. B-1 (I) 1-27.

SHEPHERD, G.M.; KOCH, C. The synaptic organization of the brain. Oxford University Press, New York, 1990.

SILVA, R. S. D., VENDRUSCOLO, D. G. S., ROCHA, J. R. M. D., CHAVES, A. G. S., SOUZA, H. S., & MOTTA, A. S. D. Desempenho Silvicultural de *Tectona grandis* L. f. em Diferentes Espaçamentos em Cáceres, MT. **Floresta e Ambiente**, n. AHEAD, p. 0-0, 2016. Floresta Ambient., ahead of print Epub May 24, 2016. <<http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.143015>>

SILVA, C. R. **Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de Eucalyptus na região nordeste do Estado de São Paulo**. 2005. 50f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2005.

SILVA, J. C.; RECH, C. O eucalipto e suas origens. **Revista da Madeira**, São Paulo, v. 59, p. 10-12 set. 2001.

SILVA, J. A. A. da; MEUNIER, I. M. J; FERRAZ, I. Modelagem do crescimento em altura de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit., em solos do agreste de Pernambuco. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 20, n. 4, p. 443-450, 1996.

SIMÕES, J. V.; COELHO, A. S. R.; MELLO, H. A.; COUTO, H. T. Z. Crescimento e produção de madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, (20):77- 97, jun. 1980.

SMITH, D.M., 1962 - **The practice of silviculture**. John Wiley & Sons, New York -London. 578 p.

SMITH, H.D. & ANDERSON, O. Economically optimum spacing and site preparation for slash pine plantations. NCSU. **School of Forest Resources. Technical report**, Raleigh (59), 1977.

SMITH, J.H.G. Forest management information needs: Present and future. In: BROWN, K.M., CLARKE, F.R. **Forecasting forest stand dynamics**. Thunder Bay: Lakehead University, 1980. p.1-41.

SNIF-Sistema Nacional de Informações Florestal. Produção Florestal. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/cadeia-produtiva>> Acesso em 10 de novembro de 2015.

SINGH, S. K.; VERMA, C. L.; SHARMA, D. K. Plant height model for Eucalyptus plantations for biodrainage use. **International Journal of Research in Engineering and Technology** 3: 250–259, 2014.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: Editora UFV, 2007, 276p.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p.51-58, 2004.

SPELTZ, R. **Avaliação econômica integrada de regimes de manejo em Pinus taeda L. direcionados a múltiplos produtos da madeira.** 151f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

SPURR, S. H. **Forest inventory.** New York: The Ronald Press, 1952.

STAPE, J.L.; BALLONI, E.A.; ZANI FILHO, J. Planejamento técnico em plantios florestais na Ripasa. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 18, p. 1-43, 1988.

STAPE, J. L. **Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais.** 1995. 104p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

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

STURION, J. A; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S.. Qualidade da madeira de *Eucalyptus vimianalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 16, pp. 55-59, Colombo, 1988.

SCHULZ, D.G.; FEY, R.; MALAVASI, U.C.; MALAVASI, M. de M. Crescimento de pinhão-mansão em função da área útil e do consórcio com Tifton 85. **Revista Floresta**, v.44, p.207-216, 2014

TENNENT, J.H.G. Competition quotient in young *Pinus radiata*. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, 5 (2):230-4. 1975.

TETIO-KACHO, F. GARDNER, F. P. Responses of maize to plant population density. II. Reproductive development, yield and yield adjustment. **Agronomy Journal**, Madison, v.80, n.5, p.935-940, 1998.

TJØRVE, E. Shapes and functions of species–area curves: a review of possible models. **Journal of Biogeography**, v.30, p.827–835, 2003

TOLEDO, R.E.B.; DINARDO, W.; BEZUTTE, A.J.; ALVES, P.L.C.A.; PITELLI, R.A. Efeito da densidade de plantas de *Brachiaria decumbens* Stapf sobre o crescimento inicial de mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden. **Scientia Forestalis**, v.60, p.46-52, 2001.

TONINI, H. **Crescimento e produção de clones de *Eucalyptus saligna* Smith, na depressão central e serra do sudoeste, Rio Grande do Sul.** 2003. 289f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M.F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n. 7, p. 633-638, 2005.

TOUMEY, J.W. and C. F. KORSTIAN, 1957 - Seeding and planting in the practice of forestry. John Wiley & Sons, New York - 520 p.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.38, n.1 p.45-94, 1985.

TSOUMIS, G. (1987) – Science and Technology of wood structure. Properties, Utilization. Van Nostrand Reinhold, New York, 494 pág.

TURNBULL, K. J. **Population dynamics in mixed forest stands: a system of mathematical models of mixed stand growth and structure.** Washington, 1963. 186f. Dissertation (Magister Science) - University of Washington, Washington, 1963.

VALERI, S. V.; SOARES R. V. e MONTEIRO, R. F. R. Exportação de biomassa de povoamentos de *Pinus taeda* L. desbastados em diferentes idades. **Floresta** v.19 n.1/2, p. 23-29, 1989.

VANCLAY, J. K., LAMB, D., ERSKINE, P. D., & CAMERON, D. M. Spatially explicit competition in a mixed planting of *Araucaria cunninghamii* and *Flindersia brayleyana*. **Annals of forest science**, v. 70, n. 6, p. 611-619, 2013.

VAN LAAR, A. The growth of unthinned *Pinus patula* in relation to spacing. **South African Forestry Journal**, Johannesburg, V. 107, p. 3-11, jun. 1978.

VENDRUSCOLO, D. G. S., CHAVES, A. G. S., MEDEIROS, R. A., DA SILVA, R. S., SOUZA, H. S., DRESCHER, R., LEITE, H. G. Estimativa da altura de árvores de *Tectona grandis* Lf utilizando regressão e redes neurais artificiais. **Nativa**, v. 5, n. 1, p. 52-58, 2017.

VENTURIN, N. CARLOS, L. SOUZA, P. A.; MACEDO, R.L. G.; VENTURIN, R. P.; HIGASHIKAWA, E. M. Desempenho silvicultural de *Acrocarpus Fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 629-636, 2014.

VIDAURRE, G. B.; NUTTO, L.; FRANÇA, F. J. N.; BRAZ, R. L.; WATZLAWICK, L. F.; MOULIN, J. C. Tensão de Crescimento no Lenho de *Eucalyptus benthamii* e sua Relação com Características Dendrométricas em Diferentes Espaçamentos. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 408-415, 2015.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, T. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, P. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.1-54, 2000.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M.; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, 10 (2):151-60, 1986.

VITAL, B. R.; ANDRADE, A. M. de; VALENTE, O. F.; CAMPOS, J. C. C. Influência da casca no rendimento e qualidade de carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 41/42, p. 44-49, jan./dez. 1989.

XUE, L., PAN, L., ZHANG, R., XU, P.B., 2011. Density effects on the growth of self-thinning *Eucalyptus urophylla* stands. **Trees**. 25, 1021–1031.

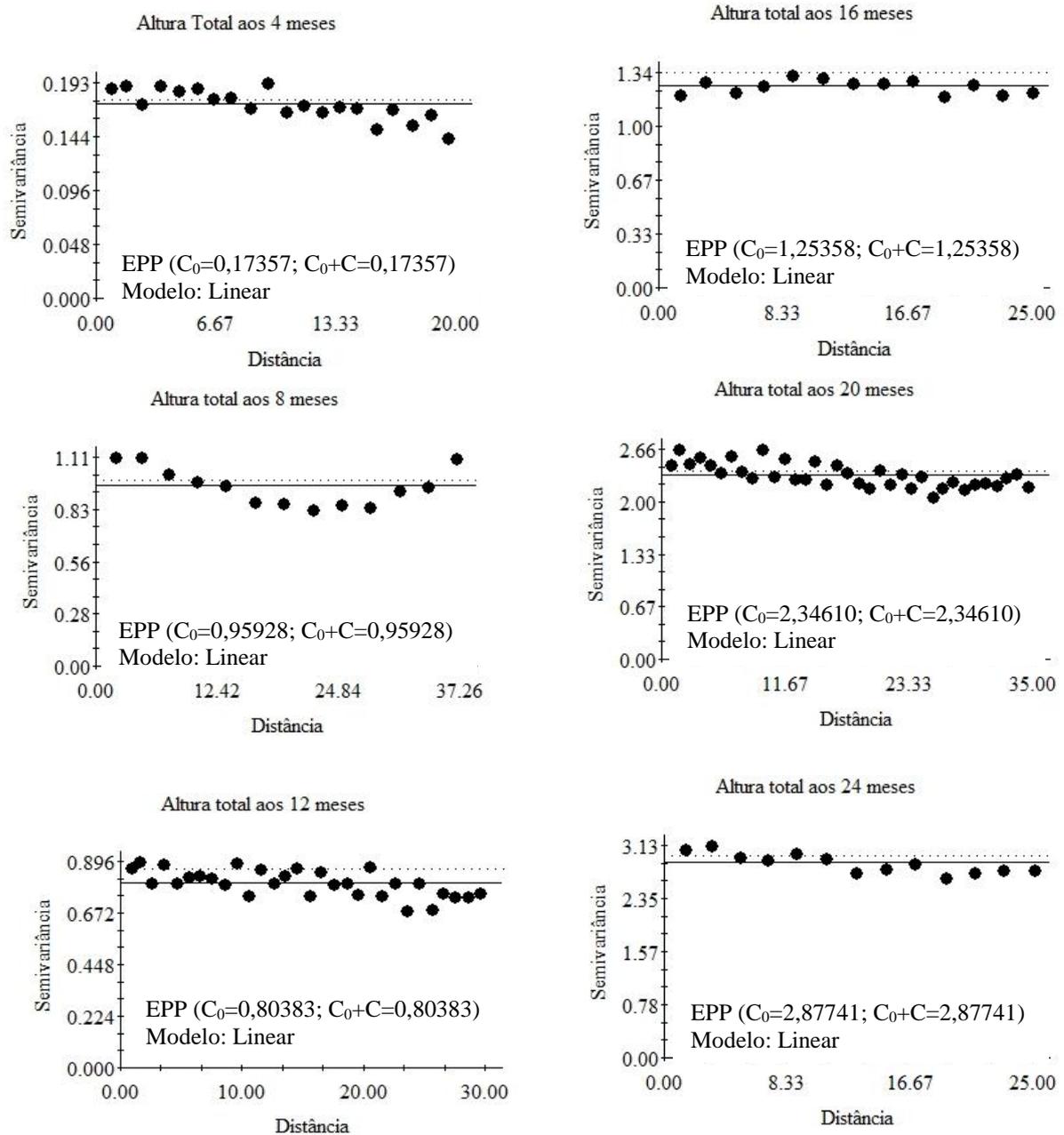
WILKINSON, G.N.; ECKERT, S. R.; HANCOCK, T.W.; MAYO, O. Nearest neighbor (NN) analysis of field experiments. **Journal of Royal Statistical Society B (Methodological)**, London, 45(2): 151-211, 1983.

ZEIDE, B. Analysis of growth equations. **Forest Science** v. 39: p. 594–616, 1993.

ZEN, S. Influência da matocompetição em plantas de *Eucalyptus grandis*. IPEF. **Série Téc.**, n.12, p.25-35, 1987.

ZOETTL, H. W. Possibilidades de utilização da casca de essencias florestais para o melhoramento do solo. **Revista Floresta**, 11(2): 45-51, 1980.

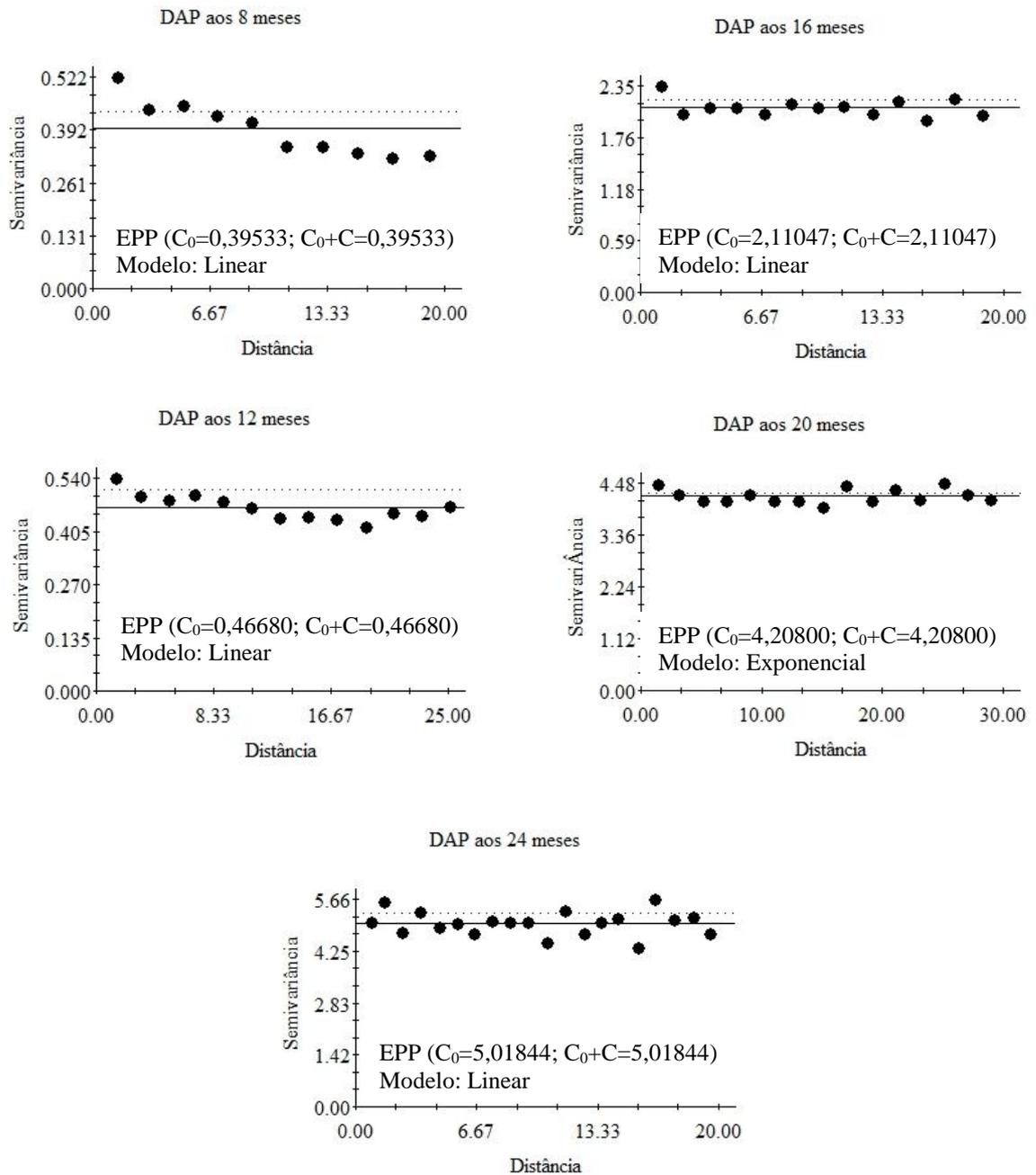
## APÊNDICE A



**Figura A:** Semivariograma dos dados de altura total (m) obtidos no experimento em delineamento sistemático tipo “leque” com 12 tratamentos e 36 repetições de com híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

EPP= Efeito pepita puro;  $C_0$  = Efeito pepita;  $C_0 + C$  = Patamar;

## APÊNDICE B



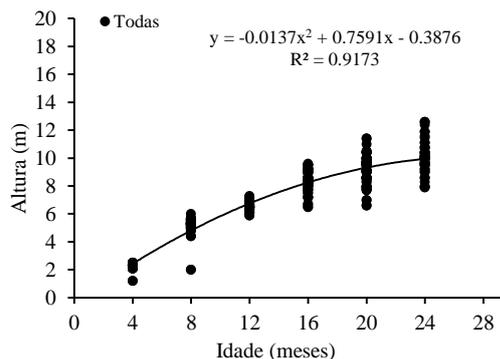
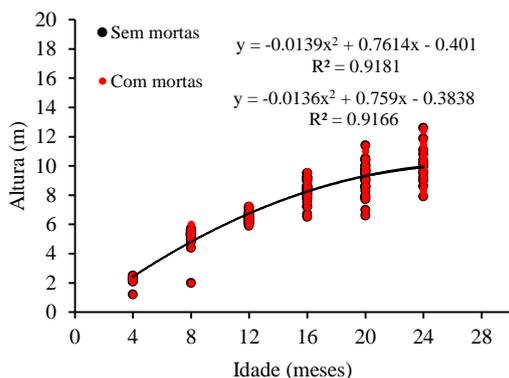
**Figura B.** Semivariograma dos dados de diâmetro (DAP) obtidos no experimento em delineamento sistemático tipo “leque” com 12 tratamentos e 36 repetições de com híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

EPP= Efeito pepita puro;  $C_0$  = Efeito pepita;  $C_0 + C$  = Patamar;

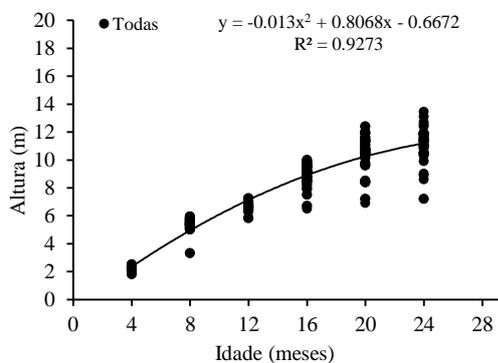
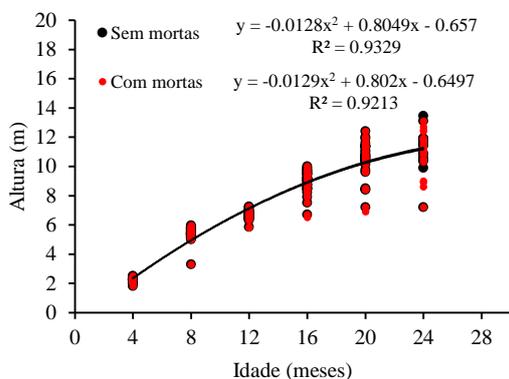
## APÊNDICE C

### Curvas de crescimento da variável altura total em função da idade nos diferentes tratamentos

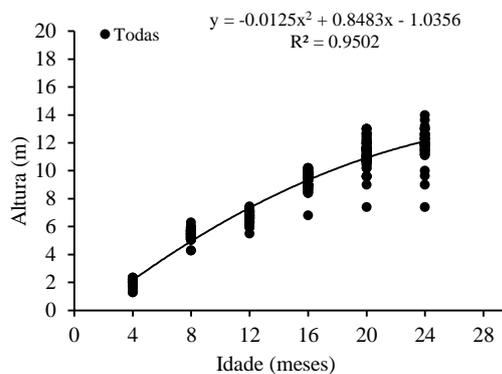
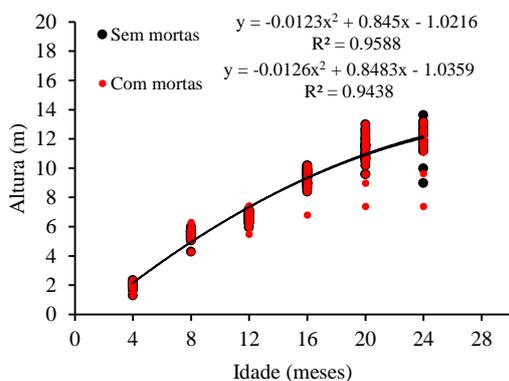
#### Tratamento 1



#### Tratamento 2

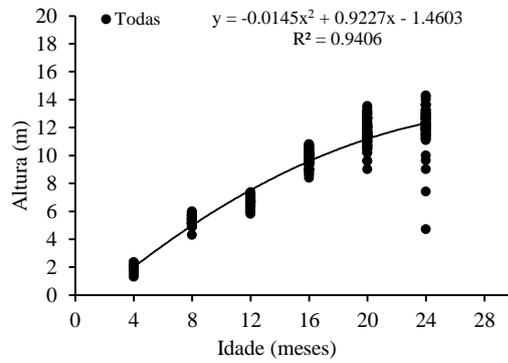
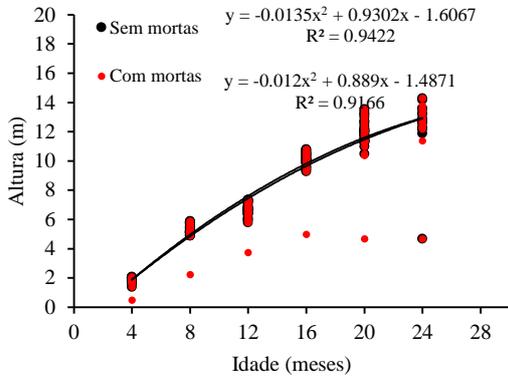


#### Tratamento 3

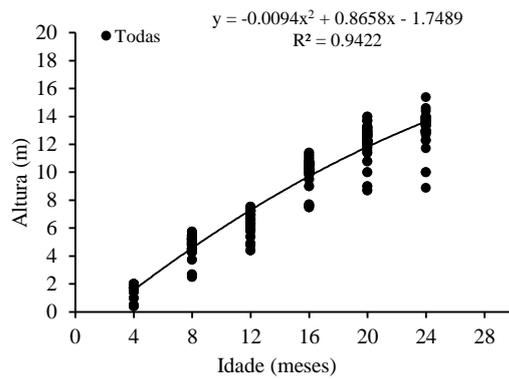
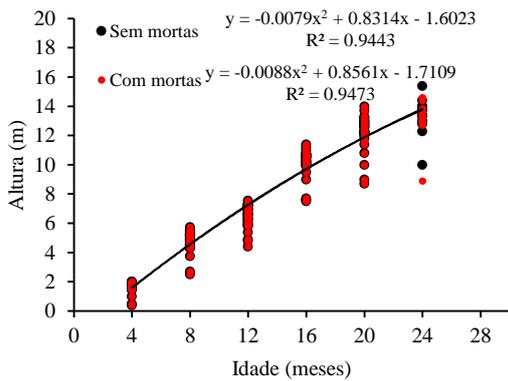


## Curvas de crescimento da variável altura total em função da idade nos diferentes tratamentos

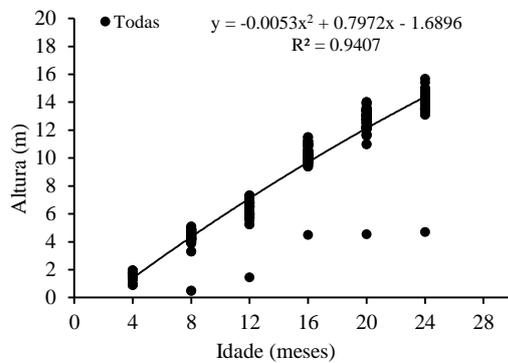
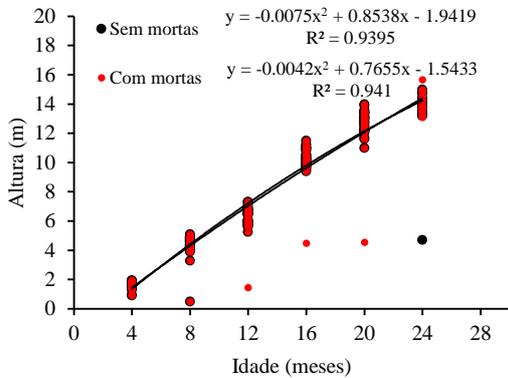
### Tratamento 4



### Tratamento 5

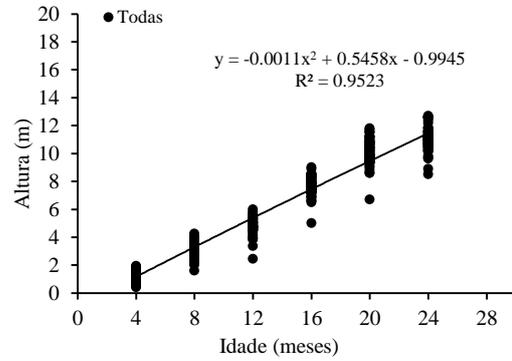
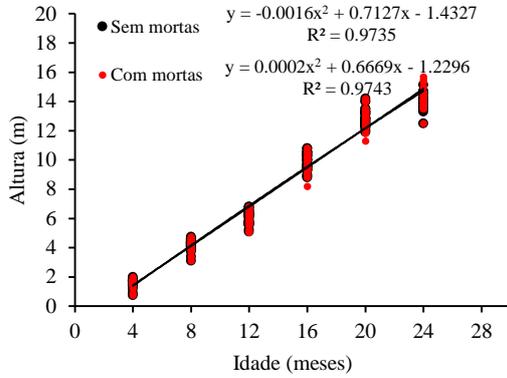


### Tratamento 6

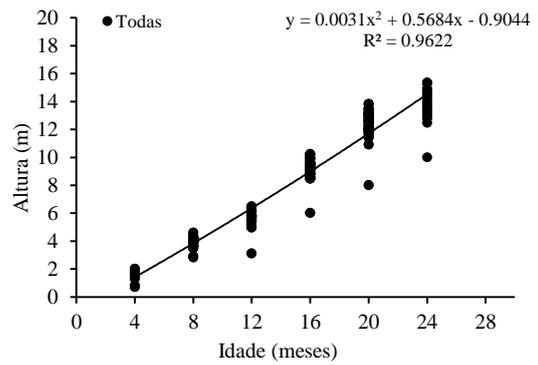
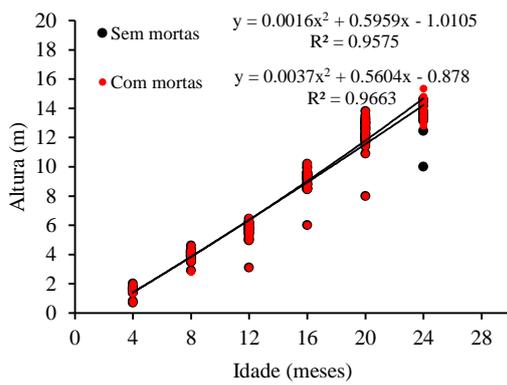


## Curvas de crescimento da variável altura total em função da idade nos diferentes tratamentos

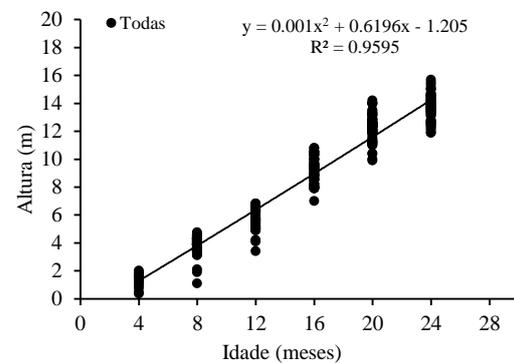
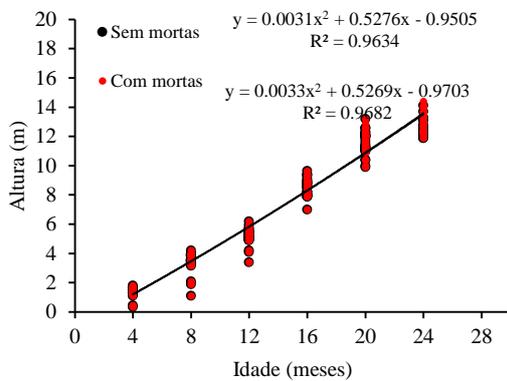
### Tratamento 7



### Tratamento 8

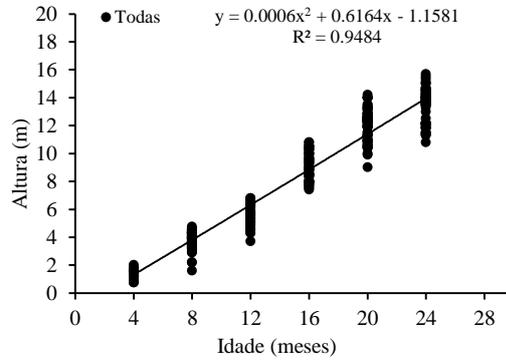
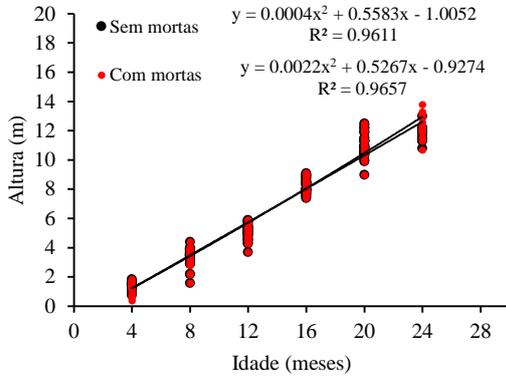


### Tratamento 9

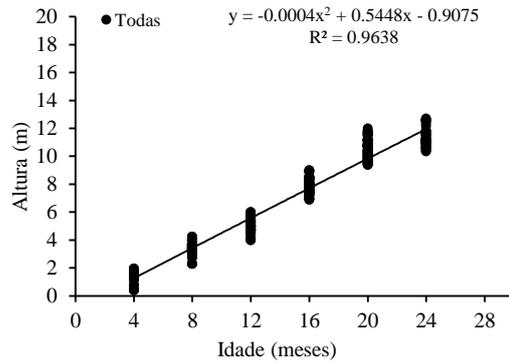
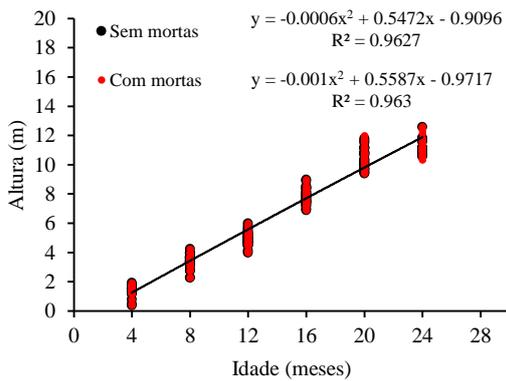


## Curvas de crescimento da variável altura total em função da idade nos diferentes tratamentos

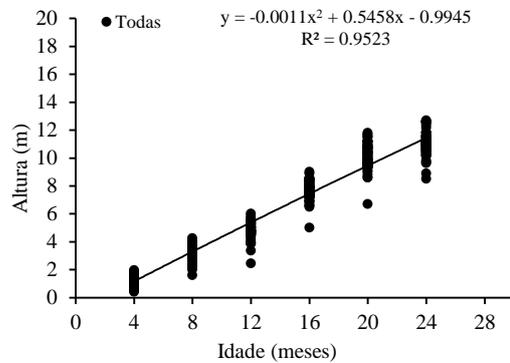
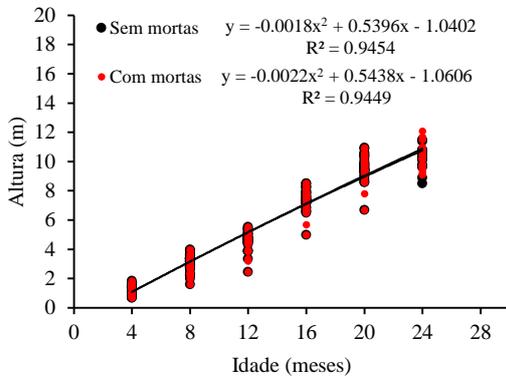
### Tratamento 10



### Tratamento 11

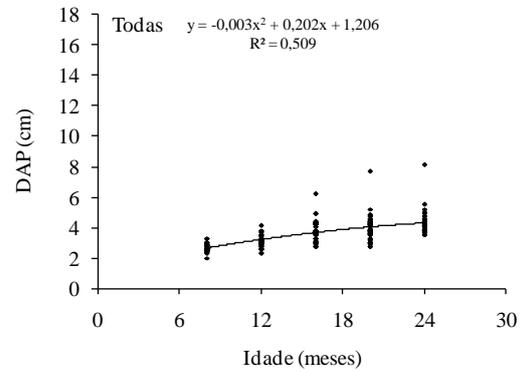
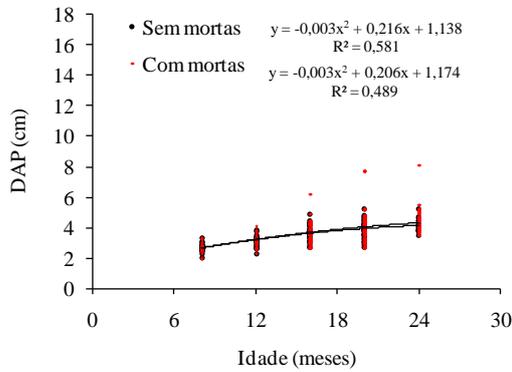


### Tratamento 12

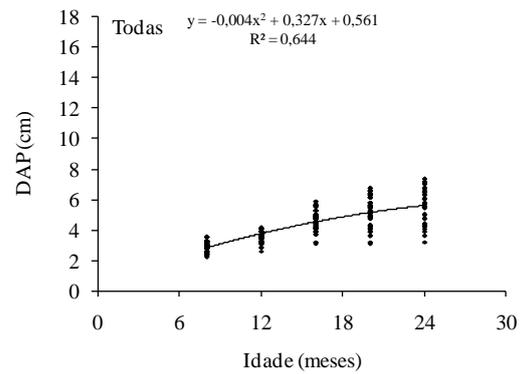
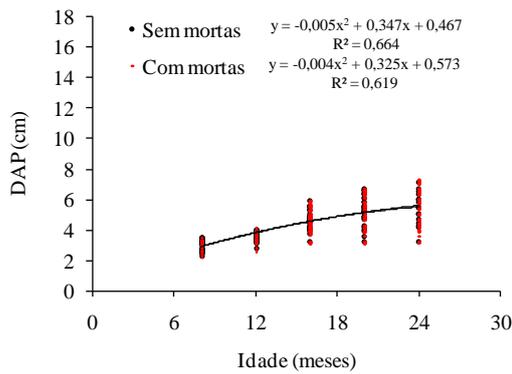


## Curvas de crescimento da variável diâmetro em função da idade nos diferentes tratamentos

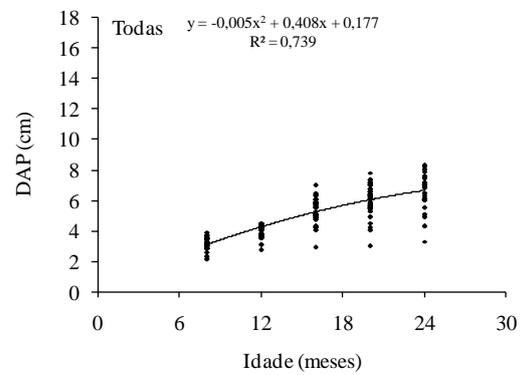
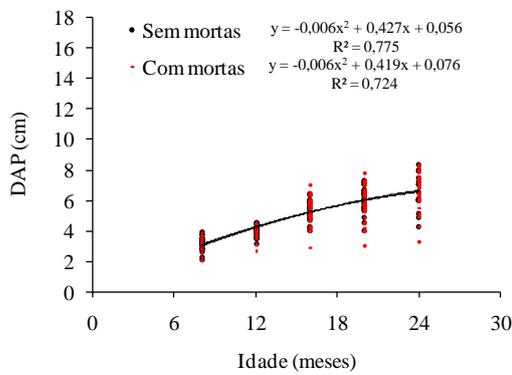
### Tratamento 1



### Tratamento 2

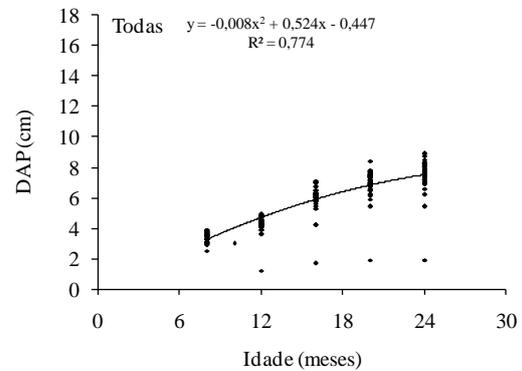
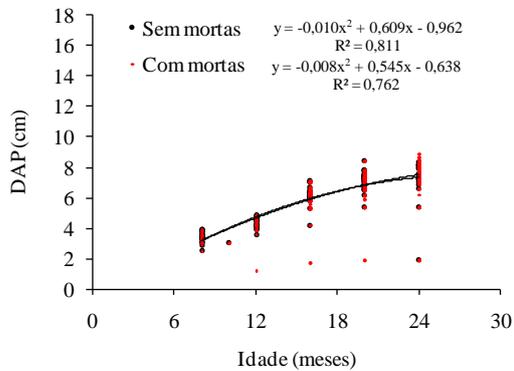


### Tratamento 3

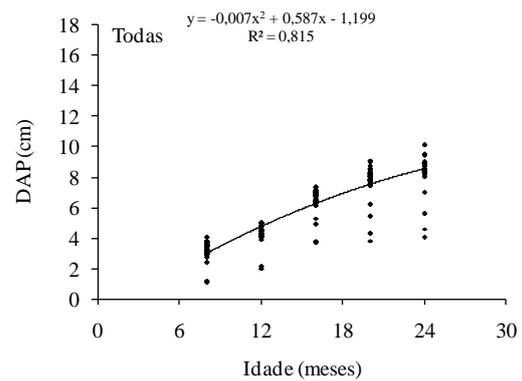
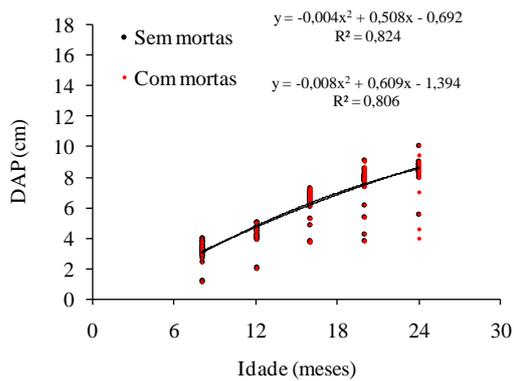


## Curvas de crescimento da variável diâmetro em função da idade nos diferentes tratamentos

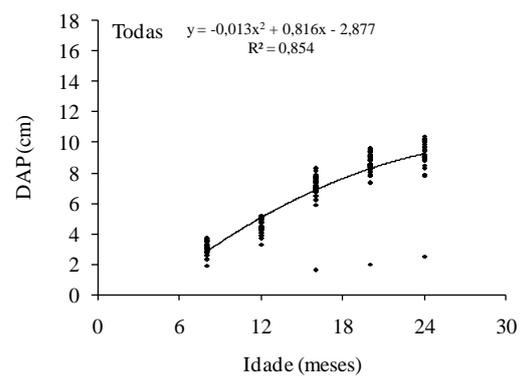
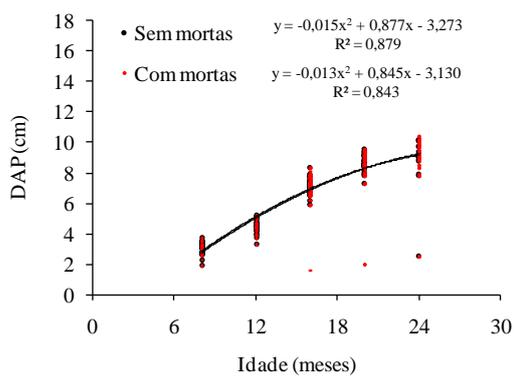
### Tratamento 4



### Tratamento 5

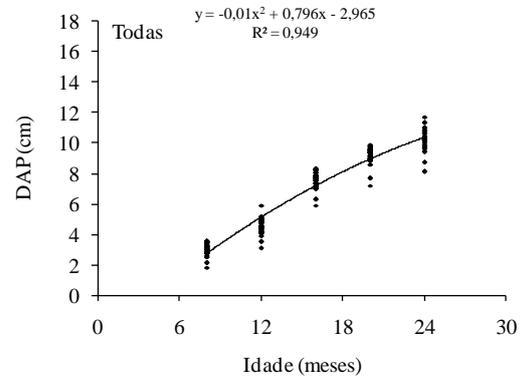
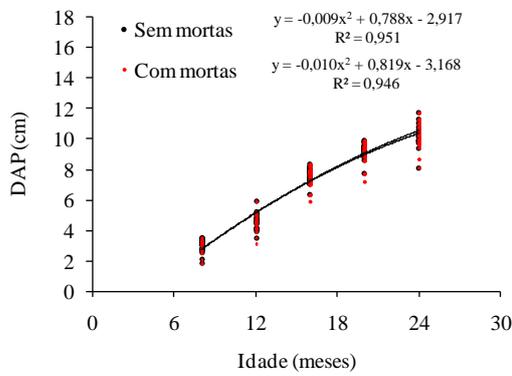


### Tratamento 6

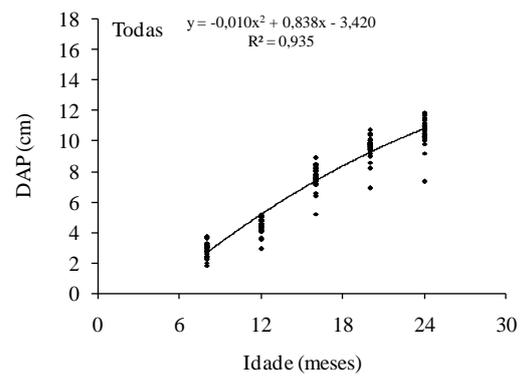
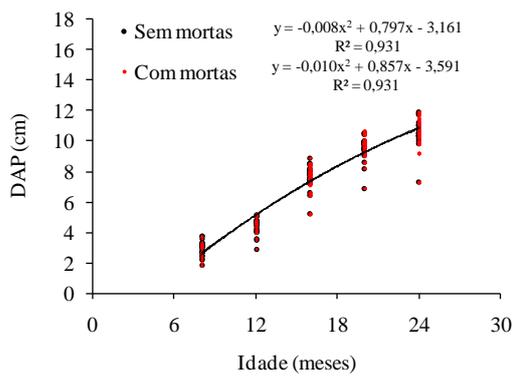


## Curvas de crescimento da variável diâmetro em função da idade nos diferentes tratamentos

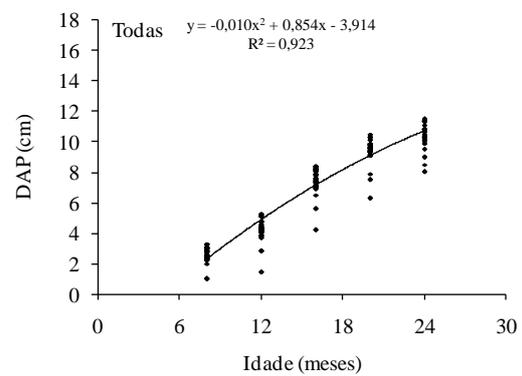
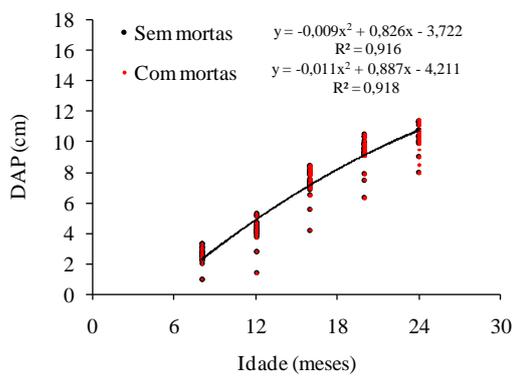
### Tratamento 7



### Tratamento 8

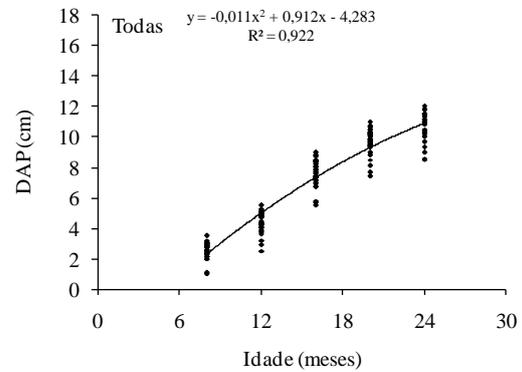
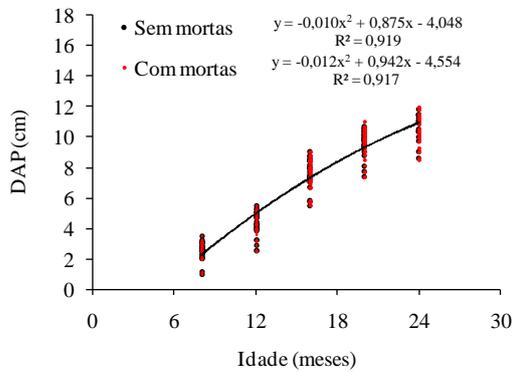


### Tratamento 9

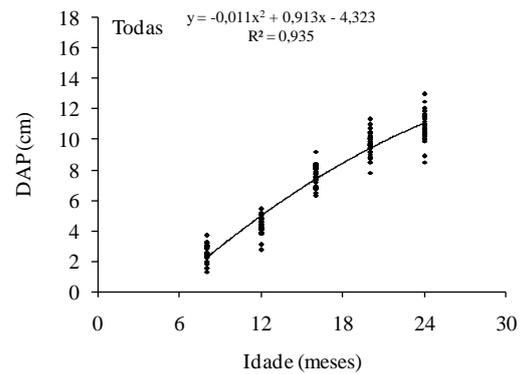
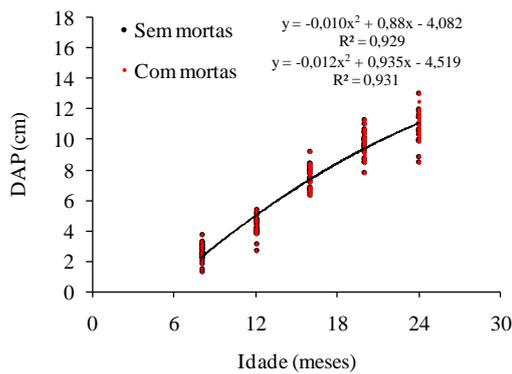


## Curvas de crescimento da variável diâmetro em função da idade nos diferentes tratamentos

Tratamento 10



Tratamento 11



Tratamento 12

