

GABRIEL SOARES LOPES GOMES

**EFEITO DO ESPAÇAMENTO NA PRODUÇÃO DE MADEIRA E QUALIDADE DO
CARVÃO VEGETAL, EM PEQUENA PROPRIEDADE**

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

Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto

Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira
Helio Garcia Leite

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2020**

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

T

G633e
2020

Gomes, Gabriel Soares Lopes, 1993-

Efeito do espaçamento na produção de madeira e qualidade do
carvão vegetal, em pequena propriedade / Gabriel Soares Lopes
Gomes. - Viçosa, MG, 2020.

131 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Sílvia Nolasco de Oliveira Neto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Eucalipto - Crescimento. 2. Madeira - Qualidade. 3. Madeira -
Aspectos econômicos. 4. Idade das árvores. 5. Biomassa. I.
Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.98675

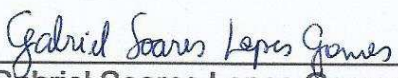
GABRIEL SOARES LOPES GOMES

**EFEITO DO ESPAÇAMENTO NA PRODUÇÃO DE MADEIRA E QUALIDADE DO
CARVÃO VEGETAL, EM PEQUENA PROPRIEDADE**

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

APROVADA: 26 de novembro de 2020.

Assentimento:



Gabriel Soares Lopes Gomes
Autor



Sílvio Nolasco de Oliveira Neto
Orientador

**Dedico a meus pais e à minha tia Luiza Lima (in
memoriam), pelo carinho e apoio durante essa
jornada...**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me ajudar a trilhar um caminho de alegria e vitórias, dando-me sabedoria e paciência.

Aos meus pais e a meu irmão, pela dedicação, apoio, companheirismo, conselhos e confiança.

À minha namorada, Paula da Rocha Oliveira, pelo apoio emocional e carinho em todos os momentos da minha jornada.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos Professores orientador Sílvio Nolasco de Oliveira Neto e coorientadores Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Helio Garcia Leite pela confiança, credibilidade, apoio, orientação e amizade.

Ao Engenheiro Agrônomo Rogério Jacinto Gomes e ao Técnico Marco Aurélio Silva (EMATER), e ao agricultor Anselmo Neto, pela disponibilidade da área experimental e colaborações para realização da pesquisa.

Ao Laboratório de Painéis e Energia em Madeira - LAPEM, em especial Edna, Fernanda, Braúlio, Bruna e Lawrence, pelo o apoio durante a realização das análises.

Aos meus amigos Lucas Sérgio e Bruno Schettini, pelos auxílios na coleta e análises dos dados.

Às minhas amigas, Júlia Graziela, Amana Obolari e Tereza Cristina, por sempre me ajudarem quando precisei e pelo carinho na vida diariamente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

GOMES, Gabriel Soares Lopes, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2020. **Efeito do espaçamento na produção de madeira e qualidade do carvão vegetal, em pequena propriedade.** Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Helio Garcia Leite.

O objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos do espaçamento na produtividade, na viabilidade econômica e na qualidade da madeira para a produção de carvão vegetal, em povoamentos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (Clone GG100) em pequena propriedade rural. O estudo foi realizado em Lamim, na Zona da Mata de Minas Gerais, sendo o híbrido plantado nos espaçamentos 2x1, 2x2, 3x2 e 3x3 m. Inicialmente, foram realizados inventários aos 14, 54 e 84 meses, avaliando-se o diâmetro à altura do peito (DAP), altura total e taxa de sobrevivência. Obteve-se a distribuição de diâmetro das árvores para posterior cubagem. Para estimar as alturas totais, empregou-se equações hipsométricas e também utilizou a fórmula de Smalian para determinar o volume do fuste. Foram avaliadas duas alternativas de modelos de crescimento e produção, Logístico e Exponencial, e analisou-se os custos de produção, caracterizando os elementos de despesas referentes a insumos e mão de obra. Para a análise econômica considerou-se taxa de juros de 8% a.a. e os métodos de avaliação de projetos Valor Presente Líquido (VPL), Valor Anual Equivalente (VAE), Custo Médio de Produção (CMP) e Razão Benefício/Custo (B/C). Analisou-se as propriedades físicas e químicas da madeira e do carvão vegetal, além de estimar as massas seca e energia por hectare. Os dados foram submetidos ao teste t para comparação de médias e também foram realizadas análises de componentes principais a fim de avaliar as relações entre as variáveis da madeira e do carvão vegetal em função dos espaçamentos. Os resultados mostram que os espaçamentos influenciaram a distribuição dos diâmetros, a altura das árvores e a produtividade. A idade técnica de corte apresentou tendência de redução em menores espaçamentos. Os espaçamentos reduzidos proporcionaram custos superiores quando comparados aos mais amplos. Os resultados indicaram viabilidade econômica a partir dos 60 meses, com exceção para o espaçamento 2x1 m. O espaçamento 3x2 m apresentou VPL de R\$ 3.376,03 ha⁻¹, VAE de R\$ 845,55 ha⁻¹ e CMP de R\$ 34,25. Os espaçamentos também influenciaram os índices de qualidade da

madeira e do carvão vegetal. Porém, os espaçamentos mais amplos proporcionaram melhores propriedades da madeira (densidade básica e lignina total) e do carvão vegetal (rendimento gravimétrico do carvão vegetal, teor de cinzas e densidade a granel). Considerando a perspectiva de produção, os espaçamentos mais amplos apresentaram melhores indicadores econômicos em relação aos reduzidos, indicando inviabilidade no 2x1 m. Aos 60 meses, analisando a produtividade e a análise econômica, associadas às características tecnológicas mais adequadas para a produção de carvão vegetal, o espaçamento 3x2 m se mostrou o mais viável.

Palavras-chave: Eucalipto. Crescimento e produção. Idade técnica de corte. Análise econômica. Qualidade da madeira. Energia da biomassa.

ABSTRACT

GOMES, Gabriel Soares Lopes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2020. **Spacing effect on wood production and quality of charcoal on small properties.** Adviser: Sílvia Nolasco de Oliveira Neto. Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Helio Garcia Leite.

The objective of this study was to evaluate the effects of spacing on productivity, average costs and quality of wood for the production of charcoal, in addition to indicating what is the best spacing for such purpose. For this, *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (Clone GG 100) stands were used on a small rural property. The study was carried out in the Zona da Mata of Minas Gerais, with the hybrid established in the 2x1, 2x2, 3x2 and 3x3 m spacing. Initially, inventories were carried out at 14, 54 and 84 months to evaluate the diameter at breast height (DBH), total height and survival rate. The diameter distribution of the trees was obtained for subsequent cubing. Hypsometric equations were used to estimate the total heights and the Smalian formula was also used to determine the stem volume. Two alternatives of growth and yield models, Logistic and Exponential, were evaluated for the different spacing and the production costs were analyzed, characterizing the elements of expenses related to inputs and labor. For financial analysis, an interest rate of 8% a.a. and the project evaluation methods Net Present Value (VPL), Equivalent Annual Value (VAE), Average Cost of Production (CMP) and Benefit-Cost Ratio (B/C). The chemical properties of wood and charcoal were analyzed, in addition to estimating the dry masses and energy per hectare. The data were submitted to the t test for comparison of means and principal component analyzes were also carried out in order to assess the relationships between wood and charcoal variables as a function of spacing. The results show that the spacing influenced the diameter distribution, the height of the trees and the productivity. The technical age of cutting showed a tendency of reduction in smaller spacing. The reduced spacing provided higher costs when compared to the wider ones. The results indicated economic viability from 60 months onwards, except for the 2x1 m spacing. The 3x2 m spacing presented a VPL of R\$ 3,376.03 ha⁻¹, VAE of R\$ 845.55 ha⁻¹ and CMP of R\$ 34.25. Spacing also influenced the quality indexes of wood and charcoal. However, the wider spacing provided better wood properties (basic density and total lignin) and charcoal (charcoal gravimetric yield, ash content

and bulk density). Considering the production perspective, the wider spacings present better economic indicators in relation to the reduced ones, indicating unfeasibility in the 2x1 m. At 60 months, analyzing the productivity and economic analysis, associated with the most adequate technological characteristics for the production of charcoal, the 3x2 m spacing proved to be the most viable.

Keywords: Eucalypt. Growth and yield. Technical cut age. Economic analysis. Wood quality. Biomass energy

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
REFERÊNCIAS	16
CAPÍTULO 1: CRESCIMENTO E CUSTOS DE PRODUÇÃO DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO	20
RESUMO.....	20
ABSTRACT	21
1. INTRODUÇÃO	22
2. OBJETIVOS	24
2.1 OBJETIVO GERAL	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Caracterização da área de estudo	24
3.2 Caracterização do plantio, amostragem e medições	25
3.3 Análise de distribuição de diâmetros.....	26
3.4 Equações hipsométricas e de volume.....	27
3.5 Afilamento do fuste	28
3.6 Modelagem do crescimento e da produção	29
3.7 Análise de custos de produção	31
3.8 Análise econômica	31
3.8.1 Valor presente líquido – VPL	31
3.8.2 Valor anual equivalente – VAE	32
3.8.4 Custo médio de produção – CMP	32
3.8.3 Razão benefício/custo – B/C	33
4. RESULTADOS	34
5. DISCUSSÃO	58
5.1 Distribuição de diâmetro	58
5.2 Relação hipsométrica.....	59
5.3 Modelo de volume.....	60
5.4 Afilamento do fuste	60
5.5 Modelos de crescimento e produção	61
5.6 Análise econômica	65
6. CONCLUSÃO.....	67
7. REFERÊNCIAS	68

CAPÍTULO 2: INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO NOS INDICADORES DE QUALIDADE DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL PARA FINS SIDERÚRGICOS	79
RESUMO.....	79
ABSTRACT	80
1. INTRODUÇÃO	81
2. OBJETIVOS	82
2.1 OBJETIVO GERAL	82
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	82
3. MATERIAL E MÉTODOS	83
3.1 Caracterização da área de estudo	83
3.2 Caracterização do plantio, amostragem e medições	83
3.3 Propriedades da madeira.....	85
3.3.1 Coleta das amostras	85
3.3.2 Relação cerne/alburno.....	85
3.3.3 Densidade básica	86
3.3.4 Composição química estrutural e análise química imediata	86
3.3.5 Poder calorífico superior	87
3.3.6 Análise termogravimétrica	87
3.3.7 Carbonização.....	87
3.4 Propriedades do carvão	88
3.4.1 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC).....	88
3.4.2 Friabilidade	88
3.4.3 Densidade a granel.....	89
3.4.4 Densidade relativa aparente	89
3.4.5 Composição química imediata.....	89
3.5 Estimativas de massas e energia por hectare	90
3.5.1 Massa seca de madeira.....	90
3.5.2 Massa de lignina e de carvão vegetal.....	90
3.5.3 Energia	91
3.6 Análises Estatísticas	91
4. RESULTADOS	92
5. DISCUSSÃO	103
5.1 Madeira	103
5.1.1 Relação cerne/alburno (C/A).....	103

5.1.2 Densidade básica.....	103
5.1.3 Composição química estrutural e análise química imediata	105
5.1.4 Poder calorífico	106
5.1.5 Análise termogravimétrica.....	107
5.2 Carvão vegetal	108
5.2.1 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal	108
5.2.2 Friabilidade.....	109
5.2.3 Densidade a granel	109
5.2.4 Densidade aparente.....	110
5.2.5 Composição química imediata	110
5.2.6 Estimativas de massa	111
5.3 Análise multivariada	113
6. CONCLUSÃO.....	115
7. REFERÊNCIAS.....	116
CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
ANEXO A - Croqui representativo da área de estudo com o híbrido <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> , em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG	128
ANEXO B – Análise econômica do híbrido <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> para um horizonte de 120 meses, em diferentes espaçamentos, em Lamim-MG.....	129
ANEXO C – Tabela de custos médios e receitas do híbrido <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> , em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG	131

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil apresenta recursos renováveis com potencial de destaque para geração de energia, tais como fontes hidráulicas, eólica, solar, derivados de petróleo, além da biomassa. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2019), a matriz energética nacional é composta por 45,3% de fontes renováveis, sendo que o carvão vegetal juntamente com a lenha contribui com 8,4% desse total.

O carvão vegetal compreende um material vegetal que passou pelo processo lento de pirólise e que é utilizado para fins energéticos no setor industrial, aquecimento e cocção (HAGEMANN et al., 2018; PERREIRA et al., 2017; BROWN et al., 2015). No setor industrial, mais especificamente, o seu uso acarreta benefícios como redução das emissões de gases do efeito estufa (CHENG et al., 2016; POHLMANN et al., 2016), menor poluição por apresentar níveis reduzidos de sulfatos e fósforo (PERREIRA et al., 2017), além de suas vantagens econômicas e de sustentabilidade quando comparados ao carvão mineral (WENNERSTEN et al., 2015).

Por mais que o Brasil seja um dos maiores consumidores e produtores de carvão vegetal, sua produção enfrenta desafios constantes, principalmente quando se considera pequenos e médios produtores, responsáveis por expressiva parte da produção nacional. Dentre os principais fatores que acarretam entrave na sua produção evidenciam-se: tecnologias de baixa eficiência (BAILIS et al., 2013), baixa produtividade e problemas sociais (PENNISE et al., 2001; CHIDUMAYO e GUMBO, 2013). Além destes, Babich et al. (2010) e Simione et al. (2018) relatam que a disponibilidade de matéria-prima, mão de obra e índices de qualidade da madeira também são causas da ineficiência na produção de carvão vegetal.

Os índices de qualidade da madeira são determinados a partir de uma classificação arbitrária das características físicas, químicas ou anatômicas de uma árvore, ou parte dela, que permite melhor utilização para determinado uso. Estas características podem ser alteradas durante o processo de formação da madeira através de tratamentos silviculturais, melhoramento genético e agentes biológicos (LARSON, 1969).

Assim, para a produção de carvão vegetal, a qualidade da madeira é um fator fundamental, haja vista que a seleção de características físicas e químicas da madeira, aliados aos diferentes métodos de carbonização, interfere diretamente nas

propriedades do carvão vegetal (ASSIS et al., 2016). O entendimento dos padrões de qualidade da madeira pode auxiliar para o aumento de produção, escolha dos materiais genéticos superiores, além de uma redução do uso de matéria-prima aliado à sua máxima eficiência (PROTÁSIO et al., 2014).

O potencial energético da madeira para a produção de carvão vegetal também é influenciado pelo material genético arbóreo, características do sítio, manejo e idade do povoamento (CHRZAZVEZ et al., 2014). De acordo com Oliveira et al. (2010) e Trugilho (1995), características da madeira como alta densidade básica e teor de lignina, baixo teor de cinzas, além de fibras de parede celular mais espessas e de menor largura, são essenciais para produção de carvão vegetal com alto rendimento, baixo custo e boa qualidade.

O espaçamento de plantio das árvores também pode afetar as características do carvão vegetal (ROCHA et al., 2016), considerando a influência na produtividade e qualidade da madeira, diante interferência na disponibilidade de recursos de crescimento e no ritmo de crescimento das árvores (OLIVEIRA NETO et al., 2010). Na definição do espaçamento de plantio deve-se considerar as características da espécie, a qualidade do sítio, a possibilidade de mecanização e objetivos da produção, associando às questões de ordem econômica (LIMA et al., 2013; RYAN et al., 2010).

Árvores cultivadas em espaçamentos maiores competem por recursos de crescimento com menor intensidade, favorecendo o crescimento em diâmetro e, conseqüentemente, produzindo maiores médias de volume de madeira por árvore. Estas, por essa razão, podem ser mais apropriadas para usos em serraria e laminação em idades avançadas (ALCORN et al., 2013; FORRESTER et al., 2013a). Em contrapartida, menores espaçamentos proporcionam maior densidade de árvores, elevando o índice de área foliar, a taxa fotossintética e a produtividade de biomassa por área. Nestas condições, frequentemente são observados maiores volumes totais de madeira por área e mudanças nas propriedades energéticas da biomassa (LEITE et al., 1999; GONÇALVES et al., 2013; ELOY et al., 2016; LOPES et al., 2017).

Espaçamentos reduzidos tendem apresentar menores diâmetros quadráticos e árvores com menor valor agregado, sendo recomendados para fins energéticos. Os custos de implantação são mais elevados, justificado pela maior quantidade de mudas para plantio e replantio, além de maior quantidade de adubo (FORRESTER et al., 2013b; BINKLEY et al., 2017). No entanto, a idade técnica de corte é antecipada, o

que gera receitas para a amortização dos custos totais (PAULINO, 2012; PEDROSO FILHO et al., 2018).

Entre as décadas de 60 e 80, o governo brasileiro implementou políticas de incentivos fiscais para estimular projetos de reflorestamento, visando a autossuficiência de matéria-prima para o setor florestal. Impulsionou-se, assim, muitos empreendimentos predominantemente em monocultivos, caracterizados por extensas áreas e, frequentemente, elevadas densidades de plantio (BRITO, 1990; VALVERDE et al, 2004; FUJIHARA et al., 2009).

Em Minas Gerais, empresas e produtores independentes impulsionaram o crescimento do setor florestal, diante demanda de madeira para o abastecimento de diversos segmentos da indústria, em especial siderúrgicas e metalúrgicas. Outro fator relevante para o setor florestal do Estado foi a implementação da Lei Florestal Estadual, em 1991, com avanços para a redução do desmatamento e da produção carvão vegetal oriundo de florestas nativas (RESENDE e SANTOS, 2010).

Nesse cenário, ampliou-se a implementação de projetos de reflorestamentos para fins de produção de madeira, porém muitas vezes negligenciando aspectos técnicos como escolha de espécies, níveis de produtividade e métodos de plantio. Entretanto, somente a partir do término dos incentivos fiscais que as empresas e produtores passaram a focar em qualidade e produtividade, incluindo o termo florestas energéticas (VALVERDE et al, 2004; COUTO e MULLER, 2008).

Florestas energéticas são cultivos florestais caracterizados por elevado número de árvores por área, ciclos de rotação reduzidos, árvores de diâmetros menores, cuja madeira tradicionalmente é destinada à produção de biomassa para energia. Com o adensamento do espaçamento de plantio, implicações silviculturais, econômicas e de manejo devem ser reavaliadas (GUERRA et al., 2012).

Frequentemente, produtores rurais que optam pela silvicultura definem o espaçamento de plantio de maneira empírica, normalmente associando a densidade de plantas somente com a produtividade. No entanto, a definição do espaçamento para as culturas arbóreas deve levar em consideração outros fatores de ordem silvicultural, tecnológica e econômica. Melhorias nos índices de qualidade da madeira e do carvão para fins energéticos (REIS et al., 2012), maior acurácia na escolha das rotas de extração (GADOW e KOTZE, 2014) e otimização dos recursos de

crescimento, incluindo a ciclagem de nutrientes (INOUE et al., 2011), assim como os custos de produção, devem ser considerados.

Empresas e pequenos produtores florestais tendem adotar diferentes tecnologias e práticas silviculturais. A adoção de “pacotes tecnológicos” pelos pequenos produtores, advindos de grandes empresas florestais, é prática recorrente. Contudo, desconsideram baixos níveis de tecnologia empregada, as condições edafoclimáticas e o dimensionamento de pequenas áreas para a produção florestal, algo muito intrínseco aos pequenos produtores da Zona da Mata mineira, onde a silvicultura de eucalipto associada à produção de carvão vegetal desempenha importante função socioeconômica. Neste contexto, esse trabalho foi dividido em dois capítulos.

O primeiro refere-se à análise do efeito do espaçamento nas características de crescimento e custos médios de produção do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Dentre as hipóteses a serem testadas está: 1) ocorrem alterações nas características dendrométricas das árvores ao se alterar os espaçamentos de plantio; 2) a idade técnica de corte é reduzida e a produtividade é superior em plantios adensados; 3) os custos de produção da madeira são influenciados pela densidade de plantas por área.

O segundo capítulo abordou a influência do espaçamento na qualidade da madeira e do carvão vegetal. As hipóteses foram: 1) espaçamentos reduzidos apresentam maior produtividade e qualidade superior de madeira 2) as estimativas de massa e energia por hectare são superiores para plantios adensados 3) existe diferença entre o carvão vegetal produzido para os espaçamentos analisados, levando em consideração as propriedades químicas.

REFERÊNCIAS

- ALCORN, P.J.; FORRESTER, D.I.; SMITH, R.G.B.; THOMAS, D.S.; JAMES, R.; NICOTRA, A.; BAUHUS, J. The influence of site quality on timing of pruning in *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* plantations. **Australian Forestry**, v. 76, n. 01, p. 25-36. 2013. Disponível em: 10.1080/00049158.2013.776923. Acesso em: 01 jan. 2020.
- ASSIS, M. R.; BRANCHERRIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science Technology**, v. 50, n. 01 p. 519–536. 2016. Disponível em: 10.1007/s00226-016-0812-6. Acesso em: 05 jan. 2020.
- BABICH, A.; SENK, D.; FERNANDEZ, M. Charcoal behavior by its injection into the modern blast furnace. **ISIJ International**, v. 50, n. 01, p. 81–88. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.81>. Acesso em: 05 jan. 2020.
- BAILIS, R.; RUJANAVECH, C.; DWIVEDI, P.; VILELA, A. O.; CHANG, H.; MIRANDA, R. C. Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 02, p. 189–200. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.008>. Acesso em: 06 jan. 2020.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. 01, p. 271–283. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 04, n. 09, p. 221-227, 1990.
- BROWN, R.; DEL CAMPO, B.; BOATENG, A.A.; GARCIA-PEREZ, M.; MASEK, O. **Fundamentals of biochar production**. In *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. London: Routledge, 2 ed., p. 976. 2015.
- CHENG, Z; YANG, J.; ZHOU, L.; LIU, Y.; WANG, Q. Characteristics of charcoal combustion and its effects on iron-ore sintering performance. **Applied Energy**, v. 161, n. 01, p. 364–74. 2016. Disponível em: 10.1016/j.apenergy.2015.09.095. Acesso em: 23 mar. 2020.
- CHIDUMAYO, E. M.; GUMBO, D. J. The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: A synthesis. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 02, p. 86–94. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2012.07.004>. Acesso em: 28 abr. 2020.
- CHRAZVEZ, J.; THE´RY-PARISOT, I.; FIORUCCI, G.; TERRAL, J. F.; THIBAUT B. Impact of post-depositional processes on charcoal fragmentation and archaeobotanical implications: experimental approach combining charcoal analysis and biomechanics. **Journal Archaeological Science**, v. 44, n. 01, p. 30–42. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2014.01.006>. Acesso em: 14 abr. 2020.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Florestas energéticas no Brasil. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**, Campinas, SP, 1 ed., p. 93-111. 2008. 29 p.

ELOY, E.; SILVA, D. A.; SCHMIDT, D.; TREVISAN, R.; CARON, B. O.; ELLI, E. F. Effect of planting age and spacing on energy properties of *Eucalyptus grandis* w. hill Ex Maiden. **Revista Árvore**, v. 40, n. 04, p. 1-10. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400019>. Acesso em: 21 jun. 2020.

FORRESTER, D.I.; ELMS, S.; BAKER, T.G. Tree growth-competition relationships in thinned *Eucalyptus* plantations vary with stand structure and site quality. **European Journal Forest Research**, v. 132, n. 01, p. 241-252. 2013b. Disponível em: [10.1007/s10342-012-0671-0](https://doi.org/10.1007/s10342-012-0671-0). Acesso em: 21 jun. 2020.

FORRESTER, D.I.; WIEDEMANN, J. C.; FORRESTER, R. I.; BAKER, T. G. Effects of planting density and site quality on mean tree size and total stand growth of *Eucalyptus globulus* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 43, n. 01, p. 846-851. 2013a. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0137>. Acesso em: 25 jun. 2020.

FUJIHARA, M. A.; CAVALCANTI, R.; GUIMARÃES, A.; GARLIPP, R. **O valor das florestas**, São Paulo: Terra das Artes Editora, 1 ed. 2009. 352 p.

GADOW, K.; KOTZE, H. Tree survival and maximum density of planted forests – Observations from South African spacing studies. **Forest Ecosystems**, v. 01, n. 21, p. 1-9. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40663-014-0021-4>. Acesso em: 22 jun. 2020.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. D.; LACLAU, J.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, n. 01, p. 6-27. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>. Acesso em: 05 mai. 2020.

GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P.; GARCIA, E. A.; SPINELLI, R. Eucalipto adensado: manejo para florestas energéticas. In: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. **Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação**, São Paulo, p. 125-161. 2012. 1069 p.

HAGEMANN, N.; SPOKAS, K.; SCHMIDT, H.; KAGI, R.; BOHLER, M. A.; BUCHELI, T. Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic Carbon's ABCs. **Water**, v. 10, n. 02, p. 1-19. 2018. Disponível em: [10.3390/w10020182](https://doi.org/10.3390/w10020182). Acesso em: 09 jun. 2020.

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

LARSON, P. R. **Wood formation and the concept of wood quality**. Yale University, New Haven, n. 74. 1969. 54 p.

LEITE, F. P.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SANS, L.M.A.; FABRES, A. S. Relações hídricas em povoamento de eucalipto com diferentes densidades populacionais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 01, p. 9–16. 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000100002>. Acesso em: 12 mai. 2020.

LIMA, R.; INOUE, M. T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARAÚJO, A. J.; MACHADO, S. A. Efeito do espaçamento no desenvolvimento volumétrico de *Pinus taeda* L. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 02, p. 223-230. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2013.001>. Acesso em: 18 mai. 2020.

LOPES, E. D.; LAIA, M. L.; SANTOS, A. S.; SOARES, G. M.; LEITE, R. W. P.; MARTINS, N. S. Influência do espaçamento de plantio energético de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. **FLORESTA**, v. 47, n. 01, p. 95-104. 2017. Disponível em: [10.5380/rf.v47i1.47141](https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.47141). Acesso em: 12 abr. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – BRASIL. **Balanço Energético Nacional (BEN) 2019 – ano base 2018**. MME: EPE, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso em: 20 nov., 2019.

OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; NEVES, J. C. L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. **FLORESTA**, v. 40, n. 04, p. 755-762, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v40i4.20327>. Acesso em: 25 dez. 2019.

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

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

PENNISE, D. M.; SMITH, K. R.; KITHINJI, J.P.; REZENDE, M. E.; RAAD, T.J.; ZHANG, J.; FAN, C. Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenya and Brazil. **Journal of Geophys Research**, v. 106, n. 20, p. 143–155. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2000JD000041>. Acesso em: 05 mar. 2020.

PERREIRA, E. G.; MARTINS, M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O. Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Belfast, v. 75, n. 01, p. 592-600. 2017. Disponível em: [10.1016/j.rser.2016.11.028](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.028). Acesso em: 30 jan. 2020.

PIKETTY, M.; WICHERT, M.; AIMOLA, L. Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steelmaking. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 01, p. 180-190. 2009. Disponível em: [10.1016/j.biombioe.2008.06.002](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.06.002). Acesso em: 04 mar. 2020.

POHLMANN, J. G.; BORREGO, A. G.; OSÓRIO, E.; DIEZ, M. A.; VILELA, A. C. F. Combustion of eucalyptus charcoals and coals of similar volatile yields aiming at blast furnace injection in a CO₂ mitigation environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, n. 01, p. 1–11. 2016. Disponível em: [10.1016/j.jclepro.2016.04.138](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.138). Acesso em: 16 mar. 2020.

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. R. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, p. 1-14. 2014. Disponível em: [10.4336/2014.pfb.34.78.657](https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.657). Acesso em: 16 mar. 2020.

REIS, A. P.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 4, p. 497-505. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.055>. Acesso em: 08 abr. 2020.

RESENDE, J. B.; SANTOS, A. C. A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades. **Boletim Técnico**, Viçosa, U. R. Epamig Zona da Mata, n. 95, p. 80. 2010.

ROCHA, M. F. V.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARDOSO, M. T.; HEIN, P. R. G. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of eucalyptus wood and bark. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 28, n. 03, p. 243-248. 2016. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/43856528>. Acesso em: 19 abr. 2020.

RYAN, M. G.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D. F. R. A.; LOOS, E. N. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 01, p. 1695-1703, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.013>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SIMIONI, F. J.; BUSCHINELLI, C. C. A.; MORREIRA, J. M. M. A. P.; PASSOS, B. M.; GIROTTTO, S. B. F. T. Forest biomass chain of production: Challenges of small-scale forest production in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, n. 01, p. 889-898. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.330>. Acesso em: 15 mai. 2020.

TRUGILHO, P. F. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira e do carvão de Eucalyptus**. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

VALVERDE, S. R.; SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; NEIVA, S. A. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no Brasil. **Revista Biomassa & Energia**, v. 01, n. 04, p. 393-403, 2004.

WENNERSTEN, R.; SUN, Q.; LI, H. The future potential for Carbon Capture and Storage in climate change mitigation e an overview from perspectives of technology, economy and risk. **Journal of Cleaner Production**, v.103, n. 01, p. 724-736. 2015. Disponível em: [10.1016/j.jclepro.2014.09.023](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.023). Acesso em: 15 jun. 2020.

CAPÍTULO 1: CRESCIMENTO E CUSTOS DE PRODUÇÃO DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO

RESUMO

GOMES, Gabriel Soares Lopes, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2020. **Crescimento e custos de produção de eucalipto em função do espaçamento.** Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Helio Garcia Leite.

O espaçamento de cultivo das árvores pode influenciar a produtividade e a qualidade da madeira, com implicações silviculturais, tecnológicas e econômicas. O objetivo do presente estudo foi estimar a produção e analisar economicamente povoamentos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, em função do espaçamento de plantio, em pequena propriedade rural. O estudo foi realizado na Zona da Mata de Minas Gerais, sendo o híbrido (clone GG100) estabelecido nos espaçamentos 2x1, 2x2, 3x2 e 3x3 m. Foram realizados inventários aos 14, 54 e 84 meses em quatro parcelas em cada espaçamento, com 24 plantas, avaliando-se o diâmetro à altura do peito (DAP), altura total e taxa de sobrevivência. Obteve-se a distribuição de diâmetro das árvores para posterior cubagem. Para estimar as alturas totais daquelas árvores cuja altura não foi medida em cada idade empregou-se equações hipsométricas e também utilizou a fórmula de Smalian para determinar o volume do fuste. Foram avaliadas duas alternativas de modelos de crescimento e produção, Logístico e Exponencial, para os diferentes espaçamentos e analisou-se os custos de produção, caracterizando os elementos de despesas referentes a insumos e mão de obra. Para a análise econômica considerou-se taxa de juros de 8% a.a. e os métodos de avaliação de projetos Valor Presente Líquido (VPL), Valor Anual Equivalente (VAE), Custo Médio de Produção (CMP) e Razão Benefício/Custo (B/C). Os espaçamentos influenciaram a distribuição dos diâmetros, a altura das árvores e a produtividade. A idade técnica de corte apresentou tendência de redução em menores espaçamentos. O aumento na densidade de plantas (menores espaçamentos) não promoveu aumento proporcional na produção volumétrica. Os resultados indicaram viabilidade econômica a partir dos 60 meses para todos os espaçamentos, com exceção do 2x1 m.

Palavras-chave: Eucalipto. Crescimento e produção. Idade técnica de corte. Análise econômica.

ABSTRACT

GOMES, Gabriel Soares Lopes, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2020. **Eucalyptus growth and costs production in function of spacing**. Adviser: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto. Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Helio Garcia Leite.

Tree spacing can influence productivity and wood quality, with silvicultural, technological and economic implications. The objective of the present study was to estimate the production and its average costs in stands of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (Clone GG 100) as a function of planting spacing, on a small rural property. The study was carried out in the Zona da Mata of Minas Gerais, with the hybrid established in the 2x1, 2x2, 3x2 and 3x3 m spacing. Inventories were carried out at 14, 54 and 84 months in four plots at each spacing, with 24 plants, evaluating the diameter at breast height (DBH), total height and survival rate. The diameter distribution of the trees was obtained for subsequent cubing. Hypsometric equations were used to estimate the total heights of those trees whose height was not measured at each age and the Smalian formula was also used to determine the stem volume. Two alternatives of growth and yield models, Logistic and Exponential, were evaluated for the different spacing and the production costs were analyzed, characterizing the elements of expenses related to inputs and labor. For financial analysis, an interest rate of 8% a.a. and the project evaluation methods Net Present Value (VPL), Equivalent Annual Value (VAE), Average Cost of Production (CMP) and Benefit-Cost Ratio (B/C). Spacing influenced the diameter distribution, the height of the trees and the productivity. The technical age of cutting showed a tendency of reduction in smaller spacing. The increase in plant density (smaller spacing) did not promote a proportional increase in volumetric production. The results indicated economic viability from 60 months onwards for all spacings, except for 2x1 m.

Keywords: Eucalypt. Growth and yield. Technical cut age. Economic analysis.

1. INTRODUÇÃO

As preocupações com o aquecimento global e a busca por fontes renováveis de energia têm direcionado políticas públicas a adotarem práticas mais sustentáveis, assim como a substituição de combustíveis fósseis (BEN, 2019). A madeira tem-se destacado no setor mundial e nacional para fins energéticos visto suas características de biodegradabilidade, disponibilidade de obtenção, baixas emissões de poluentes, além da facilidade de comercialização dos produtos gerados (MMA, 2018).

A qualidade da madeira afeta o produto final e pode ser alterada por fatores anatômicos, fisiológicos e silviculturais (NONES et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2010). Segundo Assis et al. (2016), as propriedades do carvão vegetal estão diretamente relacionadas com as características da madeira que lhes originam, pois atributos como densidade básica, umidade e composição química afetam densidade (CHRZAZVEZ et al. 2014), produção de finos (ROUSSET et al., 2011) e resistência mecânica (PERREIRA et al., 2013; PERREIRA et al., 2017) do carvão, respectivamente.

O espaçamento de cultivo das árvores pode influenciar a produtividade e a qualidade da madeira (MOULIN et al, 2015; STAPE et al., 2010). Espaçamentos mais amplos proporcionam menor intensidade de competição por recursos de crescimento, o que promove a formação de árvores com maior crescimento diamétrico, tornando a madeira mais apropriada para serraria e laminação (HÉRBET et al., 2016). Enquanto que espaçamentos mais adensados proporcionam maiores volumes por área e árvores com menores diâmetros, condicionando sua utilização mais apropriada para fins energéticos (GUERRA et al., 2014).

Na Zona da Mata mineira o cultivo de eucalipto é uma importante fonte de renda associada à produção de carvão vegetal. Predominam pequenas propriedades rurais e a agricultura familiar, com aptidão para pecuária e atividade florestal (SILVA, 2016; SARAIVA et al., 2015), porém com desafios quanto aos aspectos silviculturais e de manejo tais como adubação e mão de obra (SIMIONI et al, 2018).

O adensamento de plantio é uma prática recorrente entre os silvicultores desta região, normalmente associado ao entendimento de maior produção por área cultivada. No entanto, devem-se analisar os custos operacionais, justificado pelos

maiores gastos na aquisição de mudas e fertilizantes para plantio e replantio (BINKLEY et al, 2017). O relevo acidentado, baixa adoção de tecnologia e a exportação de nutrientes através da colheita também podem ser fatores limitantes, haja vista as dificuldades de mecanização e os maiores custos de implantação e manutenção de plantio (FORRESTER et al, 2013; SCHWERZ et al., 2020).

A compreensão do crescimento e produção das florestas pode auxiliar nas análises de escolha do espaçamento, já que projetam a produtividade florestal ao longo dos anos a partir de informações correntes (SCOLFORO et al., 2019a; SCOLFORO et al., 2019b). Por sua vez, modelos de crescimento e produção podem orientar ações silviculturais como método de colheita e intensidade de desbaste (VANCLAY, 1994). Além disso, com as informações obtidas, pode-se definir com maior precisão as idades de corte, assim como análises dos retornos financeiros (FERRAZ FILHO et al., 2014; SCOLFORO et al., 2018).

Apesar do interesse de pequenos agricultores pelo cultivo de eucalipto na Zona da Mata mineira, estudos relacionados à escolha de espaçamentos e de modelagem de crescimento e produção praticamente inexistem. Essa temática é complexa, pois o crescimento do povoamento sofre influência de diferentes fatores, os quais incluem clima, solo, material genético e práticas de manejo. Assim, entende-se que pesquisas devam ser realizadas visando melhor adequar as estratégias silviculturais do eucalipto às condições de cultivo nas pequenas propriedades.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Estimar a produção e analisar economicamente povoamentos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, em função do espaçamento de plantio, em pequena propriedade rural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito do espaçamento na distribuição de diâmetros;
- Ajustar equações hipsométricas, de afilamento e volumétricas;
- Modelar o crescimento e a produção do povoamento e determinar a idade técnica de corte;
- Avaliar o efeito do espaçamento na análise econômica da produção de madeira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido em um povoamento do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (Clone GG 100), em propriedade rural no município de Lamim, na Zona da Mata de Minas Gerais (20° 47' S, 43° 28' W). Esta região caracteriza-se por apresentar influência da silvicultura, mais especificamente o cultivo do eucalipto, para a produção de carvão vegetal, lenha e madeira em tora, com produções estimadas de 4.033 t, 21.225 m³ e 41 m³, respectivamente (IBGE, 2018)

O município apresenta altitude média de 779 m, precipitação acumulada anual de 1.549 mm e temperatura média anual de 19,3°C, sendo os meses mais frios de abril a outubro (ALVARES et al., 2013). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é Cwb, o qual é definido como clima subtropical de altitude caracterizado com inverno seco e verão temperado.

A região é composta predominante por relevo montanhoso, com encostas convexo-côncavas embutidas em vales de fundo chato, formados por terraços e leitos maiores, onde se localizam cursos d'água, e solos predominantes classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, pobre em bases trocáveis e de baixa fertilidade natural. O município apresenta 24,26% de cobertura vegetal, predominantemente com Floresta Estacional Semidecidual, nos domínios do bioma Mata Atlântica (COELHO et al., 2008; IBGE, 2018).

3.2 Caracterização do plantio, amostragem e medições

A pesquisa foi realizada em uma pequena propriedade rural, em área total de um hectare, com predominância anterior de pastagem degradada. Amostras de solos foram coletadas em duas profundidades (0-20; 20-40 cm) para análise química, cujos resultados são apresentados na Tabela 1, conforme recomendações estabelecidas pelo Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2015).

O preparo da área consistiu de controle de formigas cortadeiras com iscas granuladas, roçada, dessecação em área total e demarcação de covas, seguindo os espaçamentos 2x1, 2x2, 3x2 e 3x3 m. As covas foram abertas manualmente, com dimensões aproximadas de 30x30 cm, sendo realizado o coroamento e adubações de plantio e de cobertura (Tabela 2), de modo a atender à exigência nutricional de acordo com a análise do solo. O plantio foi realizado em dezembro de 2011, seguido de controle de formigas cortadeiras e roçadas quando necessárias.

Tabela 1 - Caracterização química de amostras de solo da área experimental, em Lamim, MG

Profundidade	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC (t)	CTC (T)	V	MO
cm	H ₂ O	mg dm ⁻¹									%	dagkg ⁻¹
0-20	5,4	0,70	37	0,83	0,48	0,2	5,28	1,40	1,60	6,68	21,0	2,42
20-40	5,5	0,16	16	1,17	0,23	0,1	2,97	1,44	1,54	4,41	32,7	1,75

pH em água, teores de fósforo (P), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), alumínio (Al³⁺), hidrogênio + alumínio (H + Al), soma de bases (SB), CTC efetiva (t) e potencial (T), saturação por alumínio (m), saturação por bases (V) e teores de matéria orgânica (MO). KCl e CaCl - Relação 1:2,5;

P - Na - K - Fe - Zn - Mn - Cu - Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al - Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; Matéria Orgânica (MO) - Oxidação: $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 4N + H_2SO_4 10N.

Tabela 2 - Adubação de plantio e cobertura realizada no povoamento de Eucalipto, em Lamim, MG

Tipo de adubação	g/cova	Forma de Aplicação
Fosfato natural reativo	200	Fundo da cova
Superfosfato simples	150	Covetas laterais, 10 dias após o plantio
NPK (20-00-20), 0,5% de B e Zn	150	40 a 60 dias após o plantio
Cloreto de potássio + 1% B	150	Duas estações chuvosas após o plantio

Aos dois anos de idade foram instaladas três parcelas com 24 plantas na área sob espaçamento 3x3 m e quatro parcelas nos demais espaçamentos. As áreas médias das parcelas, após correção para o plano foram 48, 93, 137 e 210 m², respectivamente para os espaçamentos 2x1, 2x2, 3x2 e 3x3 m (ANEXO A).

As medições das árvores foram realizadas nas idades de 14, 54 e 84 meses. Em cada parcela e medição foram medidas as circunferências de todas as árvores presentes, a 1,3 m de altura, sendo posteriormente feita a transformação para diâmetro (*dap*). Foram medidas também, em cada ocasião, as alturas totais (*Ht*) das 10 primeiras árvores de cada parcela. As circunferências foram medidas com fita métrica e as alturas, com hipsômetro Vertex. Além disso, obteve-se a porcentagem de sobrevivência para cada espaçamento.

3.3 Análise de distribuição de diâmetros

A distribuição de diâmetros permitiu estimar a produção por classe e a intensidade de exploração. Assim, após a mensuração das parcelas, as árvores foram classificadas por classe de diâmetro a fim de estimar o número total para cada espaçamento.

Em função do número de classes de diâmetro observado nos dados das parcelas mensuradas, foram abatidas no mínimo 3 árvores em cada classe de *dap*, com amplitude de 2 cm nessas classes. Aos 84 meses de idade, foram abatidas 19,

23, 20 e 16 árvores-amostra, respectivamente nas áreas sob espaçamentos 2x1, 2x2, 3x2 e 3x3 m.

Em cada árvore-amostra foram medidas as circunferências nas alturas 0,1m, 0,5m, 1,3m, 2,0m e a partir daí, a cada 2,0m, até a altura onde o diâmetro com casca fosse de aproximadamente de 6,0 cm.

3.4 Equações hipsométricas e de volume

Para estimar as alturas totais daquelas árvores cuja altura não foi medida em cada idade empregamos equações hipsométricas. O modelo $LnHt = \beta_0 + \beta_1/dap + \varepsilon$ (CURTIS, 1967) foi ajustado para cada espaçamento e idade sendo obtidas doze equações hipsométricas.

A fórmula de Smalian (Husch et al, 1982) foi utilizada para determinar o volume do fuste de cada árvore (volume comercial). Em seguida, o modelo de Schumacher e Hall (1933) foi ajustado aos dados de cada espaçamento, na forma $LnV = \beta_0 + \beta_1Ln dap + \beta_2LnHt + \varepsilon$, em que: β_0 , β_1 e β_2 são os parâmetros a serem estimados, dap é o diâmetro a 1,3 m de altura, em centímetros, e Ht é a altura total, em metros. Esse modelo foi ajustado pelo método de mínimos quadrados ordinários. Os resíduos e os erros relativos percentuais das estimativas de volume foram analisados graficamente e pelas estatísticas erro padrão residual (EPR) (1), coeficiente de determinação (R^2) (2) e ajustado aos graus de liberdade (R^2_{ajust}) (3), e erro relativo percentual ($ER\%$)(4), conforme Campos e Leite (2017):

$$EPR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V - \hat{V})^2}{n - p - 1}} \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{Resíduos}}{SQ_{Total}} \quad (2)$$

$$R^2_{ajust} = 1 - \frac{QM_{Resíduos}}{QM_{Total}} \quad (3)$$

$$ER (\%) = \left(\frac{\hat{V} - V}{V} \right) * 100 \quad (4)$$

em que:

n = número de observações;

p = número de variáveis independentes;

V = volume observado;

\hat{V} = volume estimado;

$R^2(\%)$ = coeficiente de determinação;

$R^2_{ajust}(\%)$ = coeficiente de determinação ajustado;

$QMResíduos$ = variância residual;

$QMtotal$ = variância total.

3.5 Afilamento do fuste

Os modelos de afilamento do fuste propostos por Kozak et al (1969) (5), Garay (1979) (6), Demaerschalk (1972) (7) e Ormerod (1973) (8), que são os mais difundidos (Souza et al., 2016), foram ajustados utilizando o software *STATISTICA*® v. 13 (TIBCO Software Inc. (2018), sendo:

$$d = dap \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht}\right)^2} + \varepsilon \quad (5)$$

$$d = dap\beta_0 \left(1 + \beta_1 \ln(1 - \beta_2 h^{\beta_3} Ht^{-\beta_3})\right) + \varepsilon \quad (6)$$

$$d = 10^{\beta_0} + dap^{\beta_1} Ht^{2\beta_2} (Ht - h)^{2\beta_3} + \varepsilon \quad (7)$$

$$d = \beta_0 \left(\frac{Ht - h}{Ht - 1,30}\right)^{\beta_1} + \varepsilon \quad (8)$$

em que:

d = diâmetro, em cm, na altura h ;

dap = diâmetro, em cm, na altura 1,3 m;

h = altura da árvore até o diâmetro d , em metros;

Ht = altura total da árvore, em metros;

β_i = parâmetros a serem estimados ($i = 0, 1, 2$ e 3);

ε = erro aleatório supostamente com média zero e variância constante.

A qualidade dos ajustamentos foi avaliada com base nas estatísticas da raiz quadrada do erro quadrático médio ($RQEM$) (9), correlação entre os valores observados e estimados ($R_{\hat{Y}Y}$) (10). Também foram analisados os gráficos de dispersão dos erros percentuais (11).

$$RQEM = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$R_{\hat{Y}Y} = \frac{n^{-1}(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{(n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2)(n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}} \quad (10)$$

$$ER (\%) = \left(\frac{\hat{Y} - Y}{Y} \right) * 100 \quad (11)$$

em que:

\hat{Y}_i = valor do i-ésimo diâmetro estimado;

Y_i = valor do i-ésimo diâmetro observado;

$\bar{\hat{Y}}$ = média das estimativas de Y_i ;

\bar{Y} = média aritmética de Y_i ;

n = número total de dados observados.

3.6 Modelagem do crescimento e da produção

Foram avaliadas duas alternativas de modelos de crescimento e produção para os diferentes espaçamentos, justificado pelas pequenas variações da capacidade produtiva da área de estudo e tendências de crescimento bem definido.

Os modelos Logístico (12) e Exponencial (13) foram ajustados para avaliar a tendência do crescimento em diâmetro (dap), altura total (Ht) e volume comercial com casca (Vcc/ha) nos espaçamentos estudados.

$$Y = \beta_0 / (1 + \beta_1 \exp^{-\beta_2 I}) + \varepsilon \quad (12)$$

$$Y = \exp(\beta_0 + \frac{\beta_1}{I}) + \varepsilon \quad (13)$$

em que:

Y_i = volume considerado na idade (I);

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = parâmetros do modelo;

I = Idade em meses;

ε = erro aleatório.

Os ajustes dos modelos foram feitos por espaçamento através do método Livenberg-Marquardt, utilizando o software CurveExpert Professional (HYAMS, 2018).

As equações ajustadas foram avaliadas com base no erro padrão residual (EPR)(14), coeficiente de correlação linear entre os valores observados e estimados ($R_{\hat{Y}Y}$)(15) e análises gráficas dos erros relativos percentuais ($ER\%$)(16).

$$EPR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

$$R_{\hat{Y}Y} = \frac{n^{-1}(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}_m)(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{(n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}_m)^2)(n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}} \quad (15)$$

$$ER (\%) = \left(\frac{\hat{Y} - Y}{\hat{Y}} \right) * 100 \quad (16)$$

em que:

i = é a i -ésima observação da variável de interesse;

\hat{Y}_i = valor da i -ésima variável estimada;

Y_i = valor da i -ésima variável observada;

\bar{Y} = é média aritmética de Y_i ;

$\bar{\hat{Y}}_m$ = média das estimativas de Y_i ;

n = número total de dados observados;

p = número de variáveis independentes do modelo.

Posteriormente, foi calculado a Idade Técnica de Corte (ITC) (17). Esta por sua vez, foi obtida pela igualdade entre do incremento médio anual (IMA) (18) e o

incremento corrente anual (ICA) (19), onde se encontra a maior produtividade volumétrica, de acordo com as equações:

$$ITC = (IMA = ICA) \quad (17)$$

$$IMA = \frac{V}{I} \quad (18)$$

$$ICA = V_i - V_{(i-1)} \quad (19)$$

em que: V = volume ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), I = idade (meses), IMA = incremento médio anual e ICA = incremento corrente anual.

3.7 Análise de custos de produção

Os dados foram obtidos junto ao produtor rural e em parceria com a EMATER-MG. Analisou-se os custos médios de produção sendo caracterizados os elementos de despesas referentes a insumos e mão de obra, conforme ANEXO B.

3.8 Análise econômica

Para análise econômica considerou-se taxa de juros de 8% a.a. e os métodos de avaliação de projetos, conforme a seguir:

3.8.1 Valor presente líquido – VPL

A viabilidade econômica de um projeto analisada pelo VPL (20) é indicada pela diferença positiva entre receitas e custos atualizados para uma determinada taxa de desconto (REZENDE e OLIVEIRA, 2001; SILVA et al., 2008). Uma das interpretações desse método é que quando se tem um VPL positivo, indica-se que o projeto é economicamente viável. Logo, deve-se escolher sempre investimentos com VPL positivo, rejeitando-se o VPL negativo.

$$VPL = \sum_{j=1}^i \frac{R_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=1}^i \frac{C_j}{(1+i)^j} \quad (20)$$

em que: R_j = receitas no período j ; C_j = custos no período j ; i = taxa de desconto; j = período de ocorrência de R_j e C_j ; e n = duração do projeto, em anos ou em número de períodos de tempo.

3.8.2 Valor anual equivalente – VAE

O Valor anual equivalente (VAE) (21) é a parcela periódica e constante necessária ao pagamento de uma quantia igual ao VPL da opção de investimento em análise ao longo da sua vida útil. O projeto será considerado economicamente viável quanto maior for o valor do benefício periódico equivalente (REZENDE e OLIVEIRA, 2001; SILVA et al., 2008).

$$VAE = \frac{VPL \times i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad (21)$$

em que: VPL = valor presente líquido; e n = duração do ciclo ou rotação em anos;

3.8.4 Custo médio de produção – CMP

O CMP consiste em dividir o valor atual do custo total pela produção total equivalente (22). A produção equivalente é a quantidade produzida descontada ou atualizada pela taxa de juros. Ele indica o ponto onde se opera a um custo mínimo de produção. O projeto será viável, se estiver abaixo do preço do produto no mercado (SILVA et al., 2008).

$$CMP = \frac{\sum_{j=0}^n CT_j (1 + i)^{-j}}{\sum_{j=0}^n PT_j (1 + i)^{-j}} \quad (22)$$

em que: CT_j = custo total atualizado em cada período, em R\$ ha⁻¹; e PT_j = produção total equivalente em cada período, em m³ha⁻¹.

3.8.3 Razão benefício/custo – B/C

Este método consiste em determinar a relação entre o valor presente dos benefícios e o valor presente dos custos para uma determinada taxa de juros ou descontos (23). Um projeto é considerado viável economicamente se $B/C > 1$. Entre dois ou mais projetos, o mais viável é aquele que apresentar o maior valor de B/C (REZENDE e OLIVEIRA, 2001).

$$B/C = \frac{\sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j}}{\sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j}} \quad (23)$$

em que: R_j = receita ao final do ano j ; C_j = custo no final do ano j ; e n = duração do projeto, anos.

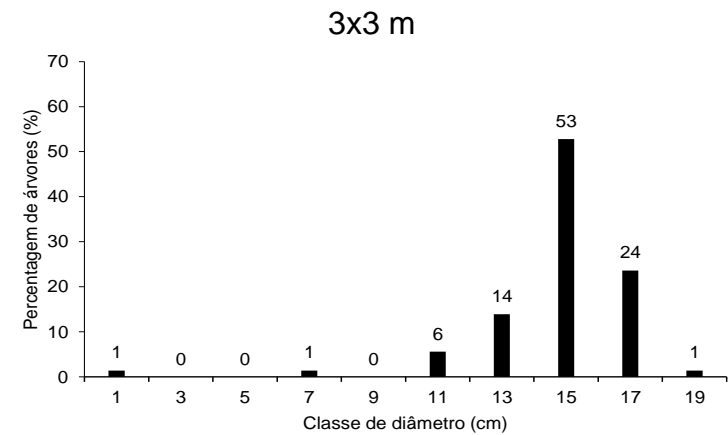
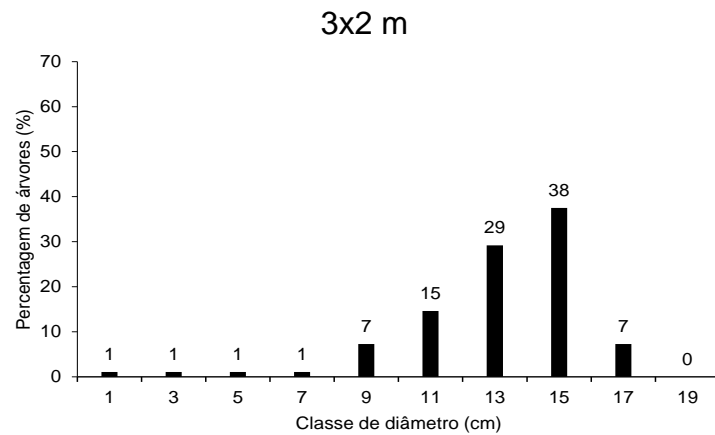
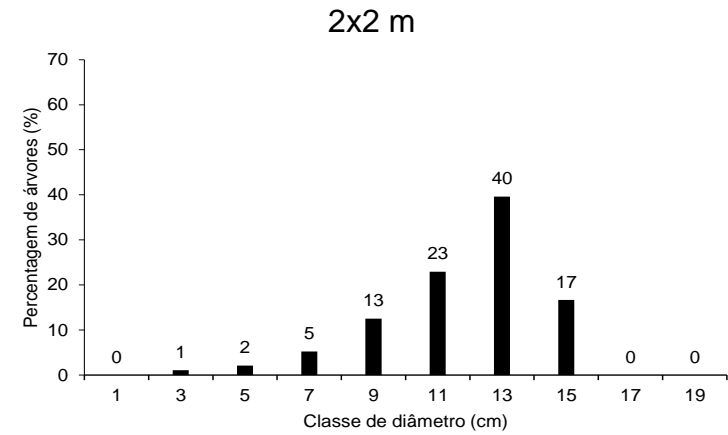
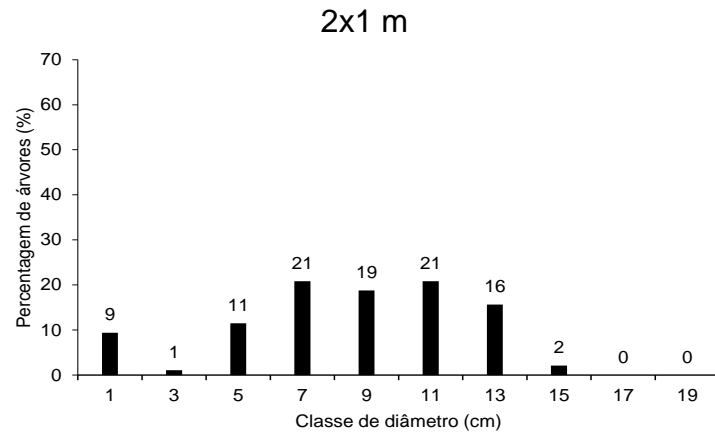
4. RESULTADOS

Na Figura 1 são apresentadas as distribuições de diâmetros observadas aos 54 meses de idade nos diferentes espaçamentos. No espaçamento 2x1 m a maioria dos indivíduos se encontram entre as classes 5 e 13 cm, e mais especificamente, com maiores frequências de observação (42%) na classe 7 e 11 cm. No espaçamento 2x2 m, percebe-se uma tendência de crescimento das classes menores até a classe 13 cm, com 40% dos indivíduos observados. Além disso, observa-se uma redução considerável no número de indivíduos a partir da classe 15 cm.

Para os espaçamentos 3x2 e 3x3 m, nota-se que a classe 15 cm é a que concentra as maiores observações, com 38% e 53% das árvores do povoamento, respectivamente. Ademais, também se verifica que 67% das árvores estão entre as classes 13 e 15 cm no espaçamento 3x2 m e 77% entre as classes 15 e 17 cm para o espaçamento 3x3 m.

Ao se analisar a taxa de sobrevivência do povoamento, aos 84 meses, observa-se que o espaçamento 2x1 m tem a menor taxa com 89,2% de sobrevivência quando comparado aos demais. Os espaçamentos 2x2, 3x2, 3x3 m obtiveram taxas de 98,8%, 92,7% e 99,9% de sobrevivência, respectivamente. Isso indica sinais de competição intraespecífica nas maiores densidades populacionais.

Figura 1 - Distribuições de diâmetro aos 54 meses de idade do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG



Os coeficientes das equações hipsométricas ajustadas para os espaçamentos e idades analisados estão apresentados na Tabela 3. Os coeficientes de determinação ajustado (R^2_{ajust}) variaram de 0,59 a 0,87, e o erro padrão residual (EPR) entre 0,05 m e 0,13 m. Essas estimativas demonstram que o modelo aplicado é eficiente para se obter a variável dependente (Ht) em função da variável independente (dap).

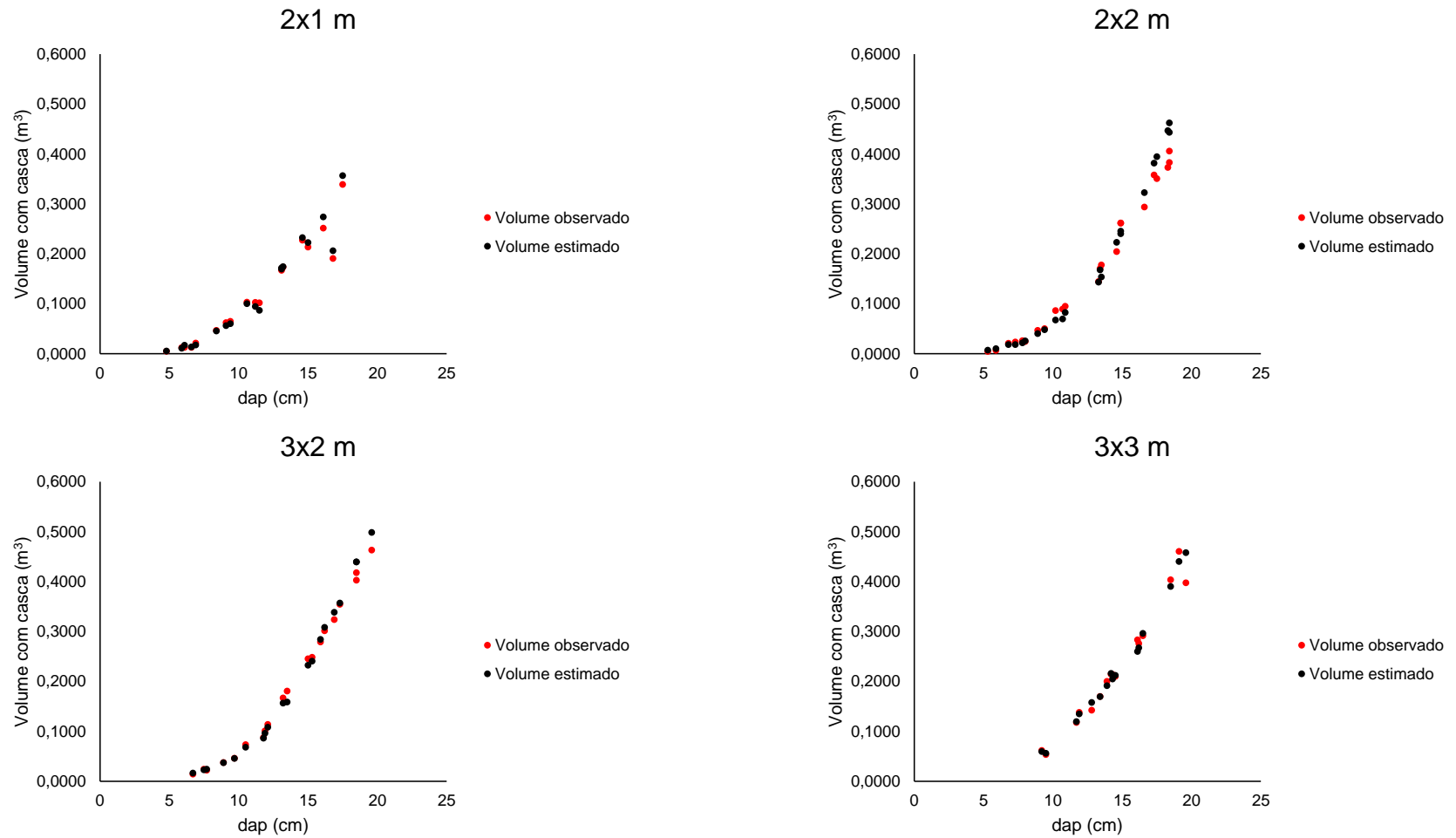
Tabela 3 – Equações hipsométricas ajustadas pelo modelo $Ht = e^{(\beta_0 + \frac{\beta_1}{dap})}$ para o híbrido E. urophylla x E. grandis em diferentes idades e espaçamentos, em Lamim, MG

Idade (meses)	Espaçamento (m)	Estimativas		R^2_{ajust}	EPR
		β_0	β_1		
24	2x1	2,284154	-1,349855	0,5914	0,0565
	2x2	2,447951	-2,798935	0,6632	0,1168
	3x2	2,597508	-3,927793	0,6318	0,0906
	3x3	2,505750	-3,711597	0,8179	0,0733
60	2x1	3,477286	-5,749065	0,8759	0,1133
	2x2	3,574664	-6,861690	0,5528	0,1380
	3x2	3,786143	-9,366198	0,7958	0,0579
	3x3	3,635325	-7,427985	0,8403	0,0291
84	2x1	3,577571	-6,591053	0,8743	0,1187
	2x2	3,891891	-8,875677	0,8532	0,1075
	3x2	4,040725	-11,647795	0,8140	0,1105
	3x3	4,013523	-10,389666	0,6831	0,0903

Fonte: autor (2020)

Também é observada uma tendência exponencial na dispersão do volume em relação aos valores de dap , pois à medida que se aumenta a área útil por planta nota-se valores maiores de volumes individuais, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Dispersão do volume em relação ao *dap* do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* aos 84 meses, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG



Os parâmetros do modelo de Schumacher e Hall para as estimativas de volume ajustado aos dados de cada espaçamento, com suas respectivas estatísticas de ajuste são apresentadas na Tabela 4.

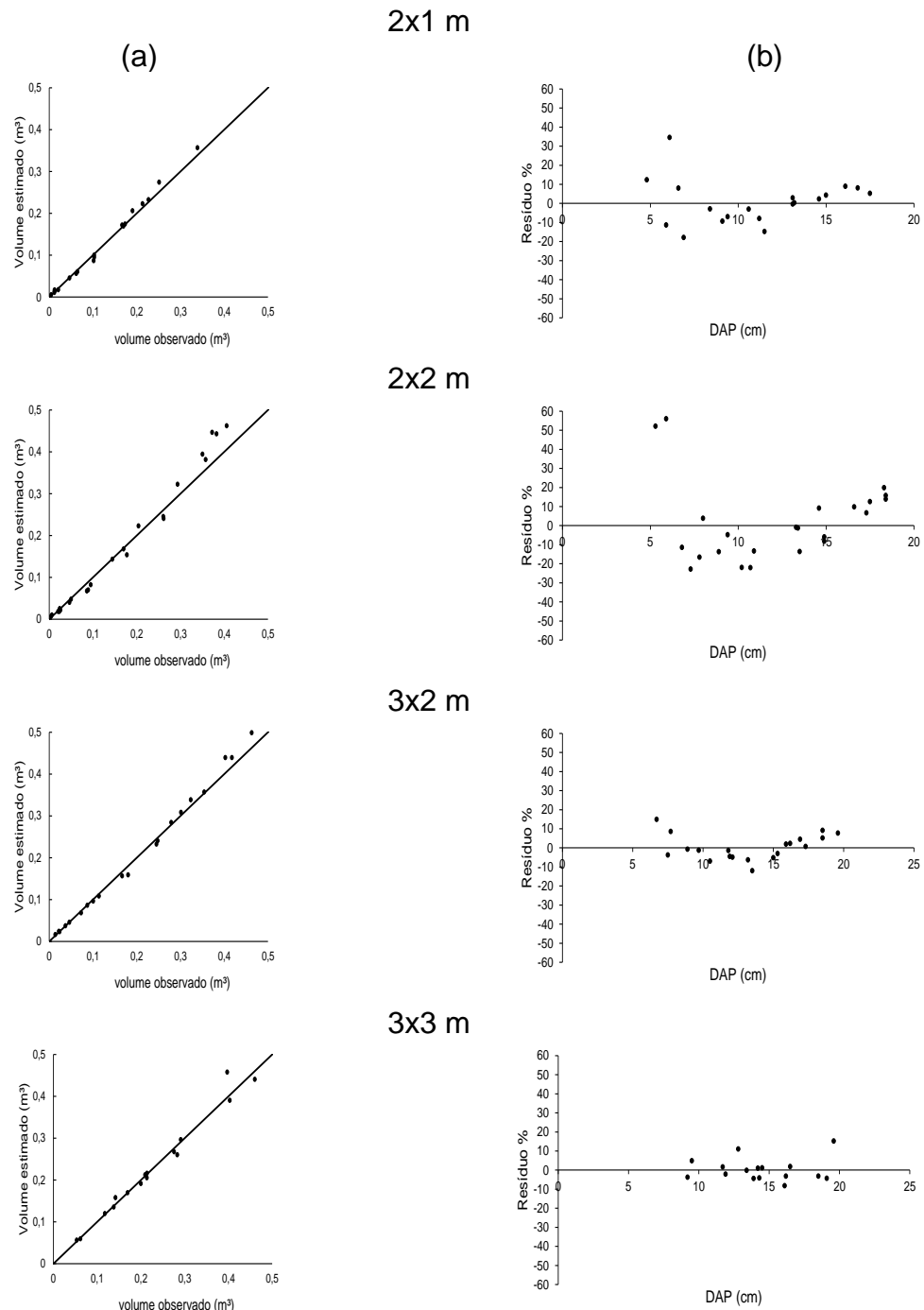
Tabela 4 – Equação de volume ajustada pelo modelo de Schumacher e Hall ($Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 Lndap + \beta_2 LnHt$) para o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos de plantio, aos 84 meses, em Lamim, MG

Espaçamento (m)	Estimativas			R ² ajust	EPR
	β_0	β_1	β_2		
2x1	-12,077549	1,821735	1,735465	0,9911	0,1197
2x2	-11,518782	2,663401	0,864896	0,9781	0,1996
3x2	-11,069371	2,522512	0,842141	0,9960	0,0690
3x3	-10,261476	2,009549	1,018307	0,9896	0,0628

Fonte: autor (2020)

Esse modelo não apresentou tendenciosidade nas estimativas do volume (Figura 3 a). Isso também é corroborado pela análise gráfica dos resíduos, a qual se observa que os erros estão distribuídos uniformemente ao longo das classes de diâmetro para todos os espaçamentos, concentrando-se na faixa de $\pm 20\%$. Nos espaçamentos menores (2x1 e 2x2 m), observa-se uma tendência de superestimação nas classes intermediárias ($5 < dap < 10$ cm) com resíduos atingindo 40% e 55%, respectivamente (Figura 3 b).

Figura 3 – Distribuição de volume individual com casca observado e estimado (a) e dispersão dos erros em porcentagem (b) para o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos de plantio, aos 84 meses, em Lamim, MG



Os valores médios de diâmetro a 1,3 m de altura (*dap*), altura total (*Ht*), volume individual, número de árvores (*N/ha*) e volume, em diferentes idades e espaçamentos, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Médias de diâmetro a 1,3 m de altura (*dap*), altura total (*Ht*), volume individual, número de árvores (*N/ha*) e volume por área para o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos de plantio e idades, em Lamim, MG

Espaçamento (m)	Idade (meses)		
	14	54	84
<i>dap</i> (cm)			
2x1	4,5	9,3	10,1
2x2	4,1	11,9	12,9
3x2	4,9	13,2	14,9
3x3	4,5	14,9	16,1
<i>Ht</i> (m)			
2x1	7,2	16,8	17,4
2x2	5,7	19,6	24,1
3x2	5,9	21,4	25,7
3x3	5,3	22,9	29,0
Volume individual (m ³)			
2x1	0,0028	0,0570	0,0731
2x2	0,0022	0,1094	0,1703
3x2	0,0041	0,1538	0,2419
3x3	0,0042	0,2006	0,2966
Número de árvores (N ha ⁻¹)			
2x1	5.045	4.565	4.460
2x2	2.581	2.553	2.471
3x2	1.729	1.711	1.546
3x3	1.126	1.126	1.110

Continua...

Tabela 5 - Cont.

Volume (m ³ ha ⁻¹)			
2x1	14,07	263,40	328,32
2x2	5,57	280,32	419,51
3x2	6,91	265,88	373,59
3x3	4,75	226,12	329,45

Fonte: autor (2020)

As estimativas dos parâmetros e correspondentes estatísticas das equações de taper ajustadas são apresentadas na Tabela 6. Uma ligeira superioridade foi observada para o modelo de Garay, em relação aos indicadores estatísticos. Na Figura 4 estão os gráficos e dados observados de diâmetros e altura total ajustado dos perfis médios das árvores-amostra. A partir dela, pode-se observar que os diâmetros se distribuem uniformemente, o que demonstra precisão entre o valor observado e o estimado ao empregar esse modelo de afilamento.

Tabela 6 – Estimativas dos parâmetros e estatísticas das equações de afilamento do fuste obtidas para o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG

Espaçamento (m)	Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	R ² _{yy}	RQEM
2x1	Demaerschalk	0,057892	0,794791	-0,244915	0,320571	0,9768	0,8883
	Kozak	1,208346	-1,815343	0,647274	0,500000	0,9809	0,8078
	Ormerod	1,200000	0,586515	0,800000	0,500000	0,9718	0,9788
	Garay	1,277701	0,234238	0,988307	0,200653	0,9864	0,6814
2x2	Demaerschalk	0,144015	0,989956	-0,353683	0,319033	0,9866	0,6623
	Kozak	1,196969	-1,783411	0,617797	0,500000	0,9868	0,6578
	Ormerod	1,200000	0,585601	0,800000	0,500000	0,9805	0,7992
	Garay	1,254359	0,243896	0,985598	0,224025	0,9908	0,5503
3x2	Demaerschalk	0,084789	0,971012	-0,322690	0,317758	0,9454	1,4544
	Kozak	1,219205	-1,836853	0,655999	0,500000	0,9484	1,4150

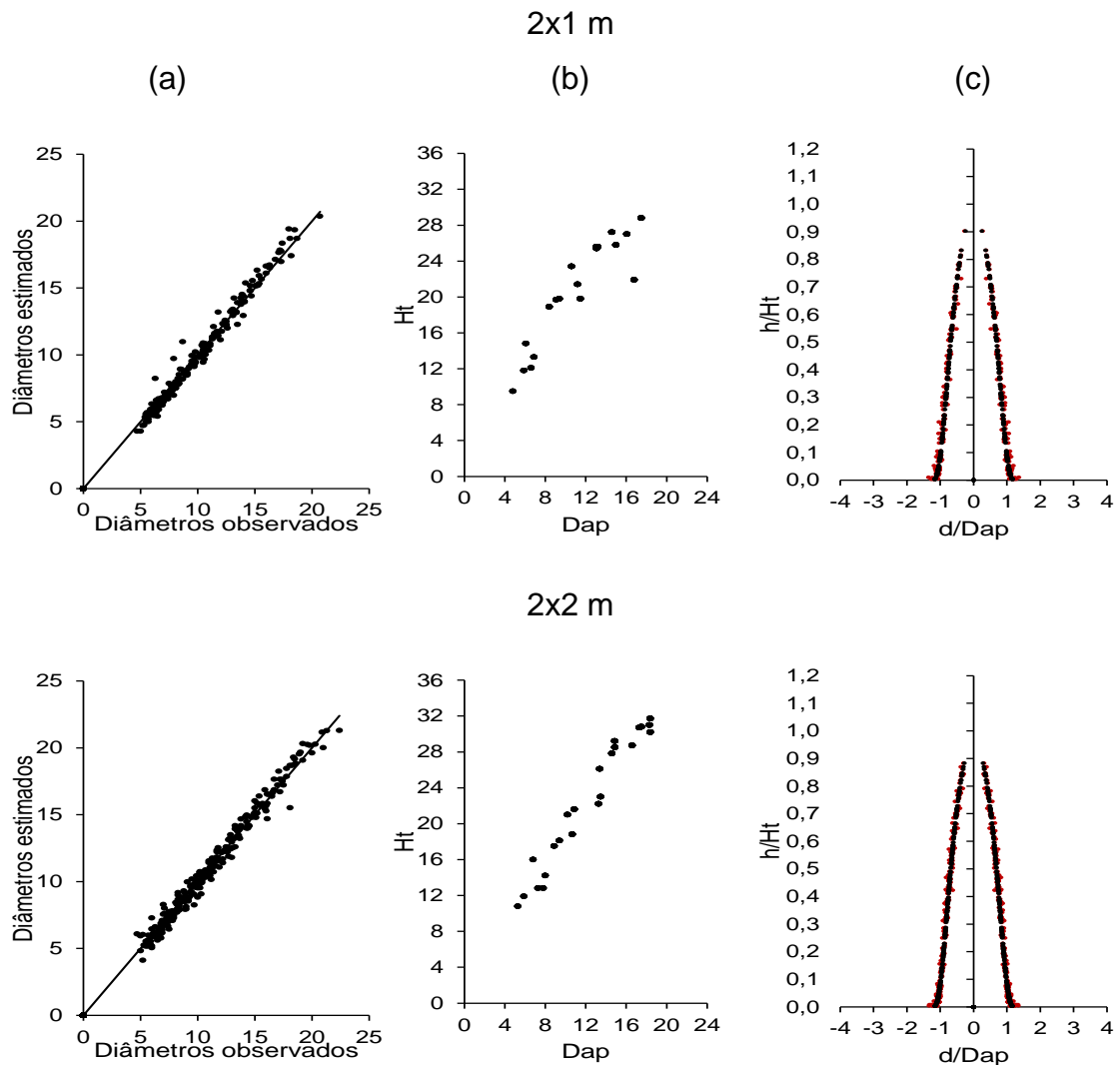
Continua...

Tabela 6 - Cont.

3x3	Ormerod	1,200000	0,572649	0,800000	0,500000	0,9385	1,5412
	Garay	1,348116	0,234314	0,979555	0,157713	0,9544	1,3326
	Demaerschalk	0,163200	1,018929	-0,368967	0,315423	0,9799	0,8261
	Kozak	1,201335	-1,811753	0,647958	0,500000	0,9821	0,7793
	Ormerod	1,200000	0,580534	0,800000	0,500000	0,9742	0,9340
	Garay	1,324334	0,231533	0,982584	0,162981	0,9878	0,6448

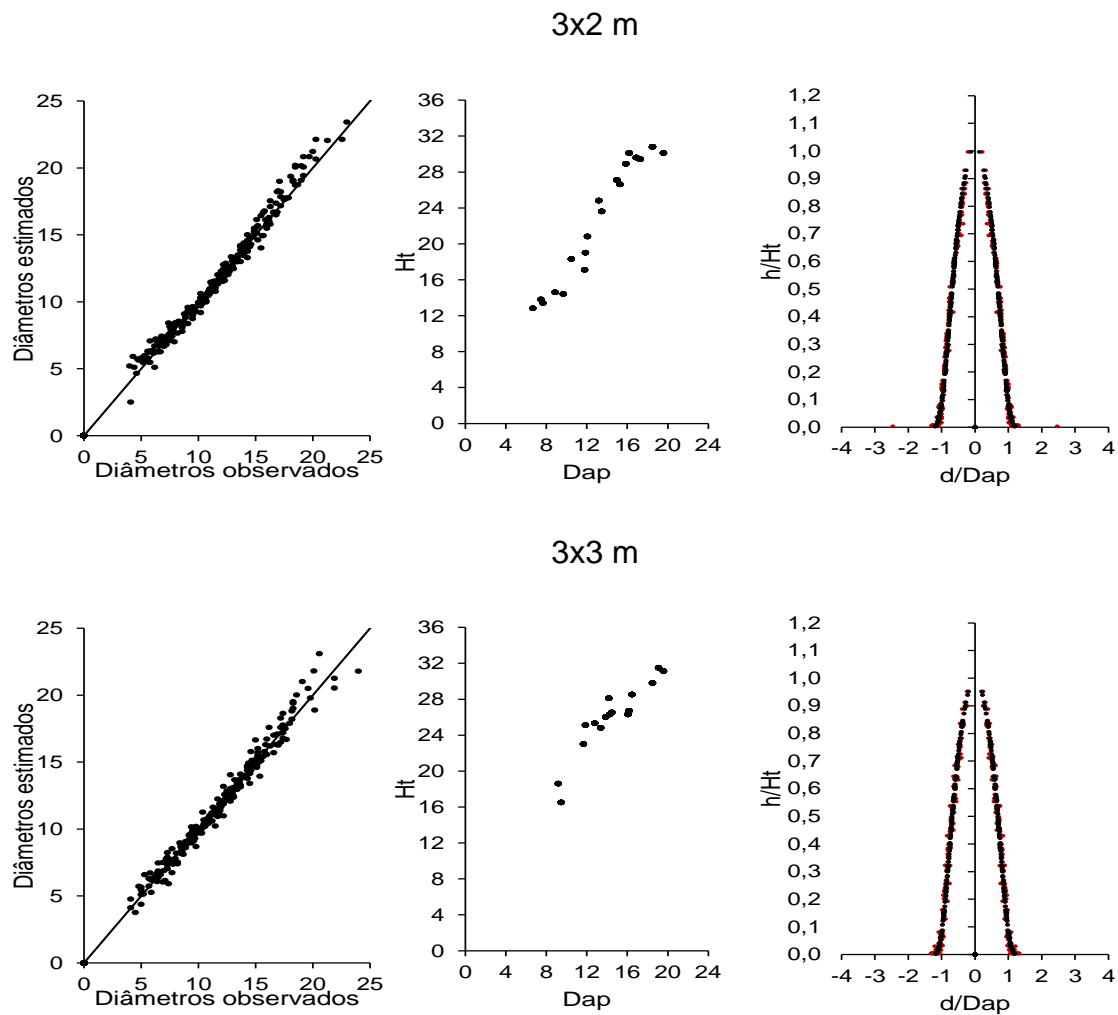
Fonte: autor (2020)

Figura 4 – Diâmetros (a), alturas observadas e estimadas (b) e perfil médio (c) ajustado pelo modelo Garay para o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos de plantio, aos 84 meses, em Lamim, MG



Continua...

Figura 4 – Cont.



Na Tabela 7 são apresentadas as estimativas dos parâmetros e correspondentes estatísticas das equações ajustadas para estimar as variáveis *dap*, altura total e volume de madeira por hectare.

O modelo Logístico apresentou melhores estatísticas que o modelo Exponencial para a variável *dap*, *Ht* e volume por hectare em todos os espaçamentos. Para a variável *dap*, o modelo Logístico apresentou R^2 acima 96,5%, *EPR* variando de 0,25 a 0,86 cm e $R_{\hat{Y}Y}$ superiores 0,98. Isto ocorreu também para a altura total, com valores de R^2 superiores a 97%, *EPR* variando de 0,45 a 1,17 m e correlações acima de 0,98.

Já para o volume por hectare, os modelos demonstraram estatísticas elevadas, com correlações acima de 0,92 e coeficientes de determinação superiores a 87%. No

entanto, observa-se que o modelo Logístico indica melhores ajustes, haja vista apresentar erro padrão residual com menores valores, variando entre 14,7 a 60,4 m^3ha^{-1} .

Tabela 7 – Estimativas dos parâmetros e estatísticas do modelo Logístico ($Y = \beta_0 / (1 + \beta_1 \exp^{-\beta_2 I})$) e Exponencial ($Y = \exp(\beta_0 + \frac{\beta_1}{I})$), ajustados para diâmetro a 1,3 m de altura (*dap*), altura total (*Ht*) e volume por hectare do híbrido E. urophylla x E. grandis, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG

Modelo/Espaçamento (m)		Estimativas dos parâmetros			R^2	EPR	R_{PY}
		β_0	β_1	β_2			
dap (cm)							
Logístico	2x1	10,225019	3,159699	0,063608	96,6798	0,5316	0,9833
	2x2	13,034356	6,472543	0,077495	96,5035	0,8649	0,9824
	3x2	15,171484	5,433267	0,066998	99,7411	0,2584	0,9987
	3x3	16,170812	8,680574	0,086348	99,7496	0,3196	0,9987
Exponencial	2x1	2,477223	-13,741054	-	96,6599	0,5058	0,9832
	2x2	2,804775	-19,241946	-	96,1955	0,8558	0,9808
	3x2	2,927231	-18,817273	-	99,7306	0,2501	0,9987
	3x3	3,056003	-21,119712	-	99,0444	0,5781	0,9952
Ht (m)							
Logístico	2x1	17,412276	5,044923	0,090550	97,6269	0,8394	0,9881
	2x2	25,139116	8,085635	0,062259	98,3228	1,1791	0,9916
	3x2	26,569199	8,864907	0,066568	99,7741	0,4669	0,9989
	3x3	30,228170	12,014472	0,067192	99,8636	0,4546	0,9993
Exponencial	2x1	3,059863	-14,927244	-	96,7029	0,9386	0,9834
	2x2	3,456719	-24,465235	-	98,0673	1,2007	0,9903
	3x2	3,535315	-24,878726	-	99,7135	0,4988	0,9986
	3x3	3,700343	-29,287594	-	99,6432	0,6807	0,9982
Volume (m³ha⁻¹)							
Logístico	2x1	331,278916	107,801641	0,111782	87,0233	60,3985	0,9329
	2x2	424,644546	430,762148	0,124618	92,9714	54,6028	0,9642
	3x2	377,735526	292,594729	0,121196	99,3115	14,7945	0,9966
	3x3	333,160760	395,659263	0,124600	98,9724	16,9035	0,9948

Continua...

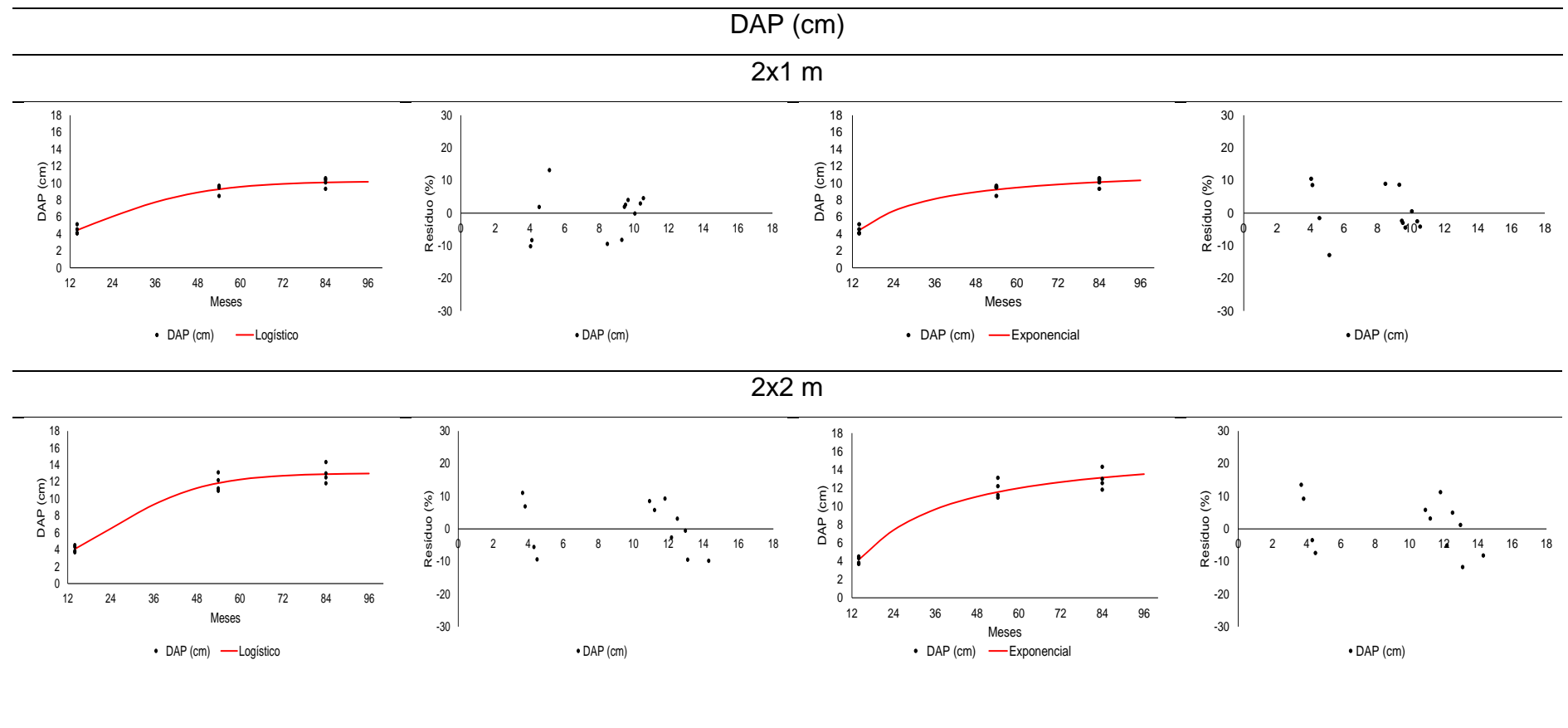
Tabela 7: Cont.

Exponencial	2x1	6,328332	-43,037487	-	86,5295	58,3791	0,9302
	2x2	6,781524	-62,175021	-	92,9434	51,9038	0,9641
	3x2	6,579404	-54,590427	-	98,3011	22,0478	0,9915
	3x3	6,502055	-58,871297	-	98,9133	16,0930	0,9946

Fonte: autor (2020)

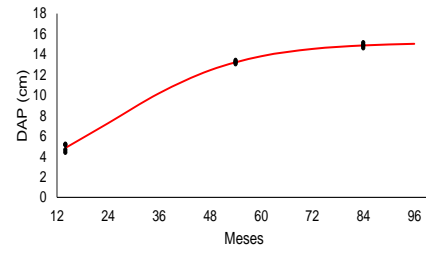
A distribuição dos resíduos de *dap*, *Ht* e volume por hectare nas diferentes idades (24, 60 e 84 meses) para os modelos Logístico e Exponencial são apresentados na Figura 5. De modo geral, o modelo Logístico apresenta resíduos de menores magnitudes, concentrando-se em torno de $\pm 20\%$ para todos os espaçamentos.

Figura 5 – Distribuição dos resíduos de diâmetro a 1,3 m (*dap*), altura total (*Ht*) e volume por hectare, nas idades 24, 60 e 84 meses, para modelos Logístico e Exponencial aplicados ao híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos, em Lamim, MG

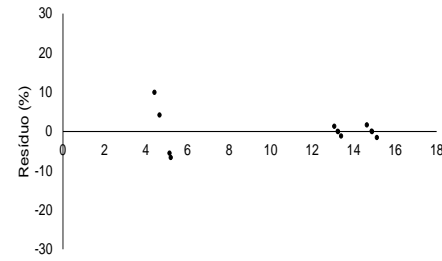


Continua...

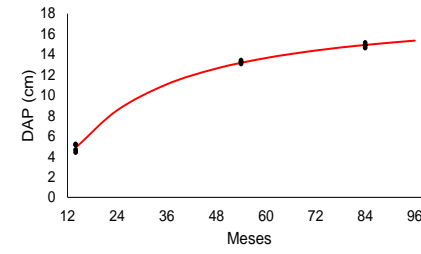
3x2 m



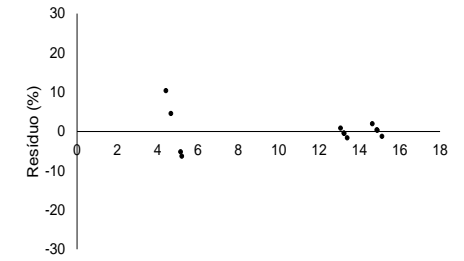
• DAP (cm) — Logístico



• DAP (cm)

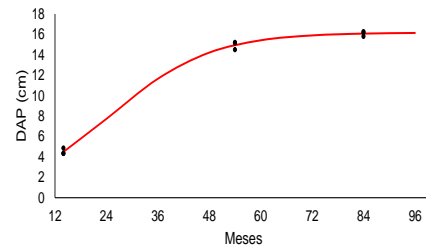


• DAP (cm) — Exponencial

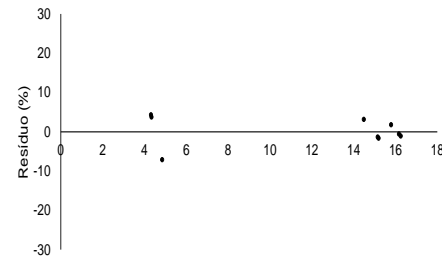


• DAP (cm)

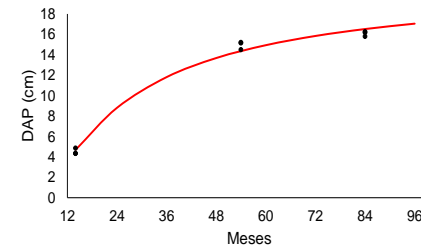
3x3 m



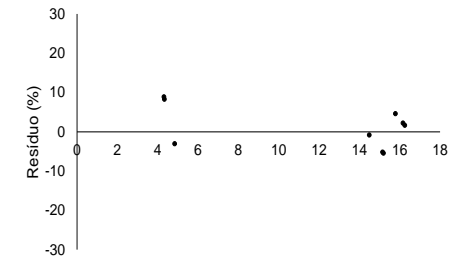
• DAP (cm) — Logístico



• DAP (cm)



• DAP (cm) — Exponencial

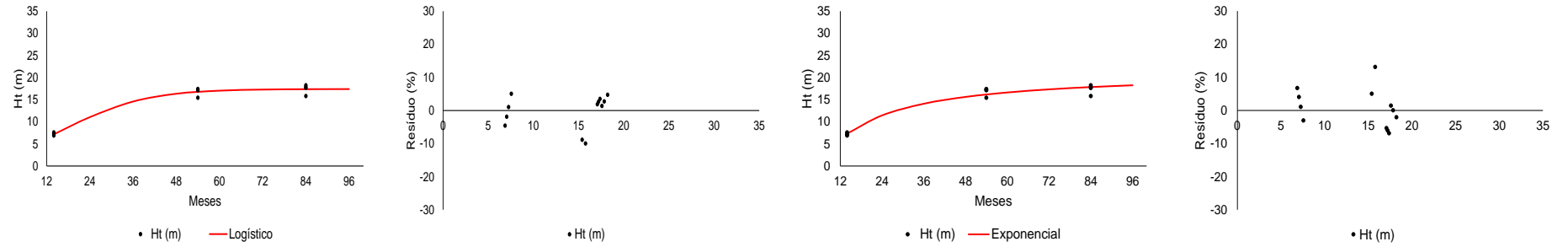


• DAP (cm)

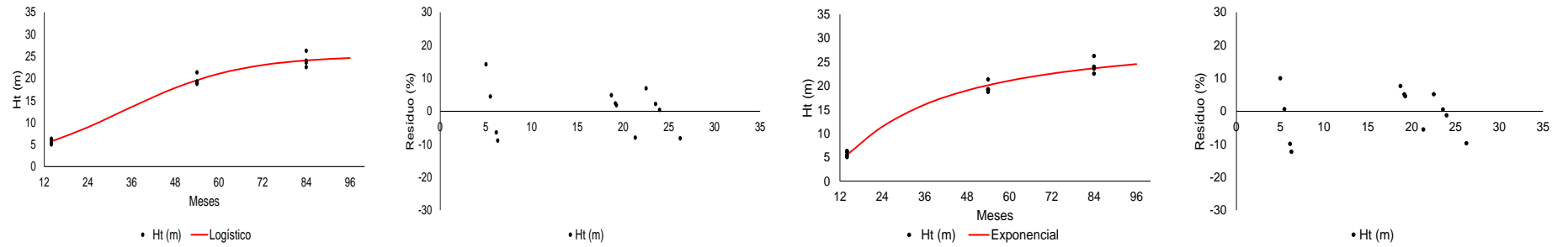
Continua...

Ht (m)

2x1 m

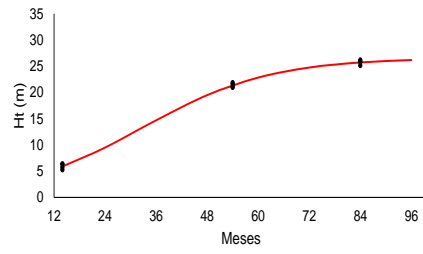


2x2 m

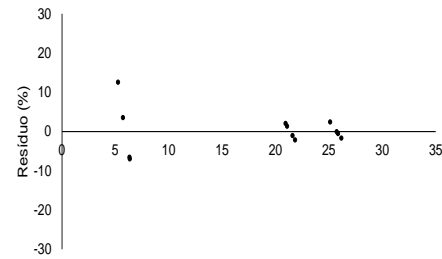


Continua...

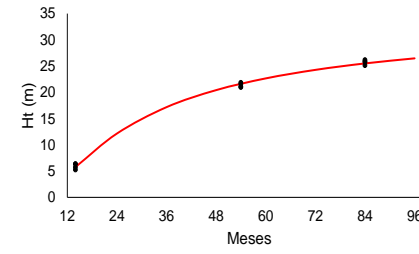
3x2 m



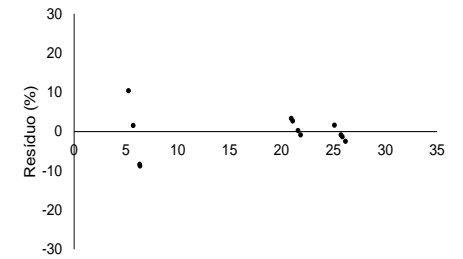
• Ht (m) — Logístico



• Ht (m)

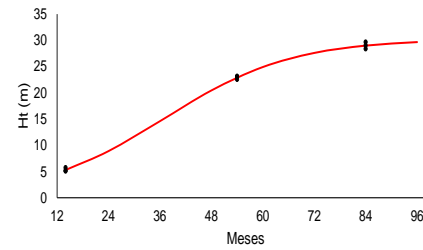


• Ht (m) — Exponencial

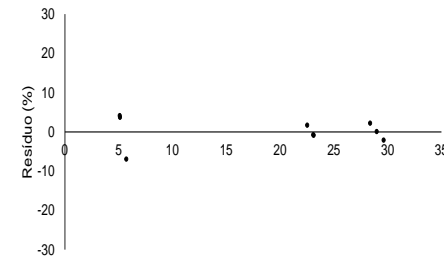


• Ht (m)

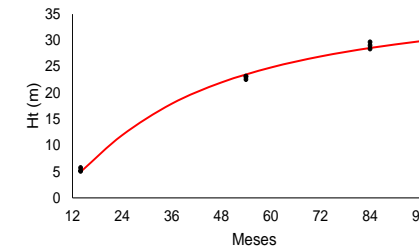
3x3 m



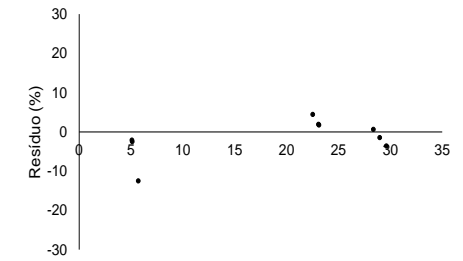
• Ht (m) — Logístico



• Ht (m)



• Ht (m) — Exponencial

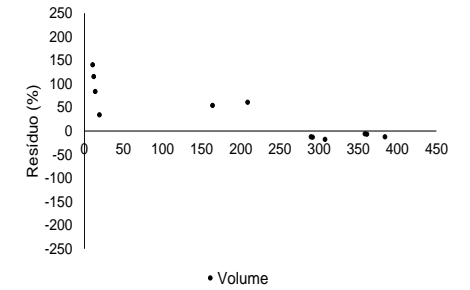
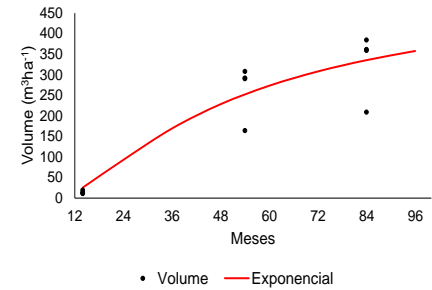
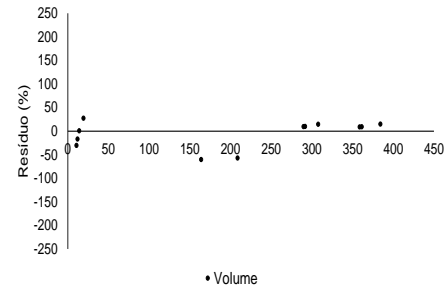
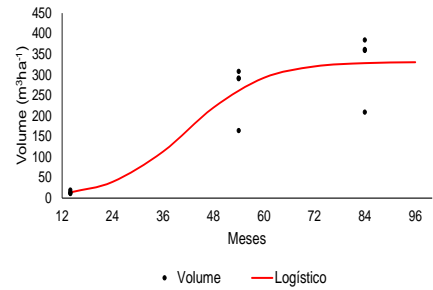


• Ht (m)

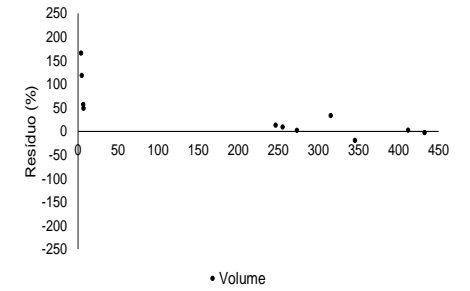
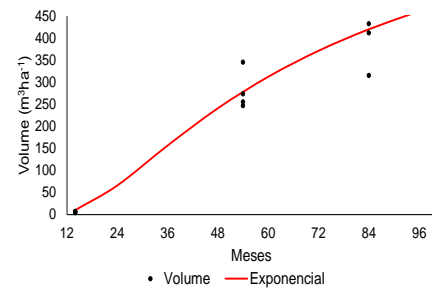
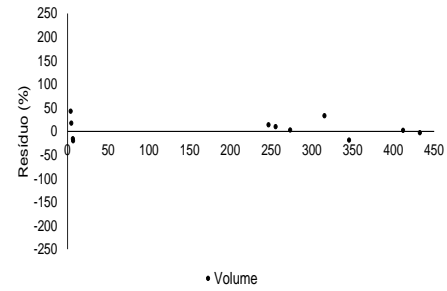
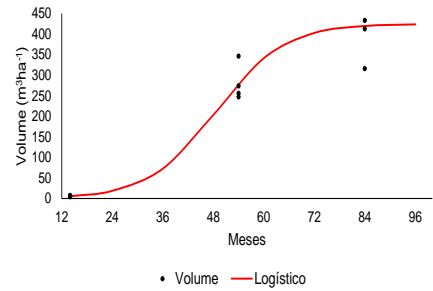
Continua...

Volume por hectare (m^3ha^{-1})

2x1 m

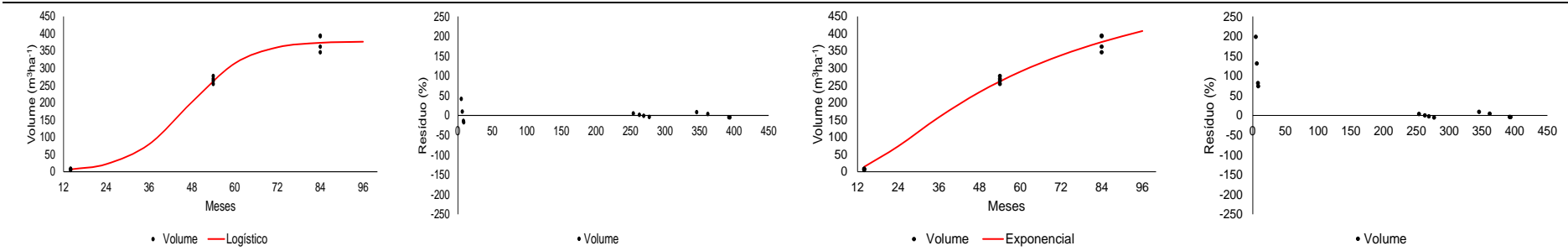


2x2 m

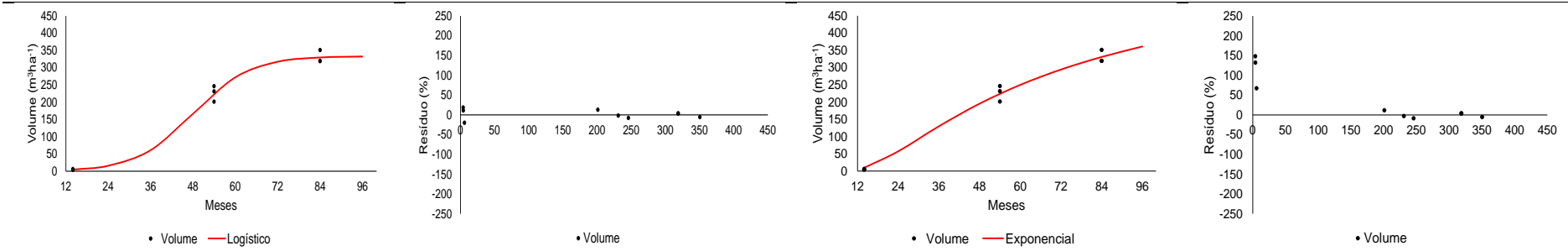


Continua...

3x2 m



3x3 m



Na Tabela 8 são apresentadas as predições de diâmetro a 1,3 m de altura (*dap*) e altura total (*Ht*) e volume por hectare geradas pelo modelo Logístico. Observa-se uma tendência esperada para todas as variáveis analisadas.

Para o *dap*, verifica-se que inicialmente não há diferenças entre os espaçamentos. Nesse período, as árvores se caracterizam por menores dimensões em diâmetro, o que faz com que os seus recursos sejam investidos no crescimento em altura. Além disso, nota-se que o *dap* apresenta valores superiores em espaçamentos maiores, logo após 24 meses.

Em relação à altura total, inicialmente, observa-se que maiores densidades populacionais favorecem o crescimento. No entanto, com respostas mais representativas após os 36 meses, constata-se que à medida que aumenta as áreas úteis por planta, maiores são os valores de *Ht*.

Em relação ao volume de madeira, verifica-se em espaçamentos menores uma tendência de maiores volumes por hectare. Ademais, percebe-se que a taxa de crescimento reduz com o decorrer dos anos em todos os espaçamentos.

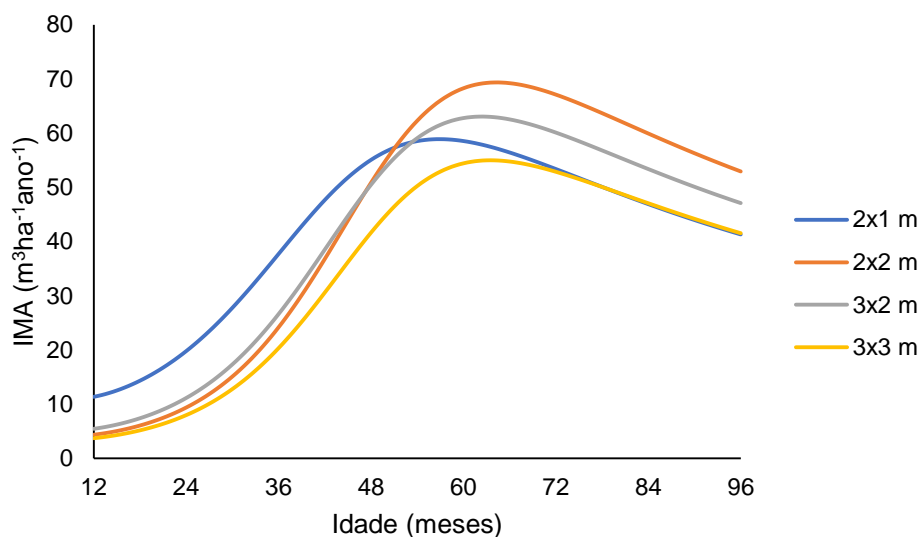
Tabela 8 – Predições de crescimento em diâmetro, altura e volume, em diferentes espaçamentos de plantio e idades, a partir da aplicação do modelo Logístico

Espaçamento (m)	Idade (meses)							
	12	24	36	48	60	72	84	96
<i>dap</i> (cm)								
2x1	4,1	6,1	7,7	8,9	9,6	9,9	10,1	10,2
2x2	3,7	6,5	9,3	11,3	12,3	12,7	12,9	13,0
3x2	4,4	7,3	10,2	12,5	13,8	14,5	14,9	15,0
3x3	4,0	7,7	11,7	14,2	15,4	15,9	16,1	16,1
<i>Ht</i> (m)								
2x1	6,4	11,1	14,6	16,3	17,0	17,3	17,4	17,4
2x2	5,2	8,9	13,5	17,9	21,1	23,0	24,1	24,6
3x2	5,3	9,5	14,7	19,5	22,8	24,8	25,7	26,2
3x3	4,7	8,9	14,6	20,5	24,9	27,6	29,0	29,7
Volume (m ³ ha ⁻¹)								
2x1	11,35	39,58	113,17	220,27	292,71	320,24	328,32	330,50
2x2	4,35	18,75	72,57	203,42	341,42	402,64	419,51	423,48
3x2	5,45	22,27	79,90	201,94	313,91	360,61	373,59	376,76
3x3	3,71	15,95	61,03	166,60	272,16	317,22	329,45	332,32

Fonte: autor (2020)

Ao empregar o modelo Logístico a fim de avaliar a produção em volume, nota-se que o incremento médio anual (IMA) atinge seu ápice entre 60 e 72 meses em todos os espaçamentos. Nessa idade, observa-se uma produtividade máxima de 58,89; 69,35; 63,05 e 54,98 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ nos espaçamentos 2x1; 2x2, 3x2 e 3x3 m, respectivamente (Figura 6).

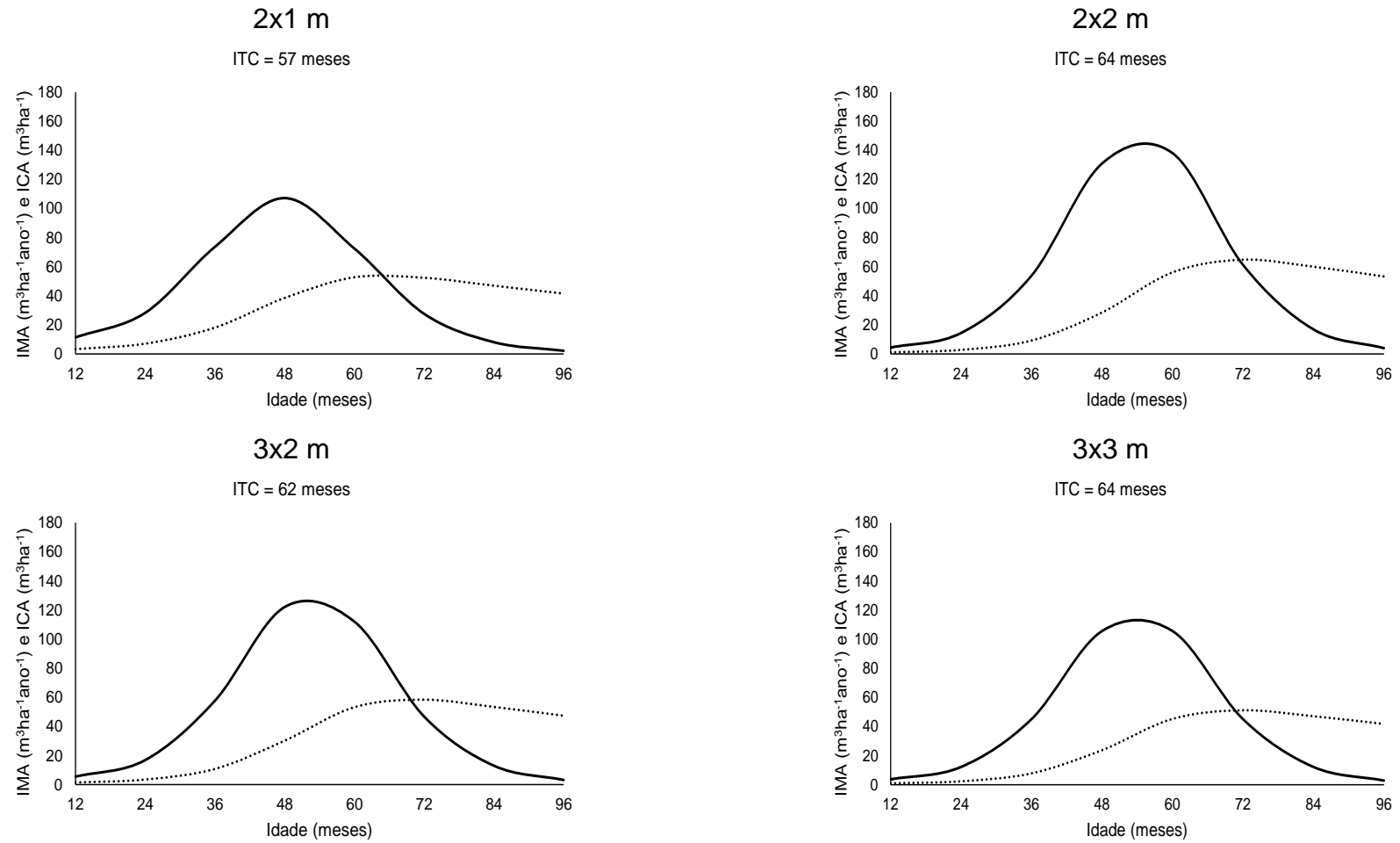
Figura 6 - Incremento médio anual (IMA) em diferentes espaçamentos de plantio e idades obtidos a partir da aplicação do modelo Logístico



A idade técnica de corte (ITC) para o espaçamento 2x1 m é de 57 meses, enquanto que nos espaçamentos 2x2, 3x2 e 3x3 m é de 64, 62 e 64 meses, respectivamente (Figura 7). Observa-se que em todos os espaçamentos o máximo incremento corrente anual (ICA) acontece na transição dos 48 para 60 meses. Logo depois desse período, têm-se um decréscimo acentuado nos seus valores, concomitantemente com a maximização do incremento médio anual (IMA).

O modelo Logístico demonstrou-se eficiente quanto à determinação da ITC, diferentemente do modelo Exponencial. Neste último, apesar de apresentar gráficos de resíduos coerentes e ajustados aos dados, pode-se notar uma subestimação da idade de corte, com idades de 43, 62, 55 e 59 meses para os respectivos espaçamentos.

Figura 7 – Valores de incremento corrente anual - ICA (linha contínua), incremento médio anual - IMA (linha tracejada) e idade técnica de corte (ITC), em diferentes espaçamentos de plantio e idades, em Lamim, MG



Na Tabela 9 são apresentados os indicadores econômicos para o povoamento de *E. urophylla* x *E. grandis* implantado nos diferentes espaçamentos. O valor presente líquido (VPL) para o espaçamento 2x1 é negativo em todas as idades, indicando inviabilidade econômica. Por outro lado, valores positivos de VPL podem ser observados, a partir dos 60 meses no espaçamento 2x2 m e aos 48 meses para os espaçamentos 3x2 e 3x3 m, sendo R\$ 2.703,15, R\$ 438,81 e R\$ 548,82, respectivamente.

O valor anual equivalente (VAE) também seguiu a mesma tendência, com valores positivos para os espaçamentos 2x2, 3x2 e 3x3 m. O maior valor foi observado aos 60 meses para os espaçamentos 3x2 e 3x3 m, sendo R\$ 845,55 e R\$ 842,47, respectivamente, ao passo que para o espaçamento 2x2 m o valor foi de R\$ 750,68 aos 72 meses. Além disso, observa-se que o adensamento de plantio promove os maiores custos médios de produção (CMP), associados a menores rentabilidades e relações benefício/custo.

De acordo com os resultados, a razão B/C foi maior que 1, somente a partir dos 60 meses para o espaçamento 2x2m. Essa relação foi de 1,30, o que significa que as receitas superam os custos em 30%. O espaçamento 2x1 m apresentou relação B/C abaixo de 1, indicando ser inviável economicamente. Ao contrário, espaçamentos mais amplos (3x2 e 3x3 m), apresentam razões ainda maiores, indicando serem mais viáveis financeiramente que os espaçamentos menores (2x1 e 2x2 m) (ANEXO B).

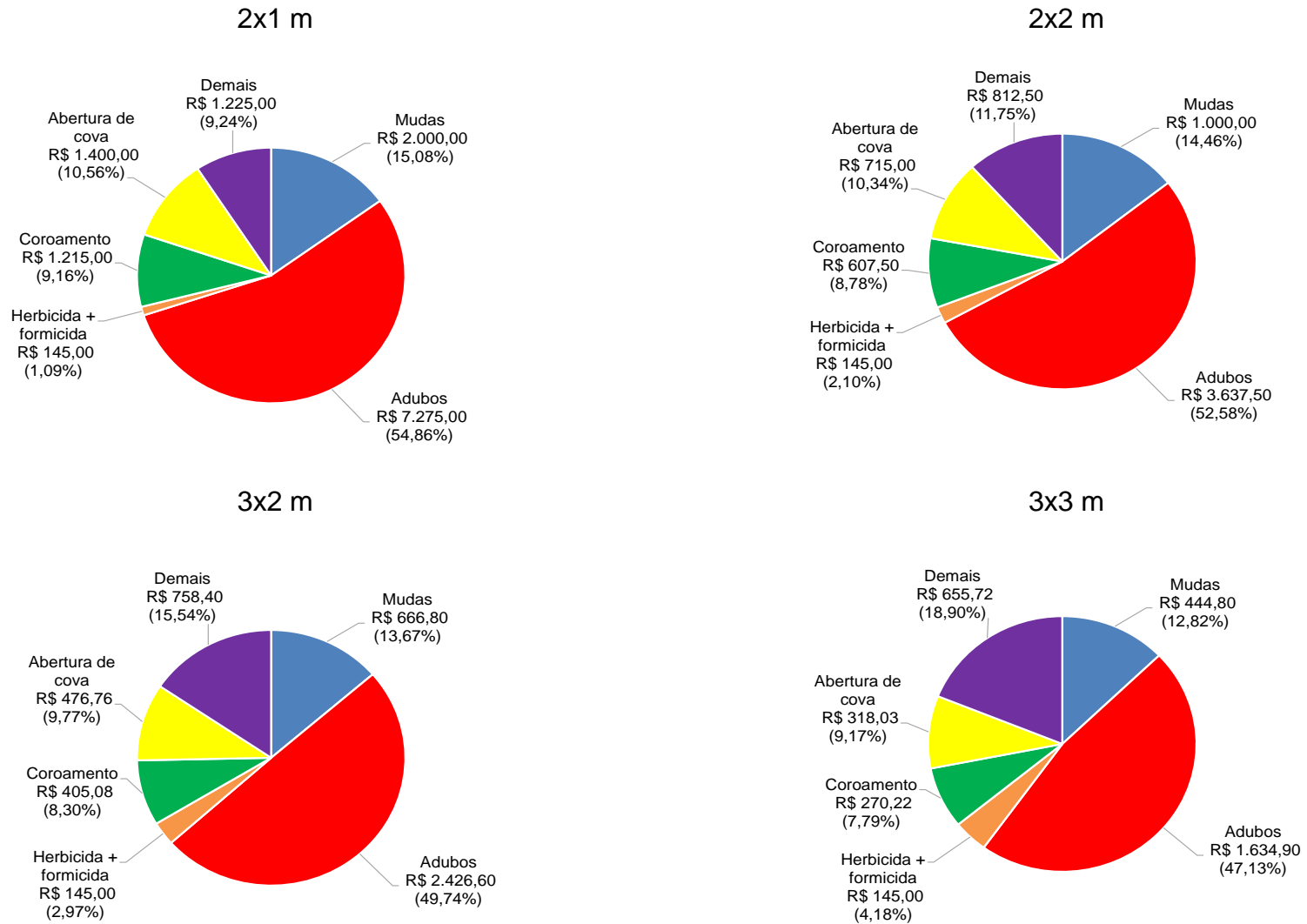
Analisando os componentes de custos (Figura 8), nota-se que espaçamentos reduzidos proporcionam custos relativamente bem superiores quando comparados com espaçamentos mais amplos, principalmente em decorrência de mão de obra e insumos. Aquisição de mudas, adubo e tratamentos culturais, como coroamento e abertura de covas, são os fatores que mais contribuem para a elevação dos custos de produção ao se implantar povoamentos com maior densidade de plantas (ANEXO C).

Tabela 9 – Indicadores financeiros para o povoamento de *E. urophylla* x *E. grandis* implantado em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG

Espaçamento (m)	Idade (meses)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Vn custo	Vn receita	VoCT	VoRT	VPL	VAE	CMP (R\$ m ⁻³)	B/C
			(R\$ ha ⁻¹)							
2x1	48	220,27	21.135,20	11.024,51	15.535,01	8.103,35	-7.431,66	-2.243,77	95,95	0,52
	60	292,71	23.306,02	14.649,95	15.861,69	9.970,51	-5.891,18	-1.475,48	79,62	0,63
	72	320,24	25.650,50	16.028,21	16.164,17	10.100,49	-6.063,68	-1.311,67	80,10	0,62
	84	328,32	28.182,54	16.432,45	16.444,24	9.588,18	-6.856,07	-1.316,86	85,84	0,58
2x2	48	203,42	11.700,09	10.181,24	8.599,91	7.483,52	-1.116,40	-337,06	57,52	0,87
	60	341,42	13.116,09	17.087,91	8.926,59	11.629,75	2.703,15	677,02	38,42	1,30
	72	402,64	14.645,38	20.152,28	9.229,07	12.699,36	3.470,28	750,68	36,37	1,38
	84	419,51	16.297,01	20.996,29	9.509,15	12.251,13	2.741,98	526,66	38,85	1,29
3x2	48	201,94	9.509,96	10.106,96	6.990,10	7.428,92	438,81	132,49	47,09	1,06
	60	313,91	10.750,76	15.711,24	7.316,78	10.692,81	3.376,03	845,55	34,25	1,46
	72	360,61	12.090,82	18.048,61	7.619,26	11.373,69	3.754,42	812,14	33,53	1,49
	84	373,59	13.538,08	18.698,29	7.899,34	10.910,27	3.010,93	578,32	36,24	1,38
3x3	48	166,60	7.591,71	8.338,38	5.580,13	6.128,96	548,82	165,70	45,57	1,10
	60	272,16	8.679,05	13.621,47	5.906,81	9.270,54	3.363,73	842,47	31,89	1,57
	72	317,22	9.853,37	15.876,81	6.209,29	10.005,08	3.795,79	821,09	31,06	1,61
	84	329,45	11.121,64	16.488,91	6.489,37	9.621,12	3.131,75	601,52	33,76	1,48

Sendo: Vn custo = valor final do custo acumulado; Vn receita = valor final da receita; VoCT = valor atual do custo total; VoRT = valor atual da receita; VPL = valor presente líquido; VAE = valor anual equivalente; CMP = custo médio de produção e B/C = razão benefício custo.

Figura 8 – Configuração dos elementos de custos referentes aos diferentes espaçamentos de plantio de *E. urophylla* x *E. grandis*, em Lamim, MG



5. DISCUSSÃO

5.1 Distribuição de diâmetro

A distribuição de diâmetros para os pequenos produtores é uma ferramenta fundamental, pois auxilia na análise de crescimento do povoamento. Os dados desse estudo demonstram que quando se considera um diâmetro mínimo de 6 cm aos 60 meses, há perdas de árvores para comercialização em níveis de 21%, 3%, 3% e 1% para os espaçamentos 2x1, 2x2, 3x2 e 3x3 m, respectivamente.

Medeiros et al. (2017), estudando povoamentos de eucalipto sob diferentes regimes de desbaste com espaçamento inicial de 3x3 m, citam que o conhecimento da distribuição de diâmetros é uma importante estratégia nas escolhas das melhores práticas silviculturais e de manejo. Dentre os resultados os autores citam que, aos 58 meses de idade, as árvores dominantes concentram-se em poucas classes de diâmetro e apresentam tendência leptocúrtica (distribuição mais afilada do que a distribuição normal). Formas estas, similares ao presente estudo, principalmente em comparação com os espaçamentos 2x2, 3x2 e 3x3 m.

No presente trabalho, o espaçamento afetou positivamente a classe de diâmetro, uma vez que ao aumentar a área útil por planta, diminui-se a competição intrarespecífica e, por consequência, maximizou o crescimento e a produtividade. Mesmos resultados são encontrados por Trugilho et al. (2015), Santana et al. (2012) e Trugilho et al. (2010), os quais trabalharam com híbridos de *Eucalyptus* e verificaram que a classe de diâmetro influencia nas propriedades da madeira, principalmente considerando massa seca.

Além disso, também devido à competição por recursos do sítio, observou-se que os espaçamentos adensados, principalmente o 2x1 m, promoveram achatamento das curvas de distribuição de diâmetro e maiores taxas de mortalidade. Tais comportamentos, foram também encontrados por Moraes Neto et al. (2014), Schmidt (2017) e Lima (2018) com estudos de eucalipto em diferentes idades e espaçamentos.

5.2 Relação hipsométrica

Diversos trabalhos demonstram que os modelos hipsométricos que incluem idade, altura dominante, capacidade de sítio e diâmetro quadrático como variável, apresentam estatísticas superiores aos modelos simples (FERRAZ FILHO et al., 2018; MELO et al., 2017). Contudo, modelos que apresentam o *dap* como a única variável independente, proporcionam bons ajustes para a relação $Ht - dap$ e tem como vantagem a facilidade de aplicação e obtenção dos resultados (COSTA et al., 2016; ZANG et al., 2016; MEHTÄTALO et al., 2015). Isso para pequenos produtores é imprescindível, pois o acompanhamento do crescimento e produção da floresta pode auxiliar em tomadas de decisões e intervenções silviculturais.

O modelo de Curtis apresentou ajustes satisfatórios para se obter relações hipsométricas de povoamentos desbastados ou não-desbastados (MEHTÄTALO et al., 2015). Estes autores avaliaram diferentes bancos de dados, incluindo espécies, zonas ecológicas e arranjos espaciais, a fim de obter bons ajustes de equações hipsométricas. Gómez-García et al. (2014) também cita que os modelos simples, como o de Curtis, são recomendados e fornecem bons ajustes para a relação $Ht - dap$, principalmente quando se utiliza um banco de dados com maiores números de observação. Essas informações corroboram que o modelo de Curtis utilizada no presente estudo possui consistência e representa com eficácia a relação entre $Ht - dap$.

Em estudo com objetivo de avaliar modelos hipsométricas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden em São Paulo, Soares et al (2004) afirmam que o modelo de Curtis (1967) apresenta bons ajustes por idade, com valores de R^2_{ajust} variando de 70,97 a 89,87% e EPR de 0,64 a 1,57 m, respectivamente. Ribeiro et al. (2010) afirmam que o modelo de Curtis (1967) ajustados por idade apresentou R^2_{ajust} de 76,27% e EPR de 1,43 m ao coletarem dados de 782 árvores em povoamentos de *Eucalyptus* spp. Os dados do presente estudo estão dentro dessa variação e legitimam o uso desse tipo de modelo, além disso essa abordagem para os pequenos produtores é importante, uma vez que o modelo de Curtis é prático, eficiente e pode reduzir nos custos do inventário florestal.

5.3 Modelo de volume

Os ajustes do modelo Schumacher e Hall para os diferentes espaçamentos apresentam medidas de precisão semelhantes a outros estudos com *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Binoti et al. (2014) afirmam que este modelo não apresenta tendenciosidade e viés, o que demonstra sua efetividade na estimação de volume. Sales et al. (2015) também comentam que as equações de volume ajustadas por esse modelo promovem melhores precisões e consistências aos dados.

Resultados análogos foram encontrados por Andrade (2017), que avaliou diferentes modelos volumétricos para *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* entre as idades de 60 e 84 meses. Nesse estudo, o autor selecionou o modelo Schumacher e Hall por apresentar R^2_{ajust} de 0,99 e EPR de 8,34% ao se analisar plantios localizados no nordeste da Bahia.

Ao estudarem diferentes algoritmos para o ajuste de modelos volumétricos por Schumacher e Hall, Silva et al. (2009) concluíram que não há riscos quanto ao uso deste modelo na sua forma linear para povoamento de clones de eucalipto, pois não demonstram tendenciosidade e seus ajustes são representativos. Binoti et al. (2016) citam que o modelo de Schumacher e Hall apresentou correlação elevada entre os volumes observados e estimados, com valores de 0,993, ao se estimar o volume de 15 híbridos *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* no sul da Bahia, com idades variando entre 32 e 132 meses.

5.4 Afilamento do fuste

Ao avaliar povoamentos do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes condições de espaçamento, aos 96 meses de idade, Souza et al. (2016) verificaram que o modelo de Garay foi o mais indicado para se realizar ajustes de equações de afilamento. Leite et al. (2006) e Nogueira et al. (2008) também citam que este modelo consegue estimar com precisão as variações no fuste devido às suas propriedades estatísticas, o qual pode ser replicado em diferentes espécies e apresentando o comportamento de realidade biológico.

Com o objetivo de quantificar e avaliar o efeito de modelos de afilamento utilizado sobre a conversão do *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em

multiprodutos aos 84 meses de idade na Zona da Mata mineira, Campos et al. (2014) afirmam que o modelo de Garay obteve o melhor ajuste para descrever o perfil das árvores, visto apresentar as menores dispersões de resíduos em torno da média, além de maiores coeficientes de correlação e determinação. Esses dados corroboram com o presente estudo.

O espaçamento exerce forte influência sobre o afilamento do fuste, já que modificam as condições do ambiente em que as árvores estão inseridas e a disponibilidade dos recursos de crescimento. Além disso, a conicidade é menos acentuada quando as árvores são conduzidas em espaçamentos reduzidos, pois os recursos são destinados majoritariamente para as porções superiores do fuste devido à competição interespecífica e a busca por luz (SCHONAU e COETZEE, 1989; ZEIDE, 1993; BALDWIN JR et al., 2000).

No presente estudo observa-se que em espaçamentos mais amplos, as árvores possuem uma conicidade maior, ao contrário do que acontece com espaçamentos menores. O mesmo princípio foi observado por Pinkard e Neilsen (2003) e Rance et al. (2012), que estudaram o efeito do afilamento em espécies de *Eucalyptus* sob diferentes arranjos espaciais e sítios na Austrália. Os autores constataram que fustes mais cilíndricos ocorriam em árvores mais jovens e em espaçamentos menores.

5.5 Modelos de crescimento e produção

Modelos de crescimento e produção que utilizam apenas a idade como variável independente devem ser escolhidos para áreas com taxa de crescimento bem definido e que não apresentem variações significativas de capacidade produtiva (CAMPOS e LEITE, 2017). Logo, no presente estudo, em função da área relativamente reduzida e tendência observada dos dados, optou-se pelo modelo Logístico univariado.

O crescimento e produtividade de uma floresta são resultados das interações entre fatores bióticos e abióticos. O espaçamento é uma das variáveis que mais influenciam os parâmetros dendrométricos dos povoamentos de eucalipto, juntamente com fertilização, características climáticas e edáficas (ZEIDE, 1993; FREITAS et al., 2020).

Os resultados demonstraram que o diâmetro das árvores sofreu influência da densidade de plantio e, conseqüentemente, afetou as relações hipsométricas nos diferentes espaçamentos. Ferreira et. al (2014), assim como Oliveira Neto et al. (2010) e Stape et al. (2010), afirmam que os valores de *dap* aumentam à medida que se amplia a área útil por planta, justificado pela disponibilidade dos recursos de crescimento e espaço para o sistema radicular.

A diminuição do espaçamento leva a observações de maiores volumes totais por hectare, enquanto que em maiores espaçamentos têm-se maiores valores de diâmetro à altura do peito (*dap*) e volume individual (SILVA et al., 2016). Esses resultados corroboram com Xue et al. (2011), Forrester et al. (2013) e Stape e Binkley et al. (2010) ao estudarem diferentes espécies de eucaliptos.

Essa mesma tendência é observada no presente estudo para a variável altura total. Estudos demonstram que o híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* apresenta uma eficiência do uso de recursos inerentes ao seu crescimento associado com uma dominância apical e plasticidade fisiológica de acordo com o ambiente que se desenvolve (FERNANDEZ et al., 2011; BINKLEY et al., 2002).

Em Minas Gerais, os sítios apresentam déficit hídrico anual em torno de 50% de sua área total e níveis de evapotranspiração variando entre 914 e 1.677 mm por ano (LEMOS FILHO et al., 2007; FREITAS et al., 2020). Na área de estudo, região sul do estado, observa-se que o sítio é considerado muito bom, pois apresenta precipitação em torno de 1.500 mm por ano, com qualidade de solo e níveis de radiação solar adequado para produção florestal. Portanto, essas características refletem no maior crescimento em altura para espaçamentos amplos, justificado pela menor competição por recursos de crescimento.

Trabalhos reportam que o crescimento em altura não é influenciado por diferentes espaçamentos (TENÓRIO et al., 2018; BARBOSA et al., 2019; LOPES et al., 2017). No entanto, no presente estudo, observou-se que o espaçamento influenciou positivamente o crescimento em altura, uma vez que esta variável apresentou maiores valores nos espaçamentos com maiores áreas úteis. Isso também é corroborado por LEITE et al. (2006), SARTÓRIO (2014) e SILVA et al. (2019).

O espaçamento influenciou o volume por hectare. Ribeiro et al. (2017), estudando o híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com área útil por planta variando de 1,50 m² (6.667 árvores/ha) a 15,75m² (635 árvores/ha) e idade de 72 meses, comentam que as maiores densidades de plantio apresentam maiores produções de biomassa do fuste por hectare e árvores com diâmetros pequenos, enquanto que espaçamentos amplos possuem uma redução de 70 m³ha⁻¹.

No presente estudo, ao se comparar espaçamentos reduzidos (2x1 e 2x2 m) e amplos (3x2 e 3x3 m) observa-se diferença de aproximadamente 85 m³ha⁻¹ aos 72 meses, com posterior tendência de estabilização ao longo da idade. Isso também é corroborado por Binkley et al. (2017), Soares et al. (2016), Kim et al. (2015) e Moulin et al. (2017) ao estudarem as interações de clima, espaçamentos, fatores genéticos e silviculturais de clones de *Eucalyptus* cultivados no Brasil, em sítios com condições tropicais diferentes.

Tal comportamento é justificado pelo aumento da competição por recursos de crescimento e maiores taxas de mortalidade nos espaçamentos menores, como nos 2x1 e 2x2 m, com o avançar da idade. Espaçamentos muito reduzidos promovem desenvolvimento mais rápido do Índice de Área Foliar (IAF), elevando a interceptação de luz e a taxa fotossintética (GONÇALVES et al., 2013). No entanto, no espaçamento 2x1 m observa-se que a competição interespecífica foi mais acentuada, com maior número de árvores suprimidas ou mortas, que gerou menores médias de volume por área quando comparado com o espaçamento 2x2 m.

Em relação aos incrementos de volume, Freitas et al. (2020) mencionam que em Minas Gerais são observadas médias de produtividades de eucalipto que variam de 18,7 a 50,8 m³ha⁻¹ano⁻¹, aos 72 meses de idade. Alcântara (2015) afirma que o IMA, aos 84 meses, varia de 20 até mais de 50 m³ha⁻¹ano⁻¹ quando se consideram os dados de solo e fatores climáticos. Valores superiores são mencionados por Ferreira et al. (2014), que citam produtividades médias entre 50,9 e 67,3 m³ha⁻¹ano⁻¹, em espaçamentos com área útil variando entre 3 e 7,5 m², para povoamentos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, aos 72 meses de idade, em Avaré, SP.

No presente estudo, observa-se também tendências de menores Idades Técnicas de Corte (ITC) para espaçamentos reduzidos, como é o caso do 2x1 m. Por outro lado, em termos práticos, os espaçamentos 2x2, 3x2 e 3x3 m não apresentaram

diferenças expressivas nas ITCs. Isso sugere que a densidade de plantio de 2.500 árvores/ha proporcionou eficiência de exploração do sítio com produtividade mais elevada. Entretanto, devem-se levar em consideração os fatores econômicos e ecológicos, como ciclagem e exportação de nutrientes.

Ao avaliar a produção de biomassa em diferentes espaçamentos em povoamento de *Eucalyptus grandis*, no Rio Grande do Sul, Schwerz et al. (2020) verificaram que no espaçamento 2,0 x 1,5 m foram observados maiores valores. Isso está relacionado ao fato que o povoamento estudado apresentou eficiência de uso dos nutrientes e, por sua vez, os converte em biomassa com eficácia. Os autores ainda informam que, nesse espaçamento, as rotações de colheita são antecipadas e que ocorre maior exportação de nutrientes quando se destina a madeira para fins energéticos.

Umas das práticas para minimizar a exportação de nutrientes é a manutenção dos resíduos na área e a fertilização mineral, algo não realizado pela maioria dos pequenos produtores por questões econômicas e técnicas. Apesar de mencionarem que a fertilização mineral é fundamental e que, mesmo aplicada, normalmente não alcançam os níveis ideais, Schumacher et al. (2019), Resquin et al. (2019) e Laclau et al (2010) comentam que a manutenção dos resíduos sobre o solo aumenta a capacidade de retenção da água, promove melhorias na fertilidade natural e enriquece a atividade da microbiota do solo, o que favorece a mineralização do nitrogênio.

O sistema de colheita tem importantes implicações na exportação de nutrientes. Entre os pequenos produtores da Zona da Mata mineira é característico o sistema semi-mecanizado e o não descascamento do material lenhoso. De acordo com Bentacor et al. (2019), que estudaram diferentes densidades de plantio (2.220 – 4.440 plantas/ha) e sistema de colheita para *E. dunni*, quando a madeira não passa pelo processo de descascamento cerca de 50% de N, 40% de P, 30% de K, 40% de Ca e 35% de Mg permanecem no sítio explorado. Além disso, os autores observaram que a densidade de plantio não afetou a produção de biomassa total e o rendimento energético por hectare. Logo, práticas silviculturais que reponham esses nutrientes são estratégias vantajosas quanto ao equilíbrio do sistema.

A escolha do material genético também pode ser outra estratégia importante para pequenos produtores. Hakamada et al. (2020) relatam que povoamentos de *E.*

urophylla x E. grandis apresentam alta produção de biomassa associado à eficiência no uso da água e baixas taxas de transpiração, quando avaliados em diferentes níveis de espaçamento. Os autores mostram que depois de 30 meses após o plantio, o incremento de biomassa individual de diferentes clones diminuiu com o aumento da densidade populacional, passando de 21 kg/árvore, quando estabelecido com 590 árvore/ha, para 6 kg/árvore com 2.950 árvores/ha. Isso demonstra que a espécie e o espaçamento escolhidos influenciam diretamente na produtividade e na eficácia dos recursos do meio em que está inserido, o que leva a possíveis decréscimos nas taxas de mortalidade e exportações de nutrientes.

5.6 Análise econômica

Sob o aspecto econômico, Pedroso Filho et al. (2018) comentam que os espaçamentos com áreas úteis de 5 m² são os mais indicados para fins energéticos, pois apresentam eficiência no uso dos recursos do sítio e maiores receitas. No entanto, Soler et al. (2018) mencionam que os menores espaçamentos possuem maiores custos operacionais, com maiores quantidades de mudas e preparo de solo por área.

O espaçamento influencia diretamente na viabilidade de projetos florestais. De acordo com Fernandes (2017), dependendo do arranjo espacial implantado é observado aumento dos custos de produção, principalmente, na implantação e manutenção do primeiro ano, já que necessita de maior quantidade de linhas de preparo de solo e controle de mato competição. Em uma empresa do setor florestal localizada na região do Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais, o autor relata que o custo total por hectare com povoamentos de Eucalyptus spp., aos 81 meses, para o espaçamento 3 x 3 m foi de R\$ 7.143,46, enquanto que para o arranjo espacial 6,0 x 1,5 m girou em torno de R\$ 6.839,83.

Os custos de implantação e manutenção em espaçamentos de plantio adensados podem conduzir o projeto florestal à inviabilidade financeira. Em estudos com o objetivo de realizar a análise financeira, econômica e de sensibilidade de duas propostas de investimento florestal, Pasa et al. (2017) demonstram que o aumento da densidade de plantio com espécies de Eucalyptus spp. aos 96 meses, implantadas

em propriedades rurais baseadas na agricultura familiar da região Centro Serra – RS, acompanhado de taxas de juros elevadas, reflete em retornos financeiros baixos em relação ao investimento inicial. Os autores citam que o espaçamento 2,0 x 2,5 m apresenta vantagens econômicas quando comparados com o espaçamento 1,0 x 1,5 m, haja vista demonstrar VPL de R\$ 4.677,82, relação B/C de 1,99 e CMP de R\$ 22,52, considerando uma taxa de juros de 7,74%. Por outro lado, com o objetivo de promover uma análise econômica e de sensibilidade em projetos de reflorestamento de eucalipto de uma empresa florestal na microrregião de Vitória da Conquista - BA, Virgens et al. (2016) afirmam que a atividade florestal com eucalipto destinada a produção de carvão, estabelecida em espaçamento 3x3 m e corte final aos 60 meses, possui custos de implantação e manutenção em torno de R\$ 3.007,84 ha⁻¹. Nestas condições, observa-se viabilidade econômica como alternativa de renda para pequenos produtores rurais.

Estudando a produção de florestas energéticas de eucalipto como alternativa na agricultura familiar no município de Espumoso, localizado na região centro-norte do Rio Grande do Sul, Georgin et al (2014) relatam custos médios de implantação e manutenção na ordem de R\$ 2.908,50, em espaçamento 3x2 m. Castro et al. (2011) e Fiedler et al. (2011) observaram valores de R\$ 2.722,56 ha⁻¹ e R\$ 3.419,80 ha⁻¹, respectivamente. Dinardi (2014) relata que os custos de implantação e manutenção, até 36 meses, variam de R\$ 4.182,57 em espaçamentos mais amplos (3 x 2 m) para R\$ 7.778,25, em condições de maiores densidades de plantio (1,5 x 1,0 m).

Ao analisar povoamentos de *E. grandis* x *E. urophylla* no Espírito Santo, Gonçalves et al (2017) relatam que sítios mais produtivos apresentam retornos econômicos maiores, o que implica em menores riscos financeiros. Os autores também descrevem que a rotação ótima para sítios bons acontece em torno de 72 meses, ao se utilizar o espaçamento 3x3 m. Isso corrobora com o presente estudo, onde observou-se ITC para esse espaçamento aos 64 meses.

6. CONCLUSÃO

- Nos espaçamentos reduzidos as árvores apresentaram menores distribuições de diâmetros e altura;
- A idade técnica de corte apresentou tendência de redução em menores espaçamentos;
- O aumento na densidade de plantas (menores espaçamentos) não promoveu aumento proporcional na produção volumétrica;
- Os espaçamentos mais amplos apresentam melhores indicadores econômicos em relação aos reduzidos, indicando inviabilidade no 2x1 m.

7. REFERÊNCIAS

- ALCANTARA, A. E. M. **Redes neurais artificiais para prognose do crescimento e da produção de povoamentos de eucalipto em Minas Gerais**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.
- ANDRADE, V. C. L. Modelos volumétricos de dupla entrada para aplicar em povoamentos florestais brasileiros. **Floresta e Ambiente**, v. 24, n. 01, p. 1-10. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.135415>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 06, p. 711-728, 2013.
- ASSIS, M. R.; BRANCHERRIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 01, p. 519–536. 2016. Disponível em: 10.1007/s00226-016-0812-6. Acesso em: 14 mar. 2020.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – BEN. **Relatório síntese: ano base 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 67 p.
- BALDWIN JR., V. C.; PETERSON, K. D.; CLARK, A.; FERGUSON, R. B.; STRUB, M. R.; BOWER, D. R. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old Loblolly Pine. **Forest Ecology and Management**, v. 137, n. 1/3, p. 91-102, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00340-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00340-0). Acesso em: 06 jan. 2020.
- BARBOSA, R. A.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, C. H. R.; SILVA, M. L.; CACAU, F. V.; CALIMAN, J. P. Growth, yield and economic analysis of an eucalypt-soybean consortium: effect of the distance between trees within the row. **Revista Árvore**, v. 43, n. 02, p. 1-10. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000200002>. Acesso em: 07 mar. 2020.
- BENTACOR, L.; HERNANDÉZ, J.; DEL PINO, A.; CALIFRA, A.; RESQUÍN, F.; GONZÁLEZ-BARRIOS, P. Evaluation of the biomass production, energy yield and nutrient removal of *Eucalyptus dunnii* Maiden grown in short rotation coppice under two initial planting densities and harvest systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, n. 01, p. 165–174. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.019>. Acesso em: 05 jul. 2020.
- BINKLEY, D., STAPE, J.L., RYAN, M.G., BARNARD, H.R., FOWNES, J. Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual-tree, stand-structure hypothesis. **Ecosystems**, v. 5, n. 01, p. 58–67, 2002. Disponível em: 10.1007/s10021-001-0055-7. Acesso em: 07 mar. 2020.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. 01, p. 271–283. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>. Acesso em: 08 abr. 2020.

BINOTE, D. R. B.; BINOTI, M. L. M.; LEITE, H. G. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. **Ciência da Madeira**, v. 05, n. 01, p. 58-67, 2014. Disponível em: 10.12953/2177-6830.v05n01a06. Acesso em: 08 jun. 2020.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M.; LEITE, H. G.; ANDRADE, A. V.; NOGUEIRA, G. S.; ROMARCO, M. L.; PITANGUI, C. G. Support vector machine to estimate volume of eucalypt trees. **Revista Árvore**, v.40, n. 04, p. 1-6. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400012>. Acesso em: 08 jun. 2020.

CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. S. Efeito do modelo de afilamento utilizado sobre a conversão de fustes de árvores em multiprodutos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 513-520. 2014. Disponível em: <<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr104/cap05.pdf>>. Acesso em: 13 de maio, 2020.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas**. 5ª ed. Viçosa, MG, 2017. 636 p.

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

CHRAZVEZ, J.; THE´RY-PARISOT, I.; FIORUCCI, G.; TERRAL, J. F.; THIBAUT B. Impact of post-depositional processes on charcoal fragmentation and archaeobotanical implications: experimental approach combining charcoal analysis and biomechanics. **Journal Archaeological Science**, v.44, n. 01, p. 30–42. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2014.01.006>. Acesso em: 10 jun. 2020.

COELHO, D.J.S.; SILVA, A.L.; SOARES, C.P.B.; OLIVEIRA, M.L.R.; FREITAS, J.V. Análise documental e de consistência técnica de planos de manejo florestal em áreas de formações florestais, no estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v.32, n.1, p.69-80, 2008.

COSTA, E. A.; SCHRODER, T.; FINGER, C. A. G. Height-diameter relationships for *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze in Southern Brazil. **Cerne**, v. 22, n. 4, p. 493-500, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201622042182>. Acesso em: 14 fev. 2020.

.

CURTIS, R.O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest Science**, v.13, n. 04, p. 365-75. 1967.

DEMAERSCHALK, J. P. Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 3, n. 90, p. 90-94, 1972.

DINARDI, A. J. **Viabilidade técnica e econômica de povoamentos de Eucalyptus spp. sob diferentes espaçamentos visando a produção de biomassa para**

energia. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014.

DOS SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; DOS SANTOS, H. G.; KER, J. C.; DOS ANJOS, L. H. C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. **Sociedade Brasileira de ciência do solo.** Viçosa: Folha de Viçosa Ltda., 7 ed. 2015. 100 p.

FERNANDES, G. F. S. **Influência do arranjo espacial de plantio de eucalipto na produtividade e na avaliação econômica florestal.** Dissertação (mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.

FERNÁNDEZ, M. E.; TSCHIEDER, E. F.; LETOURNEAU, F.; GYENGE, J. E. Why do Pinus species have different growth dominance patterns than Eucalyptus species? A hypothesis based on differential physiological plasticity. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 01, p. 1061–1068, 2011. Disponível em: 10.1016/j.foreco.2010.12.028. Acesso em: 02 jun. 2020.

FERRAZ FILHO, A. C.; MOLA-YUDEGO, B.; RIBEIRO, A.; SCOLFORO, J. R. S.; LOOS, R. A.; SCOLFORO, H. F. Height-diameter models for Eucalyptus sp. plantations in Brazil. **Cerne**, v. 24, n. 1, p. 9-17, 2018. Disponível em: 10.1590/01047760201824012466. Acesso em: 05 jun. 2020.

FERREIRA, D. H. A.; LELES, P. S. S.; MACHADO, E. C.; ABREU, A. H. M.; ABILIO, F. M. Crescimento de clone de Eucalyptus urophylla x E. grandis em diferentes espaçamentos. **Floresta**, v. 44, n. 03, p. 431-440. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v44i3.32188>. Acesso em: 04 jun. 2020.

FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S.; MOLA-YUDEGO, B. The coppice-with-standards silvicultural system as applied to Eucalyptus plantations - a review. **Journal of Forestry Research**, v. 25, n. 2, p. 237-248, 2014. Disponível em: 10.1007/s11676-014-0455-0. Acesso em: 04 jun. 2020.

FIEDLER, N. C.; CARMO, F. C. A.; PEREIRA, D. P.; GUIMARÃES, RÓS, E. B.; MARIN, H. B. Viabilidade técnica e econômica de plantios comerciais em áreas acidentadas no sul do Espírito Santo. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 04, p. 745-753. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/198050984518>. Acesso em: 17 ago. 2020.

FORRESTER, D. I.; WIEDMANN, J. C.; FORRESTER, R. I.; BAKER, T. G. Effects of planting density and site quality on mean tree size and total stand growth of Eucalyptus globulus plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 43, n. 01, p. 846–851, 2013. Disponível em: [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2013-0137](https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0137). Acesso em: 06 jun. 2020.

FREITAS, E. C. S.; PAIVA, H. N.; NEVES, J. C. L.; MARCATTI, G. E.; LEITE, H. G. Modeling of eucalyptus productivity with artificial neural networks. **Industrial Crops & Products**, v.146, n. 01, p. 1-9. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112149>. Acesso em: 02 fev. 2020.

GARAY, L. **Tropical forest utilization system**. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. Seattle: Coll. Forest. Research, Institute. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64 p.

GEORGIN, J.; LAUREANO, F. FARIAS, J.; RODRIGUES, L. H. L. A agricultura familiar no cenário da produção de florestas energéticas. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 5, p. 3847-3852. 2014. Disponível em: [10.5902/2236130814716](https://doi.org/10.5902/2236130814716). Acesso em: 17 ago. 2020.

GÓMEZ-GARCÍA, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; CASTEDO-DOURADO F.; CRECENTE-CAMPO, F. A comparison of model forms for the development of height-diameter relationships in even-aged stands. **Forest Science**, v. 60, n. 3, p. 560-568. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5849/forsci.12-099>. Acesso em: 17 mai. 2020.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. D.; LACLAU, J.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, n. 01, p. 6–27. 2013. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>

GONCALVES, J. G.; OLIVEIRA, A. D.; CARVALHO, S. P. C.; GOMIDE, L. R. Análise econômica da rotação florestal de povoamentos de eucalipto utilizando a simulação de Monte Carlo. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 04, p. 1339-1347. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509830215>. Acesso em: 04 jul. 2020.

GUERRA, S. P. S.; GARCIA, E. A.; LANÇAS, K. P.; REZENDE, M. A.; SPINELLI, R. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. **Fuel**, v. 137, n. 01, p. 360–363. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.103>. Acesso em: 15 jun. 2020.

HAKAMADA, R. E.; HUBBARD, R. M.; MOREIRA, G. G.; STAPE, J. L.; CAMPOE, O.; FERRAZ, S. F. B. Influence of stand density on growth and water use efficiency in Eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 466, n. 01, p. 1-8. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118125>. Acesso em: 05 jul. 2020.

HÉRBET, F.; KRAUSE, C.; PLOURDE, P.; ACHIM, A.; PRÉSENT, G.; MÉNÉTRIER, J. Effect of tree spacing on tree level volume growth, morphology, and wood properties in a 25-year-old Pinus banksiana plantation in the Boreal Forest of Quebec. **Forests**, v. 7, n. 01, p. 276. 2016. Disponível em: [10.3390/f7110276](https://doi.org/10.3390/f7110276). Acesso em: 14 jun. 2020.

HUSCH, B.; MILLER, C.L.; BEERS, T.E. **Forest mensuration**. 3.ed. New York: J. Wiley, 1982. 397p.

HYAMS, D.G. **Curve Expert Professional Documentation Release 2.6.5**. Hyams Development. 2017. Disponível em: <http://www.curveexpert.net>. Acesso em: 05 jan. 2020.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. H. G. Taper Function and their Applications in Forest Inventory. **Forestry Chronicle**, v. 45, n. 4, p. 278-283, 1969.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2018**. Rio de Janeiro: IBGE, v. 33, p. 1-8. 2018. Disponível em:

https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2018_v33_informativo.pdf. Acesso em: 10 jun. 2020.

KIM, T. J.; BULLOCK, B. P.; STAPE, J. L. Effects of silvicultural treatments on temporal variations of spatial autocorrelation in Eucalyptus plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 358, n. 01, p. 90–97, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.004>. Acesso em: 10 mai. 2020.

LACLAU, J.; LEVILLAIN, J.; DELEPORTE, P.; DE DIEU, J.; BOUILLET, J.-P.; SAINT ANDRE, L.; VERSINI, A.; MARESCHAL, L.; NOUVELLON, Y.; M'BOU, A.T.; RANGER, J. Organic residue mass at planting is an excellent predictor of tree growth in Eucalyptus plantations established on a sandy tropical soil. **Forest Ecology and Management**, v. 260, n. 01, p. 2148–2159, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.007>. Acesso em: 09 mai. 2020.

LEITE, H. G.; GAMA, J.V.; CRUZ, J. P.; SOUZA, A. L. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (ROLL.) WARB. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 99-106, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000100012>. Acesso em: 19 fev. 2020.

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. 04, p. 603-12, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000400013>. Acesso em: 12 mai. 2020.

LEMO FILHO, L.C.D.A., CARVALHO, L.G.D., EVANGELISTA, A.W., CARVALHO, L.M.T.D., DANTAS, A. A. Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência para Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 05, p. 1–8, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000500029>. Acesso em: 01 jun. 2020.

LIMA, M. B. O. **Dinâmica da distribuição diamétrica e prognose do crescimento de eucalipto em diferentes espaçamentos para multiprodutos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. 2018.

LOPES, E. D.; LAIA, M. L.; SANTOS, A. S.; SOARES, G. M.; LEITE, R. W. P. L.; MARTINS, N. S. Influência do espaçamento de plantio na produção energética de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. **Floresta**, v. 47, n. 01, p. 95-104, 2017. Disponível em: [10.5380/rf.v47i1.47141](https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.47141). Acesso em: 02 mai. 2020.

MEDEIROS, R. A.; PAIVA, H. N.; SOARES, A. A. V.; DA CRUZ, J. P.; LEITE, H. G. Thinning from below: effects on height of dominant trees and diameter distribution in eucalyptus stands. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 29, n. 2, p. 238–247. 2017. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/44160941>. Acesso em: 02 mai. 2020.

MEHTÄTALO L.; DE-MIGUEL, S.; GREGOIRE, T. G. Modeling height-diameter curves for prediction. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 45, n. 7, p. 826-837, 2015. Disponível em: 10.1139/cjfr-2015-0054. Acesso em: 08 jun. 2020.

MELO, E. A.; CALEGARIO, N.; MENDONÇA, A. R.; POSSATO, E. L.; ALVES, J. A.; ISAAC JUNIOR, M. A. Modelagem não linear da relação hipsométrica e do crescimento das árvores dominantes e codominantes de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 04, p. 1325-1338. 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Biomassa para energia no Nordeste: atualidades e perspectivas**. Brasília, DF: MMA, 2018. 164p. Disponível em: https://www.mma.gov.br/phocadownload/gestao_territorial/desertificacao/Livro_APN_E_NE_AGO20.pdf. Acesso em: 25 jun. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – BRASIL. **Balanço Energético Nacional (BEN) 2019 – ano base 2018**. MME: EPE, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>. Acesso em: 20 nov., 2019.

MORAES NETO, S. P.; PULROLNIK, K.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; MACIEL, G. A. Distribuição diamétrica e altimétrica do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em Sistema agrossilvipastoril. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa cerrados-EMBRAPA/CNPQ**, v. 317, p. 26, 2014.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 39, n. 01, p.199-208, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000100019>. Acesso em: 08 jun. 2020.

NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; REIS, G. G.; MOREIRA, A. M. Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus Taeda* L. **Revista Árvore**, v. 32, n. 05, p. 855-860, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000500010>. Acesso em: 15 jun. 2020.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **FLORESTA**, v. 45, n. 01, p. 57-64. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v45i1.30157>. Acesso em: 14 mai. 2020.

OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; NEVES, J. C. L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. **FLORESTA**, v. 40, n. 04, p. 755 - 762, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v40i4.20327>. Acesso em: 18 jun. 2020.

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

ORMEROD, D.W. A simple bole model. **Forestry Chronicle**, v. 49, n.3, p. 136-138, 1973.

PASA, D. L.; LAUREANO, F.; FARIAS, J. A.; NOLASCO, B. G. Análise econômica de plantios florestais na agricultura familiar na região sul. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 15, n. 02, p. 1-16. 2017.

PEDROSO FILHO, J. I.; BIALI, L. J.; SCHNEIDER, P. R.; FARIAS, J. A. Avaliação econômica de projetos de florestamento com *Eucalyptus grandis* hill ex maiden implantado sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 01, p. 240-248, jan.- mar., 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509831577>. Acesso em: 19 mai. 2020.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Study of thermal degradation of *Eucalyptus* wood by thermogravimetry and calorimetry. *Revista Árvore*, v. 37, n. 03, p. 567–576. 2013. Disponível em: [10.1590/S0100-67622013000300020](https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300020). Acesso em: 19 mai. 2020.

PERREIRA, E. G.; MARTINS, M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O. Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. 01, p. 592–600. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.028>. Acesso em: 03 fev. 2020.

PINKARD, E. A.; NEILSEN, W. A. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. **Forest Ecology and Management**, v. 172, p. 215-227, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00803-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00803-9). Acesso em: 05 jun. 2020.

RANCE, S. J.; MENDHAM, D. S.; CAMERON, D. M.; GROVE, T. S. An evaluation of the conical approximation as a generic model for estimating stem volume, biomass and nutrient content in young *Eucalyptus* plantations. **New Forests**, v. 43, n.1, p. 109-128. 2012. Disponível em: [10.1007/s11056-011-9269-5](https://doi.org/10.1007/s11056-011-9269-5). Acesso em: 14 fev. 2020.

RESQUIN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; CARRASCO-LETELIER, L.; CASNATI, C. R. Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 438, n. 01, p. 63-74. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.007>. Acesso em: 14 fev. 2020.

REZENDE, J. L. P. de; OLIVEIRA, A. D. de. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa: UFV, 2001, 389 p.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M.; FERREIRA, M. Z.; LISBOA, P. M.; SCOLFORO, J. R. S. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 16, n. 01, p. 22-31. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000100003>. Acesso em: 05 jun. 2020.

RIBEIRO, M. D. S. B.; JORGE, L. A. B.; MISCHAN, M. M.; SANTOS, A. L.; BALARRIN, A. W. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 01, p. 31-45. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509826445>. Acesso em: 15 mai. 2020.

ROUSSET, P.; FIGUEIREDO, C.; DE SOUZA, M.; QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of Eucalyptus wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 10, p. 1890–1897. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.05.005>. Acesso em: 13 jun. 2020.

SALES, F. C. V.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; GADELHA, F. H. L. Ajustes de modelos volumétricos para o clone Eucalyptus grandis x E. urophylla cultivados no agreste de Pernambuco. **Floresta**, v. 45, n. 04, p. 663-670. 2015. Disponível em: [10.5380/rf.v45i4.37594](https://doi.org/10.5380/rf.v45i4.37594). Acesso em: 19 mai. 2020.

SANTANA, W. M. S.; CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal Eucalyptus. **Cerne**, v.18, n. 01, p.1-8. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000100001>. Acesso em: 14 jun. 2020.

SARTÓRIO, I. P. **Avaliação e modelagem do crescimento de florestas energéticas de eucalipto plantadas em diferentes densidades**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SARAIVA D. T.; FERREIRA, R. L.; TEIXEIRA, C. C.; GOMES, R. J.; OLIVEIRA NETO, S. N.; TORRES, C. M. M. E. Extension events of integrated crop-livestock-forest in the Zona da Mata Mineira, Brazil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA, 2015. **Anais...** Brasília: 2015. Disponível em <http://wcclf2015.com.br/anais/busca/index.php?lang=pt>. Acesso em: 16/06/2020.

SCHMIDT, L. N. **Dinâmica da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto na região central de Minas Gerais**. 2017. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SCHONAU, A. P. G.; COETZEE, J. Initial Spacing, Stand Density and Thinning in Eucalypt Plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 29, n. 01, p. 245-266, 1989. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(89\)90097-2](https://doi.org/10.1016/0378-1127(89)90097-2). Acesso em: 03 fev. 2020.

SCHUMACHER, M.V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N.; LOPES, V.G. Manejo da biomassa e sustentabilidade nutricional em povoamentos de Eucalyptus spp. em pequenas propriedades rurais. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 01, p. 144–156. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/198050985135>. Acesso em: 08 jun. 2020.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 09, p. 719-734, 1933.

SCHWERZ, F.; NETO, D. D.; CARON, B. O.; NARDINI, C.; SGARBOSSA, J.; ELOY, E.; BEHLING, A.; ELLI, E. F.; REICHARDT, K. Biomass and potential energy yield of perennial woody energy crops under reduced planting spacing. **Renewable Energy**, v. 153, n. 01, p. 1238-1250. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.074> 1238e1250. Acesso em: 10 jun. 2020.

SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; CAMPOE, O.; STAPE, J. L. Eucalyptus growth and yield system: Linking individual-tree and stand-level growth models in clonal Eucalypt plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 432, n. 01, p. 1–16. 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.045>. Acesso em: 15 jun. 2020.

SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; MCCARTER, J.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L. Stand-level growth and yield model system for clonal eucalypt plantations in Brazil that accounts for water availability. **Forest Ecology and Management**, v. 448, n. 01, p. 22–33. 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.006>. Acesso em: 16 jun. 2020.

SCOLFORO, H.F.; RAIMUNDO, M.R.; MCTAGUE, J.P.; WEISKITTEL, A.R.; SCOLFORO, J.R.S.; CARRERO, O. Comparison of taper functions applied to Eucalypts of varying genetics in Brazil: application and evaluation of the penalized mixed spline approach. **Canadian Journal of Forestry Research**, v. 48, n. 05, p. 568–580. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0366>. Acesso em: 17 jun. 2020.

SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 33, n. 06, p.1133-1139. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000600015>. Acesso em: 12 mai. 2020.

SILVA, R. S.; VENDRUSCOLO, D. G. S.; ROCHA, J. R. M.; CHAVES, A. G. S.; SOUZA, H. S.; MOTTA, A. S. Desempenho Silvicultural de *Tectona grandis* L. f. em Diferentes Espaçamentos em Cáceres, MT. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 03, p. 397–405. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.143015>. Acesso em: 20 jun. 2020.

SILVA, W. G.; SANTOS, D. M. C. L.; LIMA, A. P. L.; MATTOS, F. D.; LIMA, S. F.; PAULA, R. C. M. Growth and volumetric production of eucalyptus clones in different planting spaces. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 06, n. 03, p. 38-47. 2019.

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A.; VALVERDE, S. R. **Economia florestal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2008. 178 p.

SILVA, S. **Eficiência de redes neurais artificiais para estimar variáveis dendrométricas em sistemas agrossilvipastoris na Zona da Mata mineira**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SIMIONI, F. J.; BUSCHINELLI, C. C. A.; MOREIRA, J. M. M. A.; PASSOS, B. M.; GIROTTO, S. B. F. T. Forest biomass chain of production: Challenges of small-scale forest production in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, n. 01, p. 889–898. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.330>. Acesso em: 15 jun. 2020.

SOARES, A. A. V.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; SILVA, S. R.; LOURENÇO, H. M.; FORRESTER, D. I. Increasing stand structural heterogeneity reduces productivity in

Brazilian Eucalyptus monoclonal stands. **Forest Ecology and Management**, v. 373, n. 01, p. 26–32. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.035>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SOARES, T. S.; SCOLFORO, J. R. S.; FERREIRA, S. O.; MELLO, J. M. Uso de diferentes alternativas para viabilizar a relação hipsométrica no povoamento florestal. **Revista Árvore**, v. 28, n. 06, p. 845-854. 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622004000600009>. Acesso em: 22 jun. 2020.

SOLER, R. R.; GUERRA, S. P. S.; ESPERANCINI, M. S. T.; SEREGHETTI, G. C.; OGURI, G. Avaliação econômica da operação de plantio mecanizado de eucalipto em dois diferentes espaçamentos. **Energia na Agricultura**, v. 34, n. 04, p. 462-470. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2019v34n4p462-470>. Acesso em: 23 jun. 2020.

SOUZA, R. R. **Estudo da forma do fuste de árvores de eucaliptos em diferentes espaçamentos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2013.

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

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, R. A.; LOOS, R. A. The Brazil eucalyptus potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 01, p. 1684-1694. 2010. Disponível em: [10.1016/j.foreco.2010.01.012](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012). Acesso em: 23 jun. 2020.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D. Insights from full-rotation Nelder spacing trials with Eucalyptus in São Paulo, Brazil. **South. Forests**, v. 72, n. 01, p. 91–98. 2010. Disponível em: [10.2989/20702620.2010.507031](https://doi.org/10.2989/20702620.2010.507031). Acesso em: 26 jun. 2020.

TENÓRIO, C.; MOYA, R.; ARIAS-AGUILLAR, D. Evaluation of changes in tree morphology parameters, biomass yield, chemical and energy properties at three spacings of short rotation energy plantations of Gmelina arborea in Costa Rica, from 1 to 2 years of age. **Waste and Biomass Valorization**, v. 09, n. 01, p. 1163–1179, 2018. Disponível em: [10.1007/s12649-017-9896-y](https://doi.org/10.1007/s12649-017-9896-y). Acesso em: 28 jun. 2020.

TIBCO Software Inc. **Statistica** (data analysis software system), version 13. <http://tibco.com>. 2018.

TRUGILHO, P.F.; ARANTES, M. D. C.; PÁDUA, F. A.; ALMADO, R. P.; BALIZA, A. E. R. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de Eucalyptus urophylla e Eucalyptus grandis. **Cerne**, v.16, n. 01, p. 33-40, 2010. Disponível em: <http://www.dcf.ufba.br/ebamem.htm>. Acesso em: 11 de maio 2020.

TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, C. O.; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. N.; PROTÁSIO, T. P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 04, p. 661-666. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130625>. Acesso em: 08 jun. 2020.

VANCLAY, J. K. **Modeling forest growth and yield**: applications to mixed tropical forests. Copenhagen: CAB International, 1994. 312 p.

VIRGENS, A. P.; FREITAS, L. C.; LEITE, A. M. P. Análise econômica e de sensibilidade em um povoamento implantado no sudoeste da Bahia. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 02, p. 211-219. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.104914>. Acesso em: 17 ago. 2020.

XUE, L., PAN, L., ZHANG, R., AND XU, P.-B. Density effects on the growth of self-thinning *Eucalyptus urophylla* stands. **Trees**, v. 25, n. 01, p. 1021–1031. 2011. Disponível em: 10.1007/s00468-011-0576-4. Acesso em: 10 jun. 2020.

ZANG, H.; LEI, X.; ZENG, W. Height–diameter equations for larch plantations in northern and northeastern China: a comparison of the mixed-effects, quantile regression and generalized additive models. **Forestry**, v. 89, n. 04, p. 434- 445, 2016. Disponível em: 10.1093/forestry/cpw022. Acesso em: 10 jun. 2020.

ZEIDE, B. Analysis of Growth Equations. **Forest Science**, v. 39, n. 01, p. 594–616. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/forestscience/39.3.594>. Acesso em: 15 jun. 2020.

CAPÍTULO 2: INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO NOS INDICADORES DE QUALIDADE DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL PARA FINS SIDERÚRGICOS

RESUMO

GOMES, Gabriel Soares Lopes, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2020. **Influência do espaçamento nos índices de qualidade da madeira e do carvão vegetal**. Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Helio Garcia Leite.

A aplicação de conhecimentos que relacionam a dinâmica de crescimento da população e suas interações entre os indivíduos que a compõe favorecem a obtenção de produtos de alto valor comercial devido a adequação dos seus índices de qualidade a determinado uso, por exemplo, para a produção de carvão vegetal atendendo à siderurgia. Uma das estratégias para se obter madeira com características específicas para a produção de carvão vegetal de qualidade é a busca ideal do espaçamento entre árvores. O objetivo deste trabalho foi avaliar os índices de qualidade da madeira e do carvão do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (Clone GG 100) em diferentes espaçamentos de plantio. O estudo foi realizado na Zona da Mata de Minas Gerais, sendo o híbrido estabelecido nos espaçamentos 2x1, 2x2, 3x2 e 3x3 m. Obteve-se o carvão vegetal por meio da carbonização da madeira em forno elétrico tipo mufla adaptado com sistema de recuperação de gases. Analisou-se as propriedades físicas e químicas da madeira e carvão vegetal, além de estimar as massas seca e energia por hectare. Os dados foram submetidos ao teste t para comparação de médias e também foram realizadas análises de componentes principais a fim de avaliar as relações entre as variáveis da madeira e do carvão vegetal em função dos espaçamentos. O espaçamento 2x2 m, entre os analisados, apresentou as maiores estimativas de massa seca da madeira, massa de lignina, massa de carvão e energia por hectare, em relação ao incremento médio anual. Já os espaçamentos amplos, com área útil acima de 6 m², proporcionaram melhores propriedades da madeira e carvão vegetal por apresentar a madeira com maior resistência à degradação térmica e consequentemente maior rendimento em carvão vegetal.

Palavras-chave: Eucalipto. Qualidade da madeira. Energia da biomassa.

ABSTRACT

GOMES, Gabriel Soares Lopes, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2020. **Influence of spacing on wood and charcoal quality indexes**. Adviser: Sílvia Nolasco de Oliveira Neto. Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Helio Garcia Leite.

The application of knowledge that relates the population growth dynamics and their interactions between the individuals that compose it favor the obtaining of products of high commercial value and of excellent quality. One of the strategies to obtain wood and charcoal with adequate quality indexes is the ideal search for spacing. The objective of this work was to evaluate the quality indexes of wood and charcoal of the hybrid of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (Clone GG 100) in different planting spacing. The study was carried out in the Zona da Mata of Minas Gerais, with the hybrid established in the 2x1, 2x2, 3x2 and 3x3 m spacing. Charcoal was obtained by carbonizing the wood in an electric muffle furnace adapted with a gas recovery system. The chemical properties of wood and charcoal were analyzed, in addition to estimating the dry masses and energy per hectare. The data were submitted to the t test for comparison of means and principal component analyzes were also carried out in order to assess the relationships between wood and charcoal variables as a function of spacing. The 2x2 m spacing, among those analyzed, presented the highest estimates of dry mass of wood, mass of lignin, mass of charcoal and energy per hectare, in relation to the mean annual increment. The wide spacing, with a usable area above 6 m², provided better properties of wood and charcoal for presenting wood with greater resistance to thermal degradation and consequently greater yield in charcoal.

Keywords: Eucalypt. Wood quality. Biomass energy.

1. INTRODUÇÃO

As condições do meio em que as árvores estão inseridas afetam o crescimento, produtividade e, conseqüentemente, na qualidade do produto final que se deseja (ROCHA et al., 2016; SIMETTI et al., 2018). A aplicação de conhecimentos que relacionam a dinâmica de crescimento da população arbórea e suas interações entre os indivíduos que a compõe favorecem a obtenção de produtos de qualidade com alta eficiência de conversão e maior valor agregado (SOARES et al., 2016; PEREIRA et al., 2016; MARCHESAN et al., 2019).

Práticas silviculturais associadas ao manejo florestal tornam-se alternativas para se obter madeira e sua conversão em diferentes produtos, como o carvão vegetal, com qualidade adequada a diferentes fins (Häggman et al., 2013; Tavares et al., 2020). A análise do comportamento das árvores em diferentes arranjos de plantio e suas relações com as características dendrométricas são essenciais, pois direcionam a escolha de parâmetros da matéria prima que se adequem ao produto que se deseja (Gonçalves et al., 2010; Tonini et al., 2020).

Uma das estratégias para se obter madeira e carvão vegetal com índices de qualidade adequados é a busca ideal do espaçamento de plantio das árvores. Em sua definição, infere-se a quantidade de árvores que um sítio florestal deve suportar, o que pode afetar na definição do melhor material genético, estratégias de manejo e colheita (FERREIRA et al., 2014). O espaçamento influencia na disponibilidade de recursos de crescimento, como luz, água e nutrientes para as plantas, devendo ser estrategicamente analisado pelo silvicultor (RESQUIN et al., 2019; RAMALHO et al., 2019).

Modificações na área útil por planta influencia diretamente o crescimento das árvores, a qualidade da madeira e os aspectos econômicos do empreendimento florestal, uma vez que alteram o incremento volumétrico da árvore e, por consequência, a quantidade de massa seca de madeira e carvão vegetal por hectare, além das estimativas de lignina total e energia estocada (NEVES et al., 2011; ROCHA et al., 2017), e desse modo o rendimento e as propriedades do carvão vegetal (VASSILEV et al., 2010; JÚNIOR et al., 2016).

Assim, a análise e estudo das características da madeira para produção de carvão merece destaque. O entendimento dos padrões de qualidade da madeira e do carvão vegetal pode auxiliar em aumento de produção, escolha dos materiais

genéticos superiores, além de redução do uso de matéria-prima aliado à sua máxima eficiência (PROTÁSIO et al., 2014a; SILVA et al., 2018; COSTA et al., 2020).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar o efeito dos diferentes espaçamentos de plantio nos índices de qualidade da madeira e do carvão do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*;

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito do espaçamento de plantio nas propriedades químicas e físicas da madeira para produção de carvão vegetal;
- Obter a relação cerne/alburno das madeiras em função da densidade de plantio e sua influência na geração de finos de carvão vegetal;
- Analisar a decomposição térmica da madeira em função do espaçamento de plantio, por meio das análises termogravimétricas;
- Avaliar o efeito do espaçamento de plantio no rendimento e nas propriedades do carvão vegetal;
- Estimar a massa seca de madeira, massa de lignina, massa de carvão vegetal e energia disponível em relação ao incremento médio anual nos diferentes espaçamentos;
- Identificar as variáveis da madeira e carvão vegetal que mais se diferenciam em função dos espaçamentos;
- Avaliar as relações entre as variáveis da madeira e do carvão vegetal em função dos espaçamentos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido em um povoamento do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (Clone GG 100), localizado no município de Lamim, na Zona da Mata mineira (20° 47' S, 43° 28' W). Esta região caracteriza-se por apresentar influência da silvicultura, mais especificamente o cultivo do eucalipto, para a produção de carvão vegetal, lenha e madeira em tora, com produções estimadas de 4.033 t, 21.225 m³ e 41 m³, respectivamente (IBGE, 2018)

O município apresenta altitude média de 779 m, precipitação acumulada anual de 1.549 mm e temperatura média anual de 19,3°C, sendo os meses mais frios de abril a outubro (ALVARES et al., 2013). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é Cwb, o qual é definido como clima subtropical de altitude caracterizado com inverno seco e verão temperado.

A região é composta predominante por relevo montanhoso, com encostas convexo-côncavas embutidas em vales de fundo chato, formados por terraços e leitos maiores, onde se localizam cursos d'água. O município apresenta 24,26% de cobertura vegetal, com predominância de Floresta Estacional Semidecidual, inserida no Bioma Mata Atlântica, e solos classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, pobre em bases trocáveis e de baixa fertilidade natural (COELHO et al., 2008; IBGE, 2018).

3.2 Caracterização do plantio, amostragem e medições

A pesquisa foi realizada em uma pequena propriedade rural, em área total de um hectare de pastagem degradada. Amostras de solos foram coletadas em duas profundidades (0-20; 20-40 cm) para análise química, cujos resultados são apresentados na Tabela 1, conforme recomendações estabelecidas pelo Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2015)

O preparo da área consistiu de controle de formigas cortadeiras com iscas granuladas, roçada, dessecação em área total e demarcação de covas, seguindo os espaçamentos 2x1, 2x2, 3x2 e 3x3 m. As covas foram abertas manualmente, com dimensões aproximadas de 30x30 cm, sendo realizado o coroamento e adubações de plantio e de cobertura (Tabela 2), de modo a atender à exigência nutricional de acordo com a análise do solo. O plantio foi realizado em dezembro de 2011, seguido de controle de formigas cortadeiras e roçadas quando necessárias.

Tabela 1 - Caracterização química de amostras de solo da área experimental, em Lamim, MG

Profundidade	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC (t)	CTC (T)	V	MO
cm	H ₂ O	mg dm ⁻¹	cmol _c dm ⁻³								%	dagkg ⁻¹
00-20	5,4	0,70	37	0,83	0,48	0,2	5,28	1,40	1,60	6,68	21,0	2,42
20-40	5,5	0,16	16	1,17	0,23	0,1	2,97	1,44	1,54	4,41	32,7	1,75

pH em água, teores de fósforo (P), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), alumínio (Al³⁺), hidrogênio + alumínio (H + Al), soma de bases (SB), CTC efetiva (t) e potencial (T), saturação por alumínio (m), saturação por bases (V) e teores de matéria orgânica (MO). KCl e CaCl - Relação 1:2,5; P - Na - K - Fe - Zn - Mn - Cu - Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al - Extrator: KCl - 1 mol/L; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; Mat. Org. (MO) - Oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N.

Tabela 2 - Adubação de plantio e cobertura realizada no povoamento de Eucalipto, em Lamin, MG

Tipo de adubação	g/cova	Forma de Aplicação
Fosfato natural reativo	200	Fundo da cova
Superfosfato simples	150	Covetas laterais, 10 dias após o plantio
NPK (20-00-20), 0,5% de B e Zn	150	40 a 60 dias após o plantio
Cloreto de potássio + 1% B	150	Duas estações chuvosas após o plantio

Aos dois anos de idade foram instaladas três parcelas com 24 plantas na área sob espaçamento 3x3 m e quatro parcelas nos demais espaçamentos. As áreas médias das parcelas, após correção para o plano foram 48, 93, 137 e 210 m², respectivamente para os espaçamentos 2x1, 2x2, 3x2 e 3x3 m (ANEXO A).

As medições das árvores foram realizadas nas idades de 14, 54 e 84 meses. Em cada parcela mediu-se as circunferências de todas as árvores presentes, a 1,3 m de altura, sendo posteriormente feita a transformação para diâmetro (*dap*). Foram medidas também, em cada ocasião, as alturas totais (*Ht*) das 10 primeiras árvores de cada parcela. As circunferências foram medidas com fita métrica e as alturas, com hipsômetro Vertex. Além disso, obteve-se a porcentagem de sobrevivência para cada espaçamento.

3.3 Propriedades da madeira

3.3.1 Coleta das amostras

Selecionaram-se cinco árvores de diâmetro médio em cada espaçamento, totalizando vinte amostras. A partir delas, coletou-se discos de madeira com 5 cm de espessura, localizados à 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, cuja diâmetro mínimo foi de 6 cm. Os discos de madeira foram acondicionados em ambiente arejado e livre da exposição solar para posterior determinação da relação cerne/alburno, densidade básica, composição química estrutural e imediata, poder calorífico superior e análise termogravimétrica. Para tal, os discos foram seccionados e transformados em serragem utilizando-se o moinho tipo Wiley, de acordo com a com a norma TAPPI 257 om-52 (TAPPI, 1998).

3.3.2 Relação cerne/alburno

Em cada disco de madeira, identificou-se a região limite entre o cerne e o alburno, com auxílio de uma lupa com aumento de dez vezes, observando-se a alteração de cor e ocorrência de poros obstruídos por tilose. Logo depois, traçaram-se duas retas perpendiculares com interseção no centro da medula, a fim de facilitar as medições do diâmetro total, diâmetro do cerne e do alburno. Essas mensurações foram realizadas com régua de 0,1 cm de precisão. Posteriormente, calcularam-se as porcentagens de cerne e alburno de todos os discos, pela fórmula:

$$C/A = \frac{D_c^2}{D^2 - D_c^2}$$

em que:

D_c = Diâmetro do cerne, em cm; e,

D = Diâmetro do disco sem casca, em cm.

3.3.3 Densidade básica

Determinou-se a densidade básica da madeira, no sentido base-topo, pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003).

A média da densidade da madeira nos diferentes espaçamentos foi obtida de acordo com Vital (1984), em que se calculou a densidade da madeira a partir da média aritmética das cunhas opostas retiradas ao longo do tronco.

3.3.4 Composição química estrutural e análise química imediata

Determinou-se a composição química estrutural da madeira por meio de amostras moídas, formando uma amostra composta por árvore. Para isso, foi utilizada a fração de partículas que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na malha de 60 mesh (ASTM, 1982). Realizou-se a determinação do teor absolutamente seco da madeira conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998).

Os teores de extrativos da madeira foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996). Além disso, os teores de lignina insolúvel foram obtidos pelo método Klason em duplicata, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). Já a lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971). Obteve-se o teor de lignina total pelo somatório dos valores de lignina solúvel e lignina insolúvel.

Para a análise química imediata, ao qual inclui a determinação dos teores de cinzas, materiais voláteis e carbono, utilizaram-se amostras compostas que passaram pela malha de 40 mesh e ficaram retidas na malha de 60 mesh. Os teores de cinza,

materiais voláteis e carbono fixo foram obtidos de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986). Apenas uma adaptação foi realizada, em que se substitui o cadinho de platina pelo cadinho de porcelana, com modificação de temperatura de 750 °C para 600 °C ao se determinar o teor de cinzas.

3.3.5 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior da madeira foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), na qual as amostras foram provenientes da fração de serragem que passaram pela peneira de 40 mesh e ficaram retidas na malha de 60 mesh (ASTM, 1982). Foram realizadas duplicatas e utilizou-se uma bomba calorimétrica adiabática IKA300.

3.3.6 Análise termogravimétrica

As amostras foram secas e preparadas em granulometria de 60 mesh. Em seguida, foi utilizado o aparelho DTG-60H (Shimadzu) a fim de se obter as curvas termogravimétricas (TGA) cujo objetivo é avaliar a perda de massa em função da temperatura. Essas análises foram realizadas em cápsula de alumina aberta com atmosfera contendo gás nitrogênio, a uma vazão constante de 50 ml.min⁻¹. As curvas foram obtidas a partir de 100 °C até temperatura máxima de 450°C, com taxa de aquecimento de 10°C. min⁻¹. Além disso, obtiveram-se as derivadas da TGA para a análise térmica diferencial (DrTGA).

3.3.7 Carbonização

A carbonização foi realizada com amostras de madeira, de cada disco ao longo da altura comercial, constituindo-se de uma amostra composta com dimensões finais aproximadas de 1x1x1 cm. Posteriormente, essa amostra composta foi seca em estufa à temperatura de ± 103 °C, até uma massa constante. Ao total, foram feitas três carbonizações por tratamento, com exceção do tratamento 2x1m ao qual se realizou duas carbonizações diante menor disponibilidade de material.

A carbonização foi realizada no forno elétrico tipo mufla adaptado com sistema de recuperação de gases. Para isso, foram colocadas as amostras em um recipiente metálico dentro da mufla em temperatura ambiente e programado para temperatura inicial de 150 °C. A taxa de aquecimento foi de aproximadamente 1,67 °C.min⁻¹, até temperatura final de 450 °C, o que totalizou 4,5 h de processo.

3.4 Propriedades do carvão

3.4.1 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC)

Após a carbonização da madeira, foi obtido o rendimento gravimétrico com base na massa seca, em porcentagem, utilizando a fórmula:

$$RGC = \frac{\text{massa seca de carvão vegetal}}{\text{massa seca de madeira}} \times 100$$

em que:

- massa seca de carvão vegetal (g);
- massa seca de madeira (g);

3.4.2 Friabilidade

Pesou-se amostras de carvão de aproximadamente 20g e posteriormente colocou-se no equipamento friabilômetro MA 791. Este por sua vez tem como princípio básico a determinação do teor de finos quando submetidos à quebra, abrasão ou ruptura (GOMES e OLIVEIRA, 1980) por um período de dezesseis minutos. Logo depois, as amostras foram coletadas e classificadas em peneira de 9,5 mesh. Por fim, calculou-se a porcentagem de finos por meio da fórmula:

$$FRIAB = \frac{P1 - P2}{P1} \times 100\%$$

em que:

$P1$ = massa inicial da amostra de carvão vegetal (g);

$P2$ = massa final da amostra de carvão vegetal em (g).

3.4.3 Densidade a granel

Obteve-se a densidade a granel por meio da massa do carvão vegetal contido numa caixa de 7x7x7 cm de dimensões internas. As amostras de carvão vegetal foram dispostas até o nível superior da caixa, sendo realizado duas repetições para cada amostra. Posteriormente, pesou-se em balança analítica e calcularam-se seus valores pela fórmula:

$$DG = \frac{m}{vol}$$

em que:

DG = densidade a granel (kg m^{-3});

m = massa de carvão (kg);

vol = volume de carvão (m^3).

3.4.4 Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada pela metodologia proposta por Vital (1984), que se refere a um método hidrostático em que se utiliza a imersão em mercúrio.

3.4.5 Composição química imediata

Os teores de cinzas, de material volátil e a porcentagem de carbono fixo foram obtidos de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986). Substitui-se o cadinho

de platina pelo cadinho de porcelana, assim como a modificação de temperatura de 750°C para 600°C para se determinar o teor de cinzas.

3.5 Estimativas de massas e energia por hectare

3.5.1 Massa seca de madeira

Foi obtida multiplicando-se o incremento médio anual, na idade final de coleta referente aos 84 meses, pela densidade básica da madeira, de acordo com a equação:

$$MSM = IMA \times DB$$

em que:

MSM = massa seca de madeira (t);

IMA = incremento médio anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$);

DB = densidade básica em (kg m^{-3}).

3.5.2 Massa de lignina e de carvão vegetal

Foram obtidas multiplicando a massa seca da madeira pelo percentual de lignina total e rendimento gravimétrico em carvão vegetal, respectivamente, de acordo com a equação:

$$ML = MSM \times LT$$

em que:

ML = massa de lignina (t);

MSM = massa seca da madeira (t);

LT = Lignina total (%) /100;

$$MCV = MSM \times RCV$$

em que:

MCV = massa em carvão vegetal (t);

MSM = massa seca da madeira (t);

RCV = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%) /100.

3.5.3 Energia

Para o cálculo da energia por hectare, multiplicou-se a massa seca da madeira pelo poder calorífico superior da madeira, de acordo com a equação:

$$Energia = MSM \times PCS$$

em que:

$Energia$ = energia por hectare expressa ($MJ\ ha^{-1}\ ano^{-1}$);

MSM = massa seca da madeira (t);

PCS = poder calorífico superior da madeira ($Kcal\ kg^{-1}$).

3.6 Análises Estatísticas

O experimento foi estabelecido em quatro tratamentos (espaçamentos). Para as análises de qualidade da madeira adotaram-se cinco repetições (árvores-amostra) e para carvão utilizaram-se três repetições para os espaçamentos 2x2, 3x2 e 3x3 m. Para o espaçamento 2x1 m, utilizaram-se duas repetições devido à quantidade de material produzido pela carbonização.

Os dados referentes à madeira, ao carvão vegetal e as estimativas de massa e energia por hectare foram submetidos ao teste t para comparação de médias, com auxílio do software *STATISTICA*® v. 13 (STATSOFT INC, 2018).

Também foram realizadas análises de componentes principais a fim de avaliar as relações entre as variáveis da madeira e do carvão vegetal em função dos espaçamentos. Inicialmente os dados foram tratados e realizada normalização das variáveis originais. Essa normalização foi obtida pela transformação em $z_i = (x_i - \bar{x})/s$, em que z_i é o novo valor do dado, x_i é o seu valor original, \bar{x} é a média da amostra e s o desvio padrão. Com isso, a média e o desvio padrão tornam-se zero e

um, respectivamente. Posteriormente, produziram gráficos do tipo biplot, com a seleção das duas primeiras componentes principais.

Ao aplicar as variáveis da madeira e do carvão vegetal à componente principal, foram identificadas as contribuições relativas de cada uma das variáveis. As contribuições foram calculadas pela razão entre a correlação de cada variável da análise de componente principal e do somatório dos coeficientes de correlação em absoluto.

4. RESULTADOS

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados do teste t para as características da madeira e carvão, em função do espaçamento.

Em relação às propriedades da madeira, a relação cerne/alburno, teores de materiais voláteis e carbono fixo, e poder calorífico superior, não foram influenciados pelos espaçamentos de plantio.

A média de densidade básica do espaçamento 3x3 m diferiu-se significativamente dos demais. O teor de cinzas para os espaçamentos reduzidos (2x1 e 2x2 m) são iguais estatisticamente, enquanto que as porcentagens para os espaçamentos 3x2 e 3x3 m diferem entre si. Para a lignina total, nos menores espaçamentos observaram-se menores médias em relação aos maiores.

Para o carvão vegetal, observa-se que apenas a densidade relativa aparente não sofreu influência do espaçamento. Além disso, são evidentes as diferenças entre espaçamentos amplos e reduzidos para as características de teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, além do rendimento gravimétrico. No carvão oriundo do espaçamento 3x3 m observou-se maiores valores para densidade a granel, sendo as menores médias de friabilidade observadas quando produzido com madeira do espaçamento 3x2 m.

Tabela 3 - Características da madeira do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* aos 84 meses, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG

Variável	Comparações	Média 1	Média 2	t	p-valor
C/A	2x1 - 2x2	1,05	1,05	-0,0062	0,995202
	2x1 - 3x2	1,05	1,08	-0,1272	0,901892
	2x1 - 3x3	1,05	1,04	0,0460	0,964413
	2x2 - 3x2	1,05	1,08	-0,1638	0,873985
	2x2 - 3x3	1,05	1,04	0,0661	0,948919
	3x2 - 3x3	1,08	1,04	0,2073	0,840938
DB	2x1 - 2x2	0,45	0,45	-0,2004	0,846189
	2x1 - 3x2	0,45	0,47	-1,8704	0,098339*
	2x1 - 3x3	0,45	0,51	-4,3351	0,002495*
	2x2 - 3x2	0,45	0,47	-2,3012	0,050377*
	2x2 - 3x3	0,45	0,51	-5,1862	0,000836*
	3x2 - 3x3	0,47	0,51	-3,0201	0,016557*
LG	2x1 - 2x2	28,45	28,29	0,5317	0,623076
	2x1 - 3x2	28,45	30,54	-5,8828	0,004173*
	2x1 - 3x3	28,45	29,87	-4,0162	0,015914*
	2x2 - 3x2	28,29	30,54	-11,5310	0,000323*
	2x2 - 3x3	28,29	29,87	-8,1765	0,001218*
	3x2 - 3x3	30,54	29,87	2,4770	0,068432
TMV	2x1 - 2x2	85,83	86,29	-0,9734	0,358844
	2x1 - 3x2	85,83	85,53	0,8040	0,444623
	2x1 - 3x3	85,83	85,71	0,2154	0,834823
	2x2 - 3x2	86,29	85,53	1,9676	0,084656
	2x2 - 3x3	86,29	85,71	1,0349	0,330979
	3x2 - 3x3	85,53	85,71	-0,3873	0,708669
TCz	2x1 - 2x2	0,48	0,41	1,9378	0,088641
	2x1 - 3x2	0,48	0,34	3,3254	0,010456*
	2x1 - 3x3	0,48	0,24	6,5585	0,000177*
	2x2 - 3x2	0,41	0,34	2,9339	0,018885*
	2x2 - 3x3	0,41	0,24	16,7604	0,000000*
	3x2 - 3x3	0,34	0,24	3,9416	0,004286*
TCF	2x1 - 2x2	13,69	13,30	0,8357	0,427551
	2x1 - 3x2	13,69	14,13	-1,1687	0,276173
	2x1 - 3x3	13,69	13,84	-0,2784	0,787745
	2x2 - 3x2	13,30	14,13	-2,1609	0,062701
	2x2 - 3x3	13,30	13,84	-0,9644	0,363096
	3x2 - 3x3	14,13	13,84	0,5815	0,576916
PCS	2x1 - 2x2	4671,20	4668,30	0,0932	0,928038
	2x1 - 3x2	4671,20	4638,40	1,2064	0,262139

Continua...

Tabela 3 – Cont.

PCS	2x1 - 3x3	4671,20	4663,50	0,3369	0,744835
	2x2 - 3x2	4668,30	4638,40	1,0691	0,316239
	2x2 - 3x3	4668,30	4663,50	0,2019	0,845042
	3x2 - 3x3	4638,40	4663,50	-1,3687	0,208279

*Significativo a 5% pelo teste t; C/A: relação Cerne/Alburno; DB: densidade básica (kg m^{-3}); LG: lignina total (%); TMV, TCz e TCF: teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo da madeira (%); PCS: poder calorífico superior (kcal kg^{-1}).

Tabela 4 - Características do carvão vegetal do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* aos 84 meses, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG

Variável	Comparações	Média 1	Média 2	t	p-valor
RGC	2x1 - 2x2	35,29	35,17	0,4238	0,700281
	2x1 - 3x2	35,29	36,62	-4,4451	0,021177*
	2x1 - 3x3	35,29	36,32	-2,8828	0,063383
	2x2 - 3x2	35,17	36,62	-15,3919	0,000104*
	2x2 - 3x3	35,17	36,32	-6,4003	0,003060*
	3x2 - 3x3	36,62	36,32	1,4929	0,209756
FRIAB	2x1 - 2x2	7,56	6,82	1,6738	0,192772
	2x1 - 3x2	7,56	6,12	3,4940	0,039652*
	2x1 - 3x3	7,56	6,52	1,4350	0,246768
	2x2 - 3x2	6,82	6,12	1,5465	0,196895
	2x2 - 3x3	6,82	6,52	0,4669	0,664892
	3x2 - 3x3	6,12	6,52	-0,6234	0,566787
DG	2x1 - 2x2	169,28	173,37	-0,8435	0,460909
	2x1 - 3x2	169,28	180,50	-1,8923	0,154798
	2x1 - 3x3	169,28	198,09	-4,4408	0,021232*
	2x2 - 3x2	173,37	180,50	-2,1713	0,095672
	2x2 - 3x3	173,37	198,09	-6,3969	0,003066*
	3x2 - 3x3	180,50	198,09	-3,7584	0,019803*
DRA	2x1 - 2x2	275,24	285,22	-0,5224	0,637534
	2x1 - 3x2	275,24	288,58	-0,6134	0,583012
	2x1 - 3x3	275,24	295,25	-0,9972	0,392154
	2x2 - 3x2	285,22	288,58	-0,2129	0,841833
	2x2 - 3x3	285,22	295,25	-0,6973	0,524019
	3x2 - 3x3	288,58	295,25	-0,4046	0,706505
TMVc	2x1 - 2x2	32,09	30,51	1,7686	0,175113
	2x1 - 3x2	32,09	33,72	-3,7699	0,032669*
	2x1 - 3x3	32,09	33,86	-3,4679	0,040409*
	2x2 - 3x2	30,51	33,72	-5,0535	0,007213*
	2x2 - 3x3	30,51	33,86	-5,0067	0,007455*
	3x2 - 3x3	33,72	33,86	-0,4932	0,647729

Continua...

Tabela 4 – Cont.

TCzc	2x1 - 2x2	1,11	1,03	1,5043	0,229544
	2x1 - 3x2	1,11	0,75	5,4624	0,012057*
	2x1 - 3x3	1,11	0,68	7,0556	0,005852*
	2x2 - 3x2	1,03	0,75	7,6894	0,001539*
	2x2 - 3x3	1,03	0,68	11,1433	0,000369*
	3x2 - 3x3	0,75	0,68	1,6924	0,165825
TCFc	2x1 - 2x2	66,80	68,46	-1,8325	0,164267
	2x1 - 3x2	66,80	65,53	2,5730	0,082279
	2x1 - 3x3	66,80	65,46	2,3454	0,100728
	2x2 - 3x2	68,46	65,53	4,6287	0,009817*
	2x2 - 3x3	68,46	65,46	4,4700	0,011075*
	3x2 - 3x3	65,53	65,46	0,1950	0,854880

*Significativo a 5% pelo teste t; RGC: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); FRIAB: friabilidade (%); DG e DRA: densidade a granel e relativa aparente em (kg m^{-3}); TMVc, TCzc e TCFc: teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal (%).

Na Tabela 5 são apresentadas as informações referentes à perda de massa pela decomposição térmica em função dos espaçamentos e faixas de temperatura. Uma média de perda de massa de 16,75 % foi observada para a faixa de temperatura entre 200-300°C, sendo a perda média de 56,5% para faixas de temperatura entre 300 e 400°C.

Tabela 5 - Perda de massa (%) da madeira em função dos espaçamentos e faixas de temperatura

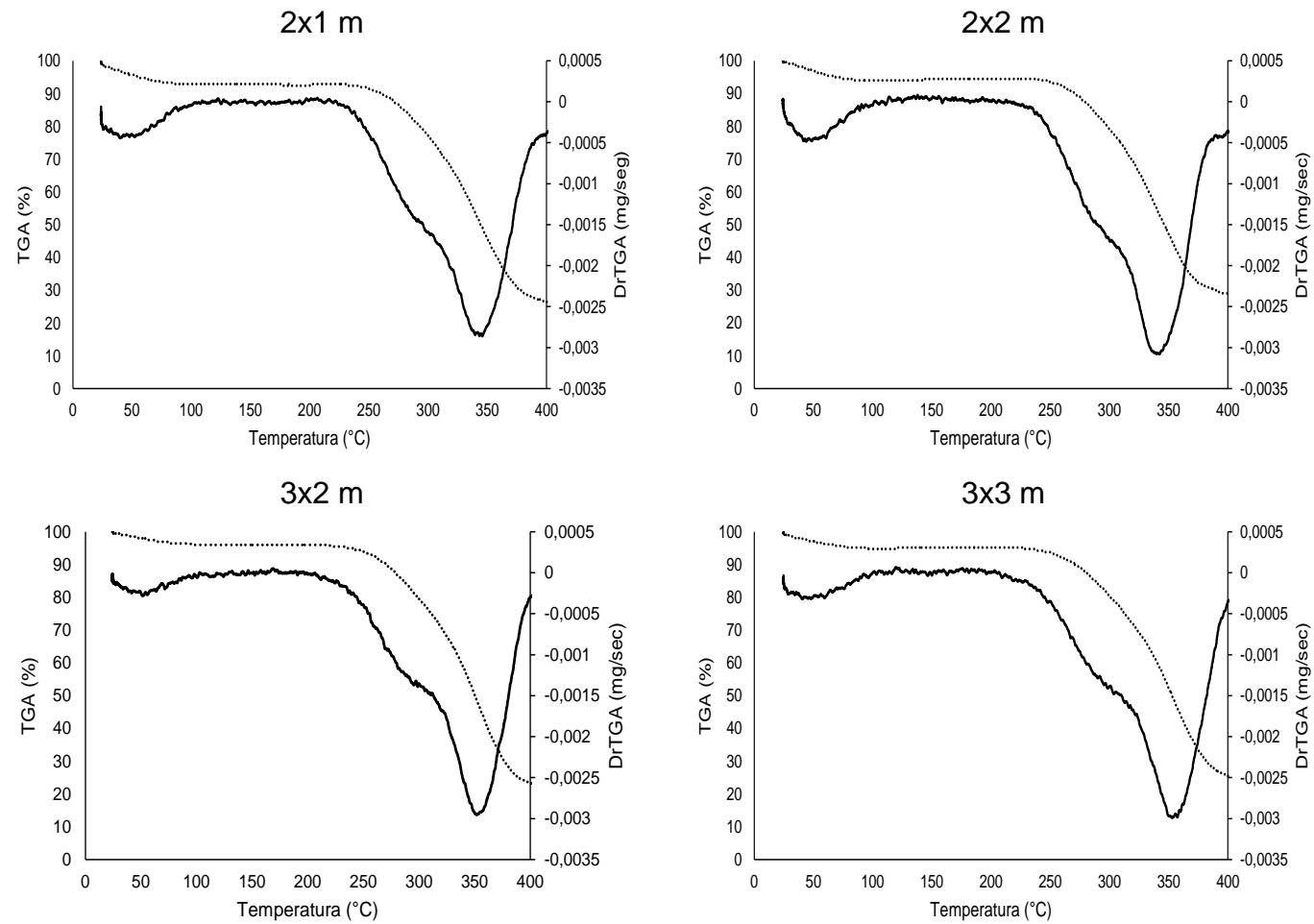
Espaçamento (m)	Faixa de temperatura (°C)			Massa residual
	100-200	200-300	300-400	
2x1	0	18	57	25
2x2	0	17	55	28
3x2	0	17	57	26
3x3	0	15	57	28

Os perfis de degradação térmica da madeira em função dos espaçamentos são apresentados na Figura 1. As curvas termogravimétricas (TGA) exibem a perda de massa em função da temperatura, enquanto que sua derivada (DrTGA) representa a

variação da massa em relação ao tempo. Nota-se que os perfis são semelhantes, apresentando pequenas modificações para os diferentes espaçamentos.

Ademais, pode-se inferir nos perfis que existem três faixas de degradação. Inicialmente, até temperaturas próximas à 100°C, tem-se a secagem da madeira, no entanto, ressalta-se que nesse estudo as madeiras foram secas à 0% de umidade, por isso não se observou perda de massa de água. Uma faixa compreendida entre 250 e 300°C está associada à degradação das hemiceluloses e, por último, a faixa correspondente em torno de 350°C está atribuída à decomposição da celulose. A degradação da lignina inicia-se em temperaturas relativamente baixas, porém com baixa taxa de decomposição, e somente acima de 450°C que se observa maior degradação da mesma (PERREIRA et al., 2013a).

Figura 1 – Perfis de degradação da madeira do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG



Na Figura 2 são apresentados os valores médios de massa seca, massa de lignina, massa de carvão vegetal e energia disponível em função dos espaçamentos.

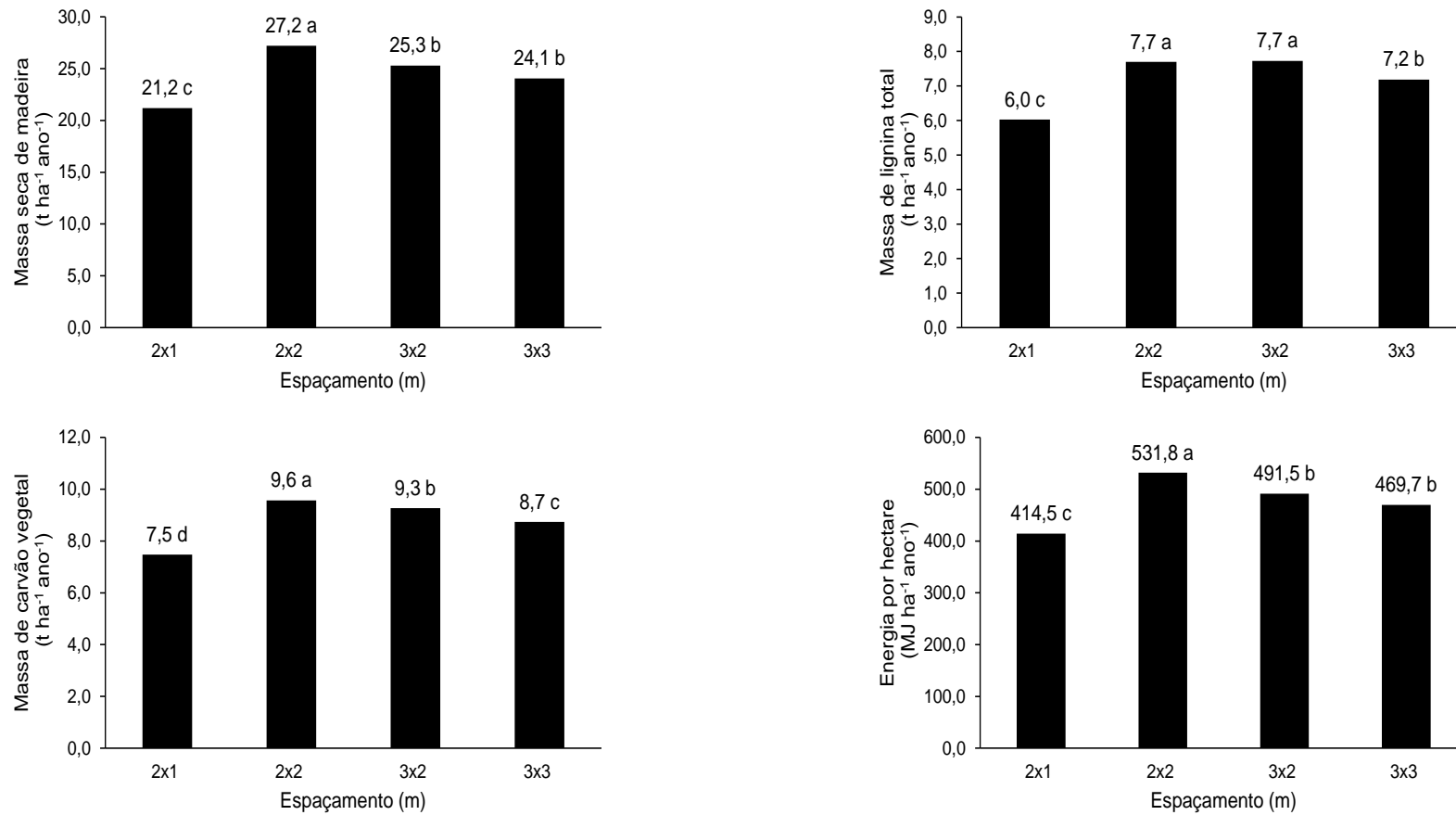
A massa seca de madeira produzida no espaçamento 2x2 m foi estatisticamente superior em relação a dos demais espaçamentos, diante maior incremento médio anual ($59,9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, conforme Capítulo 1). Apesar de possuir densidade básica da madeira equivalente, no espaçamento 2x1 m observou-se menores valores de massa seca, sendo os valores observados nos espaçamentos 3x2 e 3x3 m iguais estatisticamente (test t a 5% de significância).

Quanto à massa de lignina total, o espaçamento 2x2 m seguiu a mesma tendência de superioridade, devido à associação com o maior valor de massa seca. Essa característica é importante e corrobora com as estimativas de massa de carvão vegetal por hectare, o qual demonstra que esse espaçamento foi estatisticamente superior, com uma produção de $9,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Analisando a massa de carvão nos respectivos espaçamentos nota-se diferenças estatísticas significativas. Tal fato está correlacionado às diferenças nas massas seca produzidas proporcionarem diferenças nas massas de carvão por hectare, apesar dos espaçamentos 3x2 e 3x3 m possuírem rendimentos gravimétricos em carvão superiores aos observados no 2x1 e 2x2m.

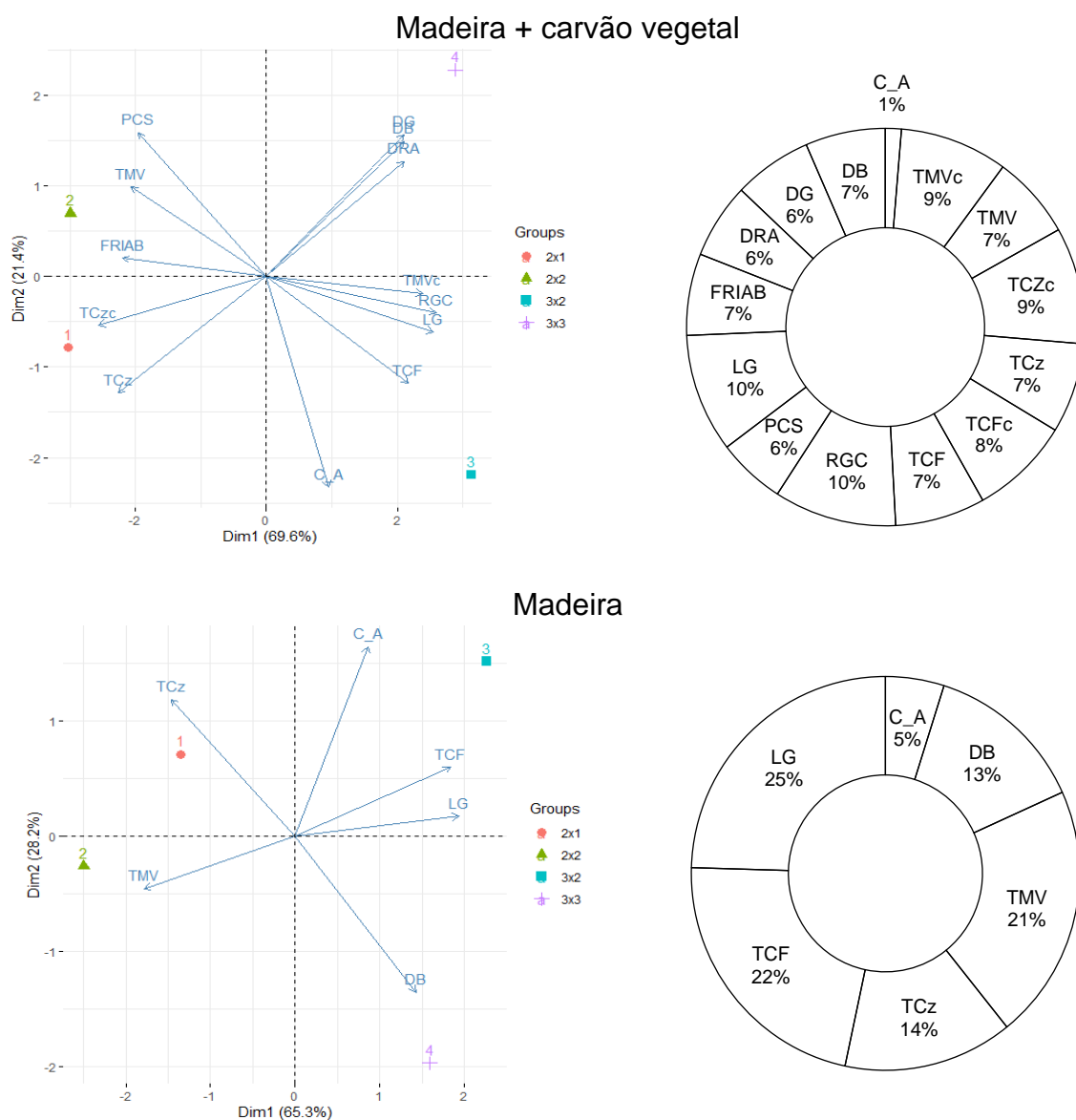
Ao avaliar a energia estocada (hectare.ano^{-1}), constata-se que o espaçamento 2x2 m proporciona maior quantidade de energia, associada à maior massa seca produzida. O poder calorífico da madeira para essa variável não foi discriminante, haja vista apresentar similaridade entre os espaçamentos.

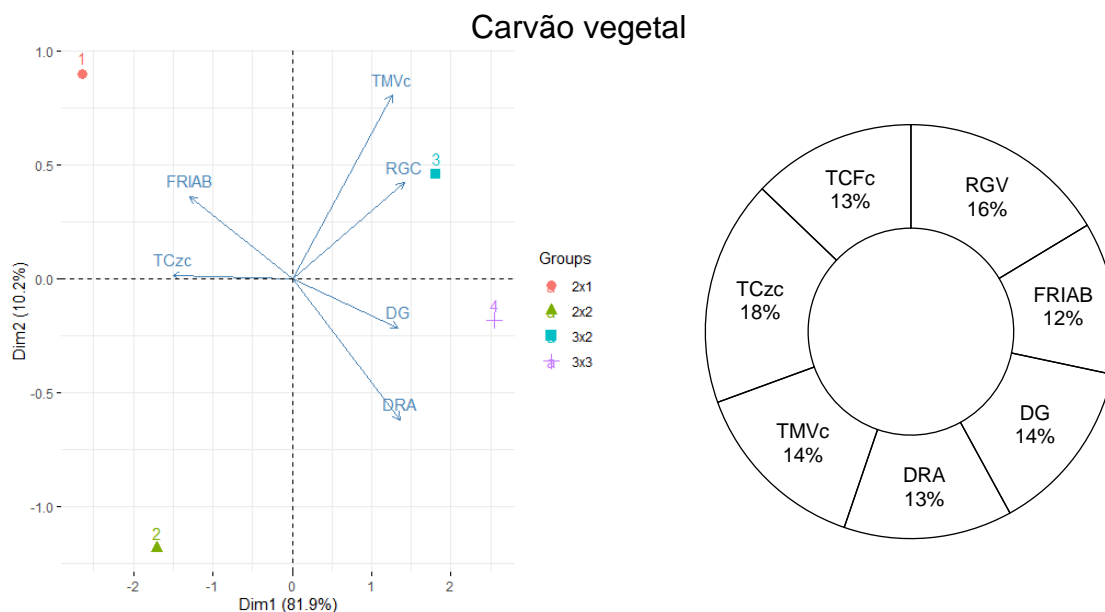
Figura 2 – Médias de massa seca, massa de lignina total, massa de carvão vegetal e energia disponível (teste t, $\alpha = 5\%$) do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG



Na Figura 3 são apresentados os escores e contribuição relativa das variáveis da madeira e carvão vegetal para os diferentes espaçamentos. Pode-se observar a dissimilaridade dos tratamentos, pois apresentam variações nas características químicas e produtivas tanto da madeira quanto do carvão vegetal. Contudo, a partir dos escores dos espaçamentos, observa-se que há formação de dois grupos, sendo o primeiro com os menores espaçamentos (2x1 e 2x2 m) e o outro com os maiores espaçamentos (3x2 e 3x3 m).

Figura 3 - Dispersão dos escores e contribuição relativa das variáveis da madeira e carvão vegetal para do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG





em que: C_A: relação Cerne/Alburno; DB: densidade básica (kg m^{-3}); LG: lignina total (%); TMV, TCz e TCF: teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo da madeira (%); PCS: poder calorífico superior em (kcal kg^{-1}); RGC: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); FRIAB: friabilidade (%); DG e DRA: densidade a granel e relativa aparente (kg m^{-3}); TMVc, TCzc e TCFc: teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal (%).

Para a madeira, a componente principal 1 (CP1) representa 65,2% e a componente principal 2 (CP2) 28,2%, que ao total explicam 93,5% das variações referentes às características da madeira produzidas nos diferentes espaçamentos. Esta análise foi consistente uma vez que se espera que esses componentes captem o máximo da variação dos dados (HONGYU, 2015).

Os menores espaçamentos (2x1 e 2x2 m) têm seus escores localizados próximos aos vetores das variáveis TCz e TMV, indicando que os teores de cinza e de material volátil são maiores. Já os escores dos espaçamentos com menores densidades (3x2 e 3x3 m), encontram-se localizados de forma oposta aos vetores de TCz e TMV, o que indica que a madeira desses espaçamentos apresenta menores teores de cinzas e materiais voláteis. Isso é corroborado pelo teste t para o teor de cinzas, no entanto não apresenta diferenças significativas quanto ao teor de materiais voláteis.

A relação C/A apresentou maior importância somente no segundo componente principal. O mesmo acontece para a análise que leva em consideração tanto o carvão

quanto a madeira, sugerindo que essa variável tem pouca importância na discriminação dos espaçamentos.

Os espaçamentos 3x2 e 3x3 m estão mais associados às variáveis DB, TCF e LG, sendo que o 3x2 m apresenta os maiores valores de TCF e LG e os menores valores de TCZ e TMV. Essa tendência também é observada quando se comparam as médias pelo teste t.

Em relação à madeira, as maiores contribuições relativas são para LG (25%), TCF (22%) e TMV (21%), com um total de 68%. E o menos representativo é a relação C/A. Isso indica que as variáveis LG, TCF e TMV são as variáveis que mais contribuem para a diferenciação dos espaçamentos, expressando maiores variações.

Para o carvão vegetal, a CP1 capta uma variação de 81,9% e CP2 de 10,2% da variação para dos dados. Além disso, observa-se que os espaçamentos 2x1 e 2x2 m estão associados aos vetores das variáveis TCzc e FRIAB, enquanto que os espaçamentos 3x2 e 3x3 m têm relação positiva com TMVc, RGC, DG e DRA.

As maiores contribuições relativas para o carvão vegetal são, por nível de importância, $TCzc > RGV > TMVc \geq DG > TCFc \geq DRA > FRIAB$. Esta análise recomenda que os teores de cinza e materiais voláteis juntamente com rendimento gravimétrico do carvão contribuem para que haja uma diferenciação entre os espaçamentos. Essa tendência também é indicada pela aplicação do teste t.

De modo geral, notam-se os mesmos resultados ao se comparar o teste t e análise multivariada. Isso demonstra que para uma quantidade grande de variáveis, a análise multivariada torna-se uma estratégia vantajosa, haja vista que consegue demonstrar as tendências de comportamento e as suas respectivas contribuições relativas.

5. DISCUSSÃO

5.1 Madeira

5.1.1 Relação cerne/alburno (C/A)

O espaçamento não influenciou na relação C/A, conforme resultados também observados por Brito et al. (2019), que avaliaram diferentes espaçamentos de plantio (3x1, 3x2, 3x3 e 3x4 m) de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 48 meses de idade. Teixeira et al. (2015) relatam que as relações C/A variaram entre 1,27 e 2,12 aos 108 meses para *E. urophylla* x *E. grandis*, enquanto que Cherelli (2015) observou variações em torno de 0,84 a 1,61, aos 48 meses, para o mesmo híbrido.

A proporção cerne/alburno na madeira é um parâmetro de qualidade. Pereira et al. (2013) relatam que menores relações C/A na produção de carvão vegetal podem influenciar no processo de carbonização, justificado pela impermeabilidade do cerne e sua influência na fase de secagem. Outro ponto a ser considerado é que altos percentuais de cerne podem formar fissuras no carvão vegetal, o que diminui a resistência mecânica do material ocasionando maior geração de finos. Isso é devido ao impedimento à saída dos gases presentes na madeira (PEREIRA et al., 2016; CARNEIRO et al., 2016).

De modo geral, nota-se que espaçamentos que promovem o crescimento em diâmetro tendem a gerar carvão vegetal mais quebradiço, o que produz finos durante a cadeia produtiva (PERREIRA, 2012). No entanto, no presente estudo a influência do espaçamento sobre esse parâmetro não foi observado, possivelmente explicada pelo tamanho da peça de madeira utilizada no processo de carbonização.

5.1.2 Densidade básica

A densidade básica é referida como um importante índice de qualidade da madeira, pois auxilia na recomendação de madeiras para uso industrial e em campo, além de interferir nas propriedades físicas e anatômicas da madeira e de seus derivados, incluindo o carvão vegetal (SANTOS, 2010; NEVES, 2012). Essa variável pode indicar as melhores espécies destinadas à produção de carvão vegetal, uma vez que aumenta a densidade energética, a densidade do carvão vegetal e a produtividade dos fornos e outros sistemas de queima, reduzindo consideravelmente

mão de obra, área de estocagem e custos com transporte (MENESES et al., 2015; (JESUS et al., 2017).

No presente estudo, a densidade básica foi influenciada pelo espaçamento de plantio, pois quanto maior a área útil por planta, maior a densidade básica. Isso é justificado pelo ambiente em que o híbrido está inserido, já que esta variável tem forte relação com os recursos de crescimento disponível (KUNSTLER et al., 2016; CLOUGH et al., 2017; IBANEZ et al., 2017). Em espaçamentos reduzidos, a competição por nutrientes, água e luz ocorre de forma mais acentuada, podendo levar a estagnação de crescimento e a maiores percentuais de madeira juvenil, apresentando baixa densidade básica (SENET et al., 1985; ROCHA, 2011; VIDAURRE et al., 2011).

Ao estudar a influência das variáveis edáficas e climáticas na produtividade de diferentes sítios no Brasil, aos 48 meses de idade, Costa et al. (2020) observaram que clones de eucalipto com os menores incrementos médios anuais tiveram maiores densidades básicas de madeira. Além disso, Almeida et al. (2020) relatam que a densidade básica é uma característica com alta herdabilidade e sofre modificações a partir do ambiente em que está inserido.

Rocha et al. (2020) também comentam que em regiões mais secas frequentemente observam-se maiores densidades básicas de madeira associados com menores volumes de biomassa de tronco, ao passo que em áreas mais úmidas essas relações estão mais associadas à interação clone x ambiente, não seguindo um padrão de densidade básica. Isso corrobora com os resultados encontrados no presente estudo, haja vista que o incremento médio anual no espaçamento 3x3 m, aos 84 meses, do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* foi o menor dentre os espaçamentos analisados, proporcionando maior densidade básica por planta. Enquanto que os espaçamentos 2x1, 2x2 e 3x2 m tiveram os maiores IMA e menores densidades básicas por planta. Logo, pode-se inferir que regiões que promovem crescimento mais acelerado, de modo geral, têm-se menor densidade básica da madeira.

Para a produção de carvão vegetal é desejado que a madeira tenha maiores valores de densidade básica, já que existe uma correlação positiva entre a densidade da madeira e a densidade relativa aparente do carvão. Assim, esse parâmetro

influencia diretamente na produtividade exigida (NEVES et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2014b).

5.1.3 Composição química estrutural e análise química imediata

Interações complexas são observadas quando os elementos químicos presentes na madeira são submetidos a altas temperaturas. Oliveira et al. (2010) afirmam que há uma relação direta entre o rendimento do carvão vegetal e seu teor de carbono fixo com o percentual de lignina presente na madeira. Nota-se que à medida que se aumentou o espaçamento de plantio, o teor de lignina também se elevou. Além disso, maiores áreas útil por planta, diminuíram os teores de cinzas do carvão vegetal. Isso é justificado pelo fato que madeiras que apresentam maiores percentuais de lignina, apresentam menores percentuais de carboidratos, o que reflete em menor degradação térmica.

Por outro lado, observaram-se relações inversas quanto aos teores de carbono fixo e materiais voláteis do carvão vegetal. Valores encontrados nesse estudo estão próximo aos obtidos por Yang et al. (2007), que relatam que o carbono fixo presente no carvão foi influenciado negativamente pela quantidade de celulose. Isso se deve ao fato que a celulose é degradada em temperaturas 315 e 400 °C, contribuindo assim para menores valores de carbono fixo no carvão vegetal. Isso também é corroborado por Yu et al. (2016), que verificaram que a pirólise da celulose ocorre em uma faixa de temperatura relativamente estreita, típica dos polímeros lineares, em torno de 350 °C.

Além disso, a lignina tem composição química com estruturas de altos índices de aromaticidade, tamanho e formas diferentes de arranjo, o que promove maior resistência à degradação térmica quando comparado com a celulose e hemicelulose (HAYKIRI-ACMA et al, 2010; XIAO et al.,2020). Estudando *E. urophylla* x *E. grandis* em diferentes idades e com objetivo de verificar a influência das características da madeira sobre o carvão vegetal, Soares et al (2014) observaram que os teores de lignina da madeira apresentam correlações positivas e negativas entre os teores de materiais voláteis e de carbono fixo, respectivamente.

As indústrias do setor energético desejam um percentual, mínimo, de 28% de teor lignina para as madeiras destinadas a tal fim (PEREIRA et al. 2013). Santos et al.

(2011), Arantes et al. (2011) e Protásio et al. (2014a) encontraram valores médios de 32%, 29,75% e 31,05% de teores de lignina para clones de *Eucalyptus* spp. Assim, valores encontrados nesse trabalho estão coerentes aos observados na literatura.

Um efeito positivo do espaçamento foi observado por Moulin et al. (2015) na composição química estrutural da madeira do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*. Os autores observaram que os teores de lignina da madeira tenderam a diminuir à medida que se reduzia a área útil por planta. Rocha (2011) também obteve maiores valores de lignina na madeira do híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis* nos espaçamentos mais amplos, em idade de 84 meses. Isso provavelmente se deve ao maior crescimento em altura, já que possivelmente apresentam maiores porcentagens em madeira juvenil no seu fuste.

Quanto à composição química da madeira, nota-se que o espaçamento não influenciou os teores de materiais voláteis e carbono fixo da madeira, mas afetou o teor de cinzas. Uma das causas pode estar relacionada a redução da biomassa individual em espaçamentos menores, o que reflete em menores proporções de materiais minerais na madeira. Resultados semelhantes foram encontrados por Eufrásio Júnior et al. (2018) ao estudarem um clone de *E. urophylla* x *E. grandis*, aos 24 meses em espaçamentos 2,8 x 0,5 e 2,8 x 1,5 m. Juízo et al. (2017) também encontraram diferenças significativas nos teores de cinzas que variam de 1,93 a 14,06% em clones de diferentes espécies de eucalipto.

5.1.4 Poder calorífico

O poder calorífico é um excelente parâmetro para se verificar a qualidade da madeira e suas peculiaridades para utilização energética (BRAND, 2010). De acordo com Soares et al. (2014), para a espécie *E. grandis* x *E. urophylla* estudada em idades que variaram de três e sete anos, há uma relação negativa entre o poder calorífico da madeira com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Isso é justificado devido à madeira possuir compostos resistentes à degradação térmica, como a lignina e extrativos, os quais contêm maiores teores de hidrogênio e carbono (PROTÁSIO et al., 2011).

No presente estudo, o espaçamento não influenciou o poder calorífico da madeira. Assis et al. (2012) avaliaram *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 72 meses, e não

observaram diferença significativa para o poder calorífico, cujos valores variaram entre 4.642 a 4.692 kcal kg⁻¹, estudando diferentes aplicações de nitrogênio em plantios com espaçamento de 3x3 m. Valores médios próximos 4.600 Kcal kg⁻¹ também foram encontrados por Protásio et al. (2014b) para dois clones comerciais de *Eucalyptus* (I220 e I144) em diferentes idades em espaçamento 3,5 x 2,5 m.

Valores encontrados no presente estudo também estão em conformidade com os obtidos por Guimarães Neto (2017), Rocha et al. (2011), Vargas-Moreno et al. (2012) e Guo et al. (2010).

5.1.5 Análise termogravimétrica

Independentemente do espaçamento, a perda de massa obtida nesse estudo está em acordo com os valores obtidos para o gênero *Eucalyptus*. Isso demonstra estabilidade térmica e reflete em bons rendimentos em carvão vegetal. Santos et al. (2011) estudando a qualidade da madeira de *E. urophylla* x *E. grandis* para a produção de carvão vegetal, aos 84 meses em espaçamento 3x3 m, observaram que os maiores picos de degradação ocorreram entre 300 e 400 °C, com médias de massa residual em 8% e temperatura final de 450 °C.

Campos (2009) observaram faixas de maior degradação entre 250 e 450 °C para clones de eucalipto, com 59 meses. Tal fenômeno ocorre devido à degradação térmica das hemiceluloses e celulose presente na madeira, cuja decomposição acontece entre 315 e 400 °C (YANG et al, 2007) e 190 e 360 °C (SHEN et al, 2010), respectivamente. Além disso, Santos (2010) afirmam que as hemiceluloses ao serem submetida a uma degradação térmica, têm perfil variável e baixa resistência a temperaturas superiores à 215 °C. Essas características traduzem-se em menores rendimentos em carvão vegetal, visto possuir uma estrutura bastante ramificada e amorfa.

Estudando a utilização da análise termogravimétrica na pré-seleção de materiais genéticos de *Eucalyptus*, aos 87 meses, em espaçamento 3x3 m, Fialho et al. (2019) observaram que as maiores perdas de massa ocorreram na faixa de temperatura entre 300 a 450 °C. Estes autores relatam que essa faixa está associada às maiores correlações entre as propriedades da madeira e do carvão, justificado pela degradação das hemiceluloses e celulose.

5.2 Carvão vegetal

5.2.1 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal

No presente estudo, os rendimentos em carvão vegetal foram acima de 35% com valores superiores para os espaçamentos mais amplos (3x2 e 3x3 m). Isso pode ser explicado pela estrutura complexa da lignina presente na madeira e sua maior resistência à degradação térmica (PERREIRA et al, 2013b). Além disso, Haykiri-Acma et al. (2010) citam que a lignina é um dos componentes mais importantes para a produção de carvão devido seus altos níveis de aromaticidade, tamanho e arranjo das estruturas.

Outro ponto importante a ser observado é a correlação positiva do rendimento em carvão vegetal com a densidade básica da madeira. Nota-se que os espaçamentos mais amplos obtiveram maiores densidades básicas e, por consequência, maiores rendimentos. Por outro lado, esses mesmos espaçamentos apresentaram baixos teores de carbono fixo e maiores porcentagens de materiais voláteis.

Esse fato era esperado, pois a porcentagem de lignina juntamente com a composição química, em especial a relação C/H e carbono elementar presente na madeira, podem ter influenciado os resultados observados. Uma das soluções para contornar os baixos teores de carbono fixo é aumentar o tempo de carbonização. Soares et al (2015) reportam que os maiores rendimentos em carvão vegetal foram encontrados em materiais genéticos mais duros e que essa superioridade pode estar relacionada às características químicas e tamanho da peça do material a ser carbonizado.

Ao avaliar o efeito da variação radial e longitudinal da madeira no rendimento gravimétrico em carvão vegetal do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* aos 72 meses, Trugilho et al. (2019) relatam que as maiores classes de diâmetro apresentam, de forma geral, maiores rendimentos em carvão vegetal. Isso pode estar associado com o processo de lignificação das células do parênquima e maior presença de substâncias como compostos aromáticos e taninos.

Os resultados do presente estudo estão em conformidade com os encontrados por Reis et al. (2012a), Santos et al. (2012a), Soares et al. (2015) e Briseño-Urbe et

al. (2015), que utilizaram temperatura final de 450 °C, por 4h, em forno tipo mufla, com rendimento na faixa de 30% a 44% para diferentes espécies de *Eucalyptus*.

5.2.2 Friabilidade

O espaçamento influenciou significativamente a friabilidade do carvão vegetal. Nota-se que o carvão vegetal produzido a partir da madeira proveniente do espaçamento 3x2 m gerou mais finos, com teores acima de 6,0%. No entanto, de acordo com a classificação do CETEC (1982) e Oliveira et al. (1982), os carvões produzidos nos diferentes espaçamentos podem ser considerados como muito pouco friáveis, já que apresentam terrores menores que 10%.

Uma das possíveis explicações está relacionada a influência do diâmetro da madeira em relação a friabilidade. Como os espaçamentos mais amplos, caso do 3x2 m, produzem árvores de maiores dimensões, a variação da densidade no sentido medula casca são responsáveis pela formação de tensões internas, o que promove a geração de finos no processo de conversão de madeira em carvão vegetal (SILVA et al., 2019; COUTINHO e FERRAZ, 1998).

Por outro lado, Pereira et al. (2013) relatam que a friabilidade pode ser afetada pela relação C/A. No presente estudo, não se observou tal relação, haja vista que não houve diferenças significativas para esta última variável. Observa-se que os dados estão em consenso com Texeira (2018) uma vez que encontraram valores entre 3,82 e 8,75% ao se trabalhar com 65 genótipos de *Eucalyptus*, em espaçamento 3x3 m e idade de 82 meses.

5.2.3 Densidade a granel

Os valores médios de densidade a granel obtidos para o *E. urophylla* x *E. grandis* no presente estudo, independentemente do espaçamento, estão de acordo com os observados por Carneiro et al. (2011) e Isbaex (2014), que relatam sobre a variação da densidade a granel entre 160 a 300 kg.m⁻³. No entanto, no presente estudo, o carvão vegetal produzido com madeira do espaçamento 3x3 m teve maior densidade a granel quando comparado aos demais. Esse comportamento pode estar

associado a densidade básica da madeira, já que maior será a quantidade de matéria seca por unidade de volume (BRITO e BARRICHELO, 1977).

5.2.4 Densidade aparente

No presente estudo não foram observadas diferenças estatísticas para densidade aparente do carvão em função dos espaçamentos. Esses mesmos resultados foram encontrados por Reis et al. (2012b), que ao avaliar o efeito do local e do espaçamento de plantio na qualidade de carvão vegetal de clone de *E. urophylla*, observaram que a densidade relativa do carvão variou entre 320 e 337 kg.m⁻³, não sendo influenciada pelos fatores em estudo. Tendências semelhantes foram observadas por Santos (2010) e Arantes et al. (2009), ao avaliarem carvão de *E. urophylla* x *E. grandis* com densidades aparentes que variavam de 266 e 395 kg.m⁻³.

Valores médios superiores também foram encontrados por Rosa et al. (2012) e Brand et al. (2015) com variações de 373 e 403 kg.m⁻³ ao se estudar a qualidade de carvão de uso doméstico de clones de eucalipto comercializados no Espírito Santo e Santa Catarina. Além disso, Pereira et al. (2016b) observaram valores entre 361 e 405 kg.m⁻³ ao determinar as propriedades anatômicas e densidade aparente do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* no espaçamento 3,8 x 2,4 m, aos 90 meses.

Essas diferenças de valores podem ser justificadas pela variação na densidade básica e na constituição química da madeira, o que reflete diretamente na densidade aparente do carvão vegetal. De modo geral, quanto maiores às densidades da madeira, maiores são os valores de densidade aparente do carvão vegetal.

5.2.5 Composição química imediata

O teor de carbono fixo do carvão é uma das variáveis utilizadas como índice de qualidade. Para o setor siderúrgico, deve-se alcançar um percentual de, no mínimo, 75% para que haja uma produtividade elevada nos alto-fornos (SANTOS, 2008). Santos et al. (2016) obtiveram teores de carbono fixo de híbridos de *Eucalyptus*, aos 84 meses, variando de 85,33 e 87,52%. No entanto, no presente estudo observaram-se porcentagens que variaram de 65,46 e 68,46% nos diferentes espaçamentos. Uma das explicações para se obter tais valores pode estar relacionada com o tempo de carbonização ou taxa de aquecimento, haja vista que quanto maior a exposição da

madeira ao calor, maior sua degradação térmica. Assim, espaçamentos maiores produzem árvores de maiores dimensões e teores de lignina, o que contribui para maiores rendimentos em carvão vegetal. Em contrapartida, segundo Pereira (2012), há uma relação inversa entre rendimento gravimétrico em carvão vegetal e o teor de carbono fixo.

Quanto ao teor de materiais voláteis, nota-se que os espaçamentos mais amplos apresentaram os maiores valores, e por outro lado menores taxas de carbono fixo. Nesses espaçamentos, as classes diamétricas são maiores assim como as alturas totais, o que segundo Arantes (2009) confirma que os teores de materiais voláteis são influenciados no sentido medula-casca e em maiores alturas comerciais, justificados pela maior presença de açúcares no câmbio vascular e também carboidratos de baixo peso molecular encontrados no alburno.

Os maiores teores de cinza foram observados nos carvões produzidos com madeira proveniente dos espaçamentos mais adensados. Essa variação ocorreu devido a taxa de competição intraespecífica nesses espaçamentos ser elevada, o que promove árvores mais finas e taxa de crescimento menores, caracterizados possivelmente por maiores porcentagens de alburno. Apesar dessa diferença entre os espaçamentos, nota-se que os teores estão em conformidade com Carneiro et al. (2016) e Santos et al. (2016), com percentuais menores que 1%. Baixos teores de cinza são recomendados para a produção do carvão vegetal, pois além de refletir na produtividade também afeta a limpeza, desgaste e gastos de manutenção com os equipamentos utilizados (OLIVEIRA et al., 2012).

5.2.6 Estimativas de massa

Os resultados das massas estimadas comprovam que a escolha do espaçamento envolve três fatores principais: produtividade volumétrica, densidade da madeira e constituição química. Esses fatores contribuem positivamente para os aspectos quantitativos e qualitativos na produção de carvão vegetal da madeira e auxiliam também os produtores nas tomadas de decisão.

Observou-se que os menores espaçamentos tendem a produzir mais massa seca por hectare em relação aos demais. Isso se deve à relação direta existente entre a produção volumétrica e a maior densidade de plantas por área, o que reflete em maior quantidade de matéria seca. Esses resultados são corroborados por Santos et al.

(2012b), Caron et al. (2015) e Lopes (2017) que estudaram diferentes espécies de *Eucalyptus* e espaçamentos de plantio.

As médias de estimativa de massa seca obtidas no presente estudo foram superiores às observadas por Santos et al. (2011), com valores entre 15,27 e 23,28 t ha⁻¹ ano⁻¹ em povoamento de *E. urophylla*, no espaçamento 3x3 m aos 72 meses. Resultados semelhantes também são relatados por Saraiva et al. (2017), que observaram médias de massa seca de 18,9 e 20,5 t ha⁻¹ ano⁻¹ em espécies de *Eucalyptus*, aos 36 e 72 meses, cultivados nos espaçamentos 3x3 e 3x1 m, respectivamente.

Na escolha do espaçamento de plantio de eucalipto para fins energéticos, deve-se atentar para as características da madeira, em especial a densidade básica e o teor de lignina, pois estes irão influenciar tanto na produção de massa seca quanto na estimativa de carvão vegetal (ROCHA et al., 2015; MENEZES et al., 2015). Segundo Rocha et al. (2017), os espaçamentos menores tendem a reduzir as estimativas de massa lignina e, por consequência, as massas de carvão vegetal. Esses autores encontraram massas de lignina entre 5,65 e 6,36 t ha⁻¹ ano⁻¹ e massa de carvão vegetal com estimativas entre 5,11 e 6,16 t ha⁻¹ ano⁻¹ para espaçamentos com área útil que variavam entre 1,5 e 9 m² para *E. grandis* x *E. camaldulensis*, aos 82 meses.

Os resultados do presente estudo estão de acordo com Santos (2010) que avaliou um híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* e observou valores entre 6,7 e 8,1 t ha⁻¹ ano⁻¹ para massa de lignina e de carvão vegetal, respectivamente. No entanto, no espaçamento 2x2 m do presente estudo, nota-se que as estimativas de lignina e carvão vegetal apresentaram os maiores valores. Isso está relacionada ao fato que o adensamento de plantio promoveu as maiores produções volumétrica, apesar de possuir as menores densidades básicas, teores de lignina na madeira e rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Logo, confirma-se que a adoção deste espaçamento é uma alternativa interessante para os produtores da região de estudo, pois aliam produtividade com qualidade da matéria prima.

A geração de energia pela biomassa é outra opção para os produtores da região de Lamim, MG. O espaçamento 2x2 m se destacou, justificado pela sua produção em volume, uma vez que não houve diferenças entre os poderes calorífico da madeira. Isso está de acordo com Torres et al. (2016), que observaram maiores valores de energia estocada por hectare em espaçamentos menores.

5.3 Análise multivariada

A utilização das técnicas multivariadas, em especial a análise de componentes principais, auxilia no entendimento e interpretação das variáveis quando submetidas a comparações simultâneas. A partir dessas observações, compreendem-se como estas estão relacionadas e podem-se ranquear quais as características apresentam maior relevância para a finalidade que se deseja (CASTRO et al., 2013; MINGOTI, 2013).

A análise multivariada vem sendo aplicada na área florestal com intuito de identificar as propriedades da madeira e características dendrométricas mais relevante para a produção de carvão vegetal (BELTRAME et al., 2012; COSTA et al., 2014; FIGUEIRÓ et al., 2019). No entanto, essa técnica ainda é pouco utilizada para análises do espaçamento para tal fim. Esse trabalho demonstra que a análise de componentes principais pode auxiliar a tomada de decisão, já que avalia conjuntamente as características da madeira e do carvão vegetal e as associa com o espaçamento de plantio.

No presente estudo observou dissimilaridade entre os espaçamentos sob as condições analisadas. Para a madeira, verificou-se que a densidade básica e o teor de lignina são variáveis que merecem destaque na avaliação. De acordo com Castro et al. (2013) e Protásio et al. (2013), que também aplicaram a análise de componentes principais, as características supracitadas favoreceram a diferenciação entre os tratamentos/espaçamentos, com mais de 80% da variância explicada.

De acordo com a análise multivariada que os espaçamentos mais amplos, principalmente 3x2 e 3x3 m, os quais tiveram os maiores valores de densidade básica e lignina total, foram representados pelos maiores scores. Isso também foi observado por Elerati (2017), avaliando diferentes idades, espaçamentos de plantio de clones de eucalipto em Mato Grosso do Sul.

Ao analisar a qualidade e rendimentos do carvão vegetal do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* para uso siderúrgico, em diferentes idades e áreas úteis por planta variando entre 6 e 9 m², Assis et al. (2012) aplicaram a análise de componentes principais e observaram que o teor de materiais voláteis do carvão, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e densidade relativa aparente foram as variáveis mais relevantes para a diferenciação dos tratamentos, visto apresentar os maiores escores.

Os resultados do presente estudo são coerentes com Lobão et al. (2011), Reis et al. (2012a) e Dias et al. (2016) e Fialho (2018) que analisaram as diferentes propriedades da madeira e do carvão vegetal. Logo, a análise de componentes principais apresentou conformidade com o teste t (estatística univariada), demonstrando a eficiência da técnica multivariada, que se destaca diante possibilidade de identificação das variáveis mais importantes para análise do índice de qualidade da madeira e do carvão vegetal.

6. CONCLUSÃO

- De modo geral, os espaçamentos influenciaram os índices de qualidade da madeira, que por sua vez, resultaram em propriedades satisfatórias para a produção de carvão vegetal de uso siderúrgico;
- Espaçamentos amplos, com área útil acima de 6 m², são os mais indicados para a produção de carvão vegetal por proporcionarem melhores propriedades da madeira, em especial densidade básica e lignina total, associado aos maiores rendimentos gravimétricos e densidade a granel;
- A madeira produzida no espaçamento 2x2 m apresentou maiores estimativas de massa seca, massa de lignina, massa de carvão e energia por hectare, em relação ao incremento médio anual;

7. REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003. 6p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard method for chemical analysis of charcoal**. Philadelphia, 1982. 1042 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: carvão vegetal: análise imediata**. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633: carvão vegetal: determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ALMEIDA, M. N. F.; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; LOUSADA, J. L. P. C.; SILVA, M. E. C. M.; CAMARA, A. P.; ROCHA, S. M. G.; OLIVEIRA, J. C. L.; CAMPOE, O. C.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A.; FILHO, M. T.; FIGUEIREDO, F. M.; OLIVEIRA, R. F. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. 01, p. 1–10. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743>. Acesso em: 07 jul. 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 06, p. 711-728, 2013.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; CARNEIRO, A. C. O.; ALVES, E.; GUERREIRO, M. C. Longitudinal and radial variation of extractives and total lignin content in a clone of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, v. 17, n. 03, p. 283-291. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000300001>. Acesso em: 09 jul. 2020.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard method for chemical analysis of charcoal**. Philadelphia, 1982. 1042 p.
- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291-302. 2012. Disponível em: [10.4336/2012.pfb.32.71.291](https://doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.291). Acesso em: 03 ago. 2020.
- BELTRAME, R.; BISOGNIN, D. A.; MATTOS, B. D.; CARGNELUTTI FILHO, A.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; SANTOS, G. A. Desempenho silvicultural e seleção precoce de clones de híbridos de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 06, p. 791-796. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000600009>. Acesso em: 03 ago. 2020.
- BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. v. 01, 114 p.
- BRAND, M. A.; RODRIGUES, A. A.; OLIVEIRA, A.; MACHADO, M. S.; ZEN, L. R. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região

serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 39, n. 06, p.1165-1173. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000600020>. Acesso em: 29 jul. 2020.

BRISEÑO-URIBE, K.C.; CARRILLO-PARRA, A.; BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, H.; FOROUGHBACHK, R. Firewood production, yield and quality of charcoal from *Eucalyptus camaldulensis* and *E. microtheca* planted in the semiarid land of northeast Mexico. **International Journal of Green Energy**, v. 12, n. 01, p. 961-969. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2014.891121>. Acesso em: 24 jul. 2020.

BRITO, A. S.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. G. M.; RODRIGUES, B. P.; CARNEIRO, A. C. O. Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of *Eucalyptus* wood. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 01, p. 1-9. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.037818>. Acesso em: 08 jul. 2020.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: i. densidade e teor de lignina da madeira de Eucalipto. **Scientia Forestalis**, n.14, v. 01, p 9-20, 1977.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de Eucalyptus: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR**. 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2009.

CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; SANTOS, R. C. **Treinamento carvão vegetal: apostila teórica e prática**. Viçosa-MG, 2011. 129p.

CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; FREDERICO, P.G.U.; FIALHO, L.F.; FIGUEIRÓ, C.G.; SILVA, C.M.S. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **FLORESTA**, v. 46, n. 04, p.473–480, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rf.v46i4.45704>. Acesso em: 08 jul. 2020.

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. 01, p. 106-112, 2015.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 06, p.627-635. 2013. Disponível em: [10.1590/S0100-204X2013000600008](http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000600008). Acesso em: 01 ago. 2020.

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. 1982. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Séries Técnicas CETEC, Belo Horizonte, 393p.

CHERELLI, S.G. **Cerne e alburno em eucaliptos: influência da espécie e da idade nas propriedades tecnológicas**. 2015. 165 f. Dissertação (Mestrado em Ciência

Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2015.

CLOUGH, B. J.; CURZON, M. T.; DOMKE, G. M.; RUSSELL, M. B.; WOODALL, C. W. Climate driven trends in stem wood density of tree species in the eastern United States: ecological impact and implications for national forest carbon assessments. **Global Ecology Biogeography**, v. 26, n. 01, p. 1153–1164. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/geb>. Acesso em: 06 jul. 2020.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e da temperatura de carbonização. **IPEF**, n. 38, p. 33-37, 1988.

COSTA, S. E.; SANTOS, R. C.; VIDAURRE, G. B.; CASTRO, R. V. O.; ROCHA, S. M. G.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C.; SANTOS, C. P. S. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. 01, p. 1-10. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117807>. Acesso em: 06 jul. 2020.

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGUILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 20, n. 01, p. 37-46. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602014000100005>. Acesso em: 03 ago. 2020.

DIAS, A. F. J.; COSTA JÚNIOR, D. S. C.; ANDRADE, A. M.; OLIVEIRA, E.; LANA, A. Q.; BRITO, J. O. Quality of Eucalyptus wood grown in Rio de Janeiro state for bioenergy. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 03, p. 435-442. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.140315>. Acesso em: 03 ago. 2020.

DOS SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; DOS SANTOS, H. G.; KER, J. C.; DOS ANJOS, L. H. C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. **Sociedade Brasileira de ciência do solo**. Viçosa: Folha de Viçosa Ltda, 7 ed. 2015. 100 p.

ELERATI, T. L. **Espaçamento, genótipo, idade e a produção de biomassa em povoamentos de eucalipto**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

ELOY, E.; CARON, B. O.; SILVA, D. A.; SCHMIDT, D.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; ELLI, E. F. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista Árvore**, v. 38, n. 03, p. 551-559, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000300018>. Acesso em: 25 jul. 2020.

EUFRÁSIO-JÚNIOR, H. J.; GUERRA, S. P. S.; SANSÍGOLO, C. A.; BALLARIN, A. W. Management of Eucalyptus short-rotation coppice and its outcome on fuel quality. **Renewable Energy**, v. 121, n. 01, p. 309-314. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.033>. Acesso em: 09 jul. 2020.

FERREIRA, D.H.A.A.; LELES, P.S.S.; MACHADO, E.C.; ABREU, A.H.M.de; ABILIO, F.M. Crescimento de clone de Eucalyptus urophylla x E. grandis em diferentes

espaçamentos. **FLORESTA**, v. 44, n. 03, p. 431-440. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v44i3.32188>. Acesso em: 30 jul. 2020.

FIALHO, L. F.; CARNEIRO, A. C. O.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. P. S.; SURDI, P. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A.; PERES, L. C. Application of thermogravimetric analysis as a pre-selection tool for *Eucalyptus* spp. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, n. 03, p. 1-9. 2019. Disponível em: 10.5039/agraria.v14i3a6363. Acesso em: 22 jul. 2020.

FIALHO, L. F. **Seleção de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. Para a produção de carvão vegetal utilizando análise multivariada**. 2018. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, G. R.; CARNEIRO, A. P. S.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, C. M. S.; CASTRO, V. R. Caracterização do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, n. 03, p. 1-8, 2019. Disponível em: 10.5039/agraria.v14i3a5659. Acesso em: 03 ago. 2020.

GOMES, P. A., OLIVEIRA, J. B. **Teoria da carbonização da madeira**. In: PENEDO, W. R. (Ed.). *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte: CETEC, 1980. p. 27-42.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-266.

GONÇALVES, F.G., OLIVEIRA, J.T.S., SILVA, G.F., 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**, v. 34, n. 05, p. 947-959. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622010000500020>. Acesso em: 30 ago. 2020.

GUO, X.; WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; LUO, Z. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, v. 38, n. 01, p. 42-46. 2010. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(10\)60019-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(10)60019-9). Acesso em: 10 jul. 2020.

GUIMARÃES NETO, R. M. **Potencialidade de uso bioenergético da madeira e da casca de *Eucalyptus* spp. plantados em espaçamento adensado e sistema de curta rotação**. 2017. 110 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

HÄGGMAN, H., RAYBOULD, A., BOREM, A., FOX, T., HANDLEY, L., HERTZBERG, M., LU, M.Z, MACDONALD, P., OGUCHI, T., PASQUALI, G., PEARSON, L., PETER, G., QUEMADA, H., SÉGUIN, A., TATTERSALL, K., ULIAN, E., WALTER, C., MCLEAN, M. Genetically engineered trees for plantation forests: key considerations for environmental risk assessment. **Plant Biotechnology Journal**, v. 11, n. 07, p. 785-

798. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pbi.12100>. Acesso em: 30 ago. 2020.

HAYKIRI-ACMA, H., YAMAN, S., AND KUCUKBAYRAK, S. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 01, p. 759-764. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.02.009>. Acesso em: 23 jul. 2020.

HONGYU, K. **Comparação do GGE biplot-ponderado e AMMI-ponderado com outros modelos de interação genótipo x ambiente**. 2015. 155 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Estatística e Experimentação Aplicada, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 2015.

IBANEZ, T.; CHAVE, J.; BARRABÉ, L.; ELODIE, B.; BOUTREUX, T.; TRUEBA, S.; VANDROT, H.; BIRNBAUM, P. Community variation in wood density along a bioclimatic gradient on a hyper-diverse tropical island. **Journal of Vegetation Science**, v. 28, n. 01, p. 19–33. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jvs.12456>. Acesso em: 06 jul. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2018**. Rio de Janeiro: v. 33, p. 1-8. 2018.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de silício metálico**. 2014. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

JESUS, M. S.; COSTA, L. C.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de Eucalyptus. **FLORESTA**, v. 47, n. 01, p. 11-16. 2017. Disponível em: [10.5380/rev.v47i1.48418](https://doi.org/10.5380/rev.v47i1.48418). Acesso em: 06 jul. 2020.

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M. R.; SILVA, D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.12, n.3, p.386-390, 2017. Disponível em: [10.5039/rev.v12i3a5461](https://doi.org/10.5039/rev.v12i3a5461). Acesso em: 09 jul. 2020.

JUNIOR, H. J. E.; DE MELO, R. X.; SARTORI, M. M. P.; GUERRA, P. S.; BALLARIN, A. W. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. **Biomass Bioenergy**, v. 90, n. 01, p. 15–21. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.037>. Acesso em: 26 jul. 2020

KUNSTLER, G., FALSTER, D., COOMES, D. A., HUI, F., KOOYMAN, R. M., LAUGHLIN, D. C., ... WESTOBY, M. Plant functional traits have globally consistent effects on competition. **Nature**, v. 529, n. 01, p. 204–207. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature16476>. Acesso em: 06 jul. 2020.

LOBÃO, M.S.; CASTRO, V.R. de; RANGEL, A.; SARTO, C.; TOMAZELLO FILHO, M.; SILVA JÚNIOR, F.G. da; CAMARGO NETO, L. de; BERMUDEZ, M.A.R.C. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 01, p.469-477, 2011.

LOPES, E. D. **Avaliação de clones de Eucalyptus spp e Corymbia spp em diferentes espaçamentos visando à produção de bioenergia**. 2017. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis) – Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2017.

MARCHESAN, R.; MENDONÇA, D.; DIAS, A. C. C.; SILVA, R. C.; PEREIRA, J. F.; ALMEIDA, V. C. Quality of Eucalyptus urograndis charcoal produced in the Southern region of Tocantins. **FLORESTA**, v. 49, n. 04, p. 691–700. 2019. Disponível em: 10.5380/rf.v49 i4.57702. Acesso em: 23 jul. 2020.

MENESES, V.; TRUGILHO, P. F.; CALEGARIO, N. LEITE, H. G. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do Eucalyptus urophylla. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 101-116, 2015.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2013. 297p.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, v.39, n. 01, p.199-208, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000100019>. Acesso em: 10 jul. 2020.

NEVES, T. A. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalyptus cultivados no sul de Minas Gerais**. 2012. 95 f. Mestrado (Dissertação em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Departamento em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2012.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; VALLE, M. L. A.; SOUSA, L. C.; VIEIRA, C. M. Qualidade da madeira de clones de Eucalyptus em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 02, p. 139-148, 2013. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/rca.2013.022>. Acesso em: 06 jul. 2020.

NEVES, T. A., PROTÁSIO, T. de P., COUTO, A. M., TRUGILHO, P. F., SILVA, V. O., VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319 - 330, 2011.

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

OLIVEIRA, A. C.; ROCHA, M. F. V.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R. Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla. **FLORESTA**, v. 42, n. 01, p. 59-68. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v42i1.26297>. Acesso em: 05 ago. 2020.

OLIVEIRA, J. B. de. VIVACQUA FILHO, A. GOMES, P.A. Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos. In: PENEDO, W. R. et al. Eds. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 60-73.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v.8, n. 03, p. 4574-4592. 2013.

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHÃES, M. A. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de Eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 02, p. 545-557. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509822755>. Acesso em: 29 jul. 2020.

PERREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHÃES, M. A. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de Eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 02, p. 545-557. 2016b. Disponível em: [10.5902/1980509822755](https://doi.org/10.5902/1980509822755). Acesso em: 29 jul. 2020.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G.H.D; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; JÚNIOR, M. G. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113-122. 2011. Disponível em: [10.4336/2011.pfb.31.66.113](https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113). Acesso em: 10 jul. 2020.

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

PROTÁSIO, T. P.; Goulart, S. L.; NEVES, T. A.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Clones comerciais de Eucalyptus de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 113-127, 2014a.

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. R. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, p. 1-14. 2014b. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.657>. Acesso em: 06 jul. 2020.

RAMALHO, F. M. G.; PIMENTA, E. M.; GOULART, C. P.; ALMEIDA, M. N. F.; VIADAURO, G. B.; HEIN, P. R. G. Effect of stand density on longitudinal variation of wood and bark growth in fast-growing Eucalyptus plantations. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 12, n. 06, p. 527-532. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3832/for3082-012>. Acesso em: 25 jul. 2020.

REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* s. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 04, p. 497-505. 2012a. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/floram.2012.055>. Acesso em: 29 jul. 2020.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P.F.; CARNEIRO, A.C. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 277-290. 2012b.

RESQUIN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; CARRASCO-LETELIER, L; CASNATI, C. R. Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 438, n. 01, p. 63-74. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.007>. Acesso em: 23 jul. 2020.

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 em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

ROCHA, M. F. V., COSTA, E. V. S., JESUS, M. S., VITAL, B. R., CARNEIRO, A. C. O., CARVALHO, A. M. M. Interface of different conditions of growth and cutting age in estimating dry mass, mass of carbon and energy per hectare of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* clones. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v.9, n. 23, p. 175-178. 2015.

ROCHA, M. F. V.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARDOSO, M. T. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 28, n. 03, p. 243-248. 2016. Disponível em: www.jstor.org/stable/43856528. Acesso em: 26 jul. 2020.

ROCHA, S. M. G.; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, M. N. F.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C.; SCOLFORO, H. F.; ALVARES, C. A.; NEVES, J. C. L.; XAVIER, A. C.; FIGURA, M. A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. 01, p. 1–10. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118290>. Acesso em: 07 jul. 2020.

ROCHA, M. F. V.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; ZANUNCIO, A. J. V.; HEIN, P. R. G. Propriedades energéticas do carvão vegetal em função do espaçamento de plantio. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 02, p. 54-63. 2017. Disponível em: [10.12953/2177-6830/rcm.v8n2p54-63](https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n2p54-63). Acesso em: 22 jul. 2020.

ROSA, R. A.; CHAVES ARANTES, M. D.; PAES, J. B.; ANDRADE, W. S. D. P.; MOULIN, J. C. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 03, n. 02, p. 41-48. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v3n2.rosa>. Acesso em: 29 jul. 2020.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 05, p. 971-980. 2012b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000500019>. Acesso em: 31 jul. 2020.

SANTOS, R. C, dos. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Departamento em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2010.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; CARDOSO, M. T. Correlation of quality parameters of wood and charcoal of clones of eucalyptus. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221-230. 2011.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 18, n. 01, p. 143-151. 2012a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000100017>. Acesso em: 22 jul. 2020.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 02, p. 657-669. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509822765>. Acesso em: 05 ago. 2020.

SARAIVA, A. B.; VALLE, R. A. B.; BOSQUÊ JR, A. E. S.; BERGLIN, N.; SCHENCH, A. V. Provision of pulpwood and short rotation eucalyptus in Bahia, Brazil - Environmental impacts based on lifecycle assessment methodology. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, n. 01, p. 41-50. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.004>. Acesso em: 31 jul. 2020.

SHEN, R.; GU, S.; BRIDGWATER, A. V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: cellulose and hemicelluloses. **Carbohydrate Polymers**, v. 82, n. 01, p. 39-45. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.04.018>. Acesso em: 22 jul. 2020.

SENFT, J. F.; BENDTESEN, B. A.; GALLIGAN, W. L. Weak wood. **Journal of forestry**, v. 83, n. 01, p. 476-485. 1985.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of eucalyptus urograndis wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, v. 172, n. 01, p. 509-516. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>. Acesso em: 24 jul. 2020.

SILVA, M. F.; FORTES, M. M.; JUNIOR, C. R. S. Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 03, p. 1-10. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016>. Acesso em: 26 jul. 2020.

SIMETTI R.; BONDUELLE, G. M.; DA SILVA, D. A. Wood quality of five Eucalyptus species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 30, n. 02, p. 175–181. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.26525/jtfs2018.30.2.175181>. Acesso em: 27 jul. 2020.

SOARES, A. A. V.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; SILVA, S. R.; LOURENÇO, H. M.; FORRESTER, D. I. Increasing stand structural heterogeneity reduces productivity in Brazilian Eucalyptus monoclonal stands. **Forest Ecology and Management**, v. 373, n. 01, p. 26–32. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.035>. Acesso em: 28 jul. 2020.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOFER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 03, p. 543-549. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>. Acesso em: 10 jul. 2020.

SOARES, V.C.; BIANCHI, M.L.; TRUGILHO, P.F.; HÖFER, J.; PEREIRA, A.J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, v. 21, n. 02, p. 191-197. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760201521021294>. Acesso em: 24 jul. 2020.

SOBRINHO, M. B. G. **Correlação entre as propriedades físicas do carvão vegetal de Eucalyptus sp., na produção de ferro silício**. 2016. 38 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2016.

TAPPI TECHNICAL DIVISIONS AND COMMITTEES. **TAPPI test methods**. Atlanta, 1998. 46 p.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996. v.1.

TAVARES, A. P. C.; SOARES, T. S.; CRUZ, E. S. Dendrometric characteristics and basic wood density of eucalyptus clones in different spacing. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 7, n. 3, p. 104-108. 2020.

TEIXEIRA, R. U. **Efeito da produtividade florestal e permeabilidade da madeira de eucalipto na velocidade de secagem**. 2015. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

TEIXEIRA, V. L. **Seleção de genótipos de eucalipto para produção de carvão vegetal utilizando análise multivariada e redes neurais** 2018. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

STATSOFT, INC. **Statistica** (data analysis software system), version 13. <http://www.statsoft.com>. 2018.

TORRES, C. M. M.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; JACOVINE, L. A. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; CARNEIRO, A. C. O.; TORRES, C. M. M. E. Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em Sistemas Agroflorestais. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 137-148. 2016. Disponível em: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n109.13](https://doi.org/10.18671/scifor.v44n109.13). Acesso em: 31 jul. 2020.

TONINI, H.; MORALES, M. M.; WRUSCK, F. J.; DELIBERALI, R. M. Growth and energy quality of eucalyptus wood in different crop-livestock-forest spatial arrangements. **FLORESTA**, v. 50, n. 4, p. 1707-1716. 2020. Disponível em: [10.5380/rf.v50i4.59650](https://doi.org/10.5380/rf.v50i4.59650). Acesso em: 30 ago. 2020.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, R. A. B.; ASSIS, M. R.; SIMETTI, R.; LOUREIRO, B. A. Variação radial e longitudinal do rendimento gravimétrico de carvão vegetal em clone de eucalipto. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 03, p. 2535-2541. 2019.

VARGAS-MORENO, J. M.; CALLEJÓN-FERRE, A. J.; PÉREZ-ALONSO, J.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 05, p. 3065-3083. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.054>. Acesso em: 10 jul. 2020.

VASSILEV, S.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L.; VASSILEVA, C. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 01, p. 913-933. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.050>. Acesso em: 28 jul. 2020.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

VIDAURRE, G.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v.18, n. 04, p. 469-480. 2011. Disponível em: [10.4322/floram.2011.066](https://doi.org/10.4322/floram.2011.066). Acesso em: 29 ago. 2020.

XIAO, M.; CHEN, W.; CAO, X.; CHEN, Y.; ZHAO, B.; JIANG, Z.; YUAN, T.; SUN, R. Unmasking the heterogeneity of carbohydrates in heartwood, sapwood, and bark of Eucalyptus. **Carbohydrate Polymers**, v. 238, n. 01, p. 1-9. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116212>. Acesso em: 08 jul. 2020.

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D.H., AND ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 01, p. 1781-1788. 2007. Disponível em: [10.1016/j.fuel.2006.12.013](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013). Acesso em: 09 jul. 2020.

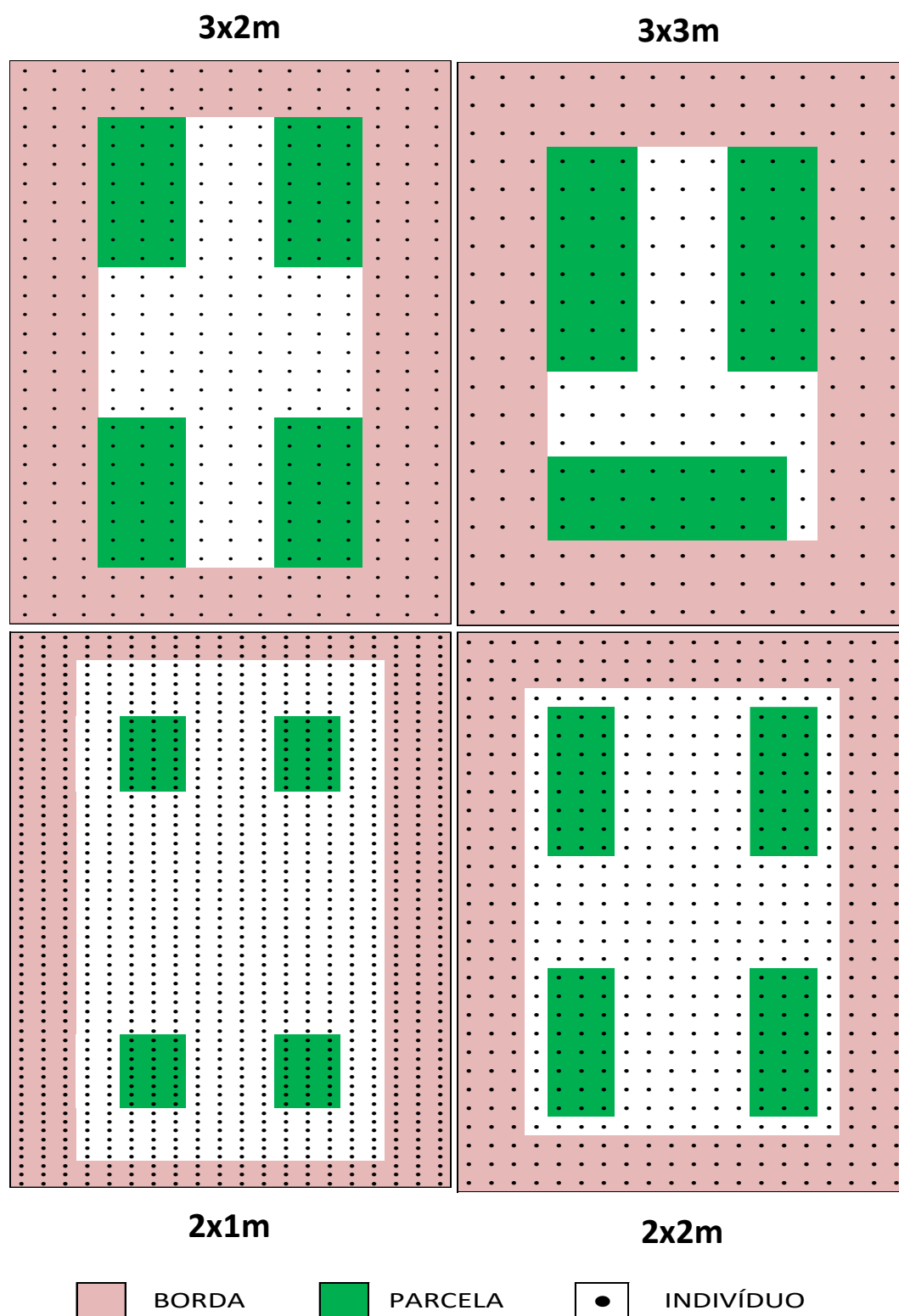
YU, J.; PATERSON, N.; BLAMEY, J.; MILLAN, M. Cellulose, xylan and lignin interactions during pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Fuel**, v. 191, n 01, p. 140-149. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.057>. Acesso em: 09 jul. 2020.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O espaçamento influenciou as características de crescimento e a viabilidade econômica, assim como as propriedades da madeira e do carvão vegetal. O espaçamento 3x2 m apresentou indicadores econômicos de produção, associados às características tecnológicas da madeira e do carvão vegetal, mais adequados. Os indicadores econômicos observados nesse espaçamento indicam viabilidade econômica da produção de madeira superiores quando comparados aos espaçamentos adensados (2x1 e 2x2 m), comumente adotados na região.

Os resultados observados reforçam o entendimento sobre a importância de análises mais criteriosas na escolha do espaçamento de plantio para a silvicultura do eucalipto de pequenos produtores da Zona da Mata mineira.

ANEXO A - Croqui representativo da área de estudo com o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG



ANEXO B – Análise econômica do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* para um horizonte de 120 meses, em diferentes espaçamentos, em Lamim-MG

Espaçamento (m)	Idade (meses)	Vol	Vn custo	Vn receita	VoCT (m ³ ha ⁻¹)	VoRT	VPL	VAE	CMP (R\$ m ⁻³)	B/C
2x1	0	3,04	13.260,00	152,39	13.260,00	152,39	-13.107,61		4.354,97	0,01
	12	11,35	15.540,80	568,05	14.389,63	525,97	-13.863,66	-14.972,75	1.369,27	0,04
	24	39,58	17.264,06	1.980,76	14.801,15	1.698,18	-13.102,97	-7.347,74	436,23	0,11
	36	113,17	19.125,19	5.664,02	15.182,19	4.496,28	-10.685,91	-4.146,49	169,00	0,30
	48	220,27	21.135,20	11.024,51	15.535,01	8.103,35	-7.431,66	-2.243,77	95,95	0,52
	60	292,71	23.306,02	14.649,95	15.861,69	9.970,51	-5.891,18	-1.475,48	79,62	0,63
	72	320,24	25.650,50	16.028,21	16.164,17	10.100,49	-6.063,68	-1.311,67	80,10	0,62
	84	328,32	28.182,54	16.432,45	16.444,24	9.588,18	-6.856,07	-1.316,86	85,84	0,58
	96	330,50	30.917,15	16.541,54	16.703,57	8.936,88	-7.766,69	-1.351,52	93,55	0,54
	108	331,07	33.870,52	16.570,30	16.943,69	8.289,28	-8.654,42	-1.385,40	102,30	0,49
	120	331,23	37.060,16	16.577,84	17.166,02	7.678,75	-9.487,28	-1.413,88	111,89	0,45
2x2	0	0,98	6.917,50	49,22	6.917,50	49,22	-6.868,28		7.033,45	0,01
	12	4,35	8.050,90	217,86	7.454,54	201,72	-7.252,82	-7.833,04	1.849,61	0,03
	24	18,75	9.174,97	938,59	7.866,06	804,69	-7.061,37	-3.959,80	489,25	0,10
	36	72,57	10.388,97	3.632,08	8.247,10	2.883,26	-5.363,84	-2.081,35	143,16	0,35
	48	203,42	11.700,09	10.181,24	8.599,91	7.483,52	-1.116,40	-337,06	57,52	0,87
	60	341,42	13.116,09	17.087,91	8.926,59	11.629,75	2.703,15	677,02	38,42	1,30
	72	402,64	14.645,38	20.152,28	9.229,07	12.699,36	3.470,28	750,68	36,37	1,38
	84	419,51	16.297,01	20.996,29	9.509,15	12.251,13	2.741,98	526,66	38,85	1,29
	96	423,48	18.080,77	21.195,27	9.768,48	11.451,14	1.682,66	292,81	42,70	1,17
	108	424,38	20.007,24	21.240,39	10.008,60	10.625,48	616,88	98,75	47,14	1,06
	120	424,59	22.087,81	21.250,53	10.230,93	9.843,11	-387,83	-57,80	52,02	0,96

ANEXO B – Cont.

3x2	0	1,29	4.878,64	64,39	4.878,64	64,39	-4.814,24		3.791,92	0,01
	12	5,45	6.312,31	272,67	5.844,73	252,47	-5.592,26	-6.039,64	1.158,67	0,04
	24	22,27	7.297,29	1.114,72	6.256,25	955,69	-5.300,56	-2.972,39	327,64	0,15
	36	79,90	8.361,07	3.999,10	6.637,29	3.174,61	-3.462,68	-1.343,63	104,64	0,48
	48	201,94	9.509,96	10.106,96	6.990,10	7.428,92	438,81	132,49	47,09	1,06
	60	313,91	10.750,76	15.711,24	7.316,78	10.692,81	3.376,03	845,55	34,25	1,46
	72	360,61	12.090,82	18.048,61	7.619,26	11.373,69	3.754,42	812,14	33,53	1,49
	84	373,59	13.538,08	18.698,29	7.899,34	10.910,27	3.010,93	578,32	36,24	1,38
	96	376,76	15.101,13	18.856,82	8.158,67	10.187,75	2.029,08	353,09	40,08	1,25
	108	377,51	16.789,22	18.894,23	8.398,79	9.451,82	1.053,03	168,57	44,47	1,13
	120	377,68	18.612,35	18.902,99	8.621,12	8.755,74	134,62	20,06	49,28	1,02
3x3	0	0,84	3.468,67	42,04	3.468,67	42,04	-3.426,63		4.129,78	0,01
	12	3,71	4.789,54	185,88	4.434,76	172,11	-4.262,65	-4.603,66	1.289,65	0,04
	24	15,95	5.652,70	798,26	4.846,28	684,38	-4.161,90	-2.333,86	354,42	0,14
	36	61,03	6.584,92	3.054,46	5.227,32	2.424,73	-2.802,59	-1.087,50	107,90	0,46
	48	166,60	7.591,71	8.338,38	5.580,13	6.128,96	548,82	165,70	45,57	1,10
	60	272,16	8.679,05	13.621,47	5.906,81	9.270,54	3.363,73	842,47	31,89	1,57
	72	317,22	9.853,37	15.876,81	6.209,29	10.005,08	3.795,79	821,09	31,06	1,61
	84	329,45	11.121,64	16.488,91	6.489,37	9.621,12	3.131,75	601,52	33,76	1,48
	96	332,32	12.491,37	16.632,68	6.748,70	8.986,12	2.237,42	389,34	37,59	1,33
	108	332,97	13.970,68	16.665,26	6.988,82	8.336,78	1.347,96	215,78	41,96	1,19
	120	333,12	15.568,34	16.672,58	7.211,15	7.722,63	511,48	76,23	46,74	1,07

Sendo: Vn custo = valor final do custo acumulado; Vn receita = valor final da receita; VoCT = valor atual do custo total; VoRT = valor atual da receita; VPL = valor presente líquido; VAE = valor anual equivalente; CMP = custo médio de produção e B/C = razão benefício custo.

ANEXO C – Tabela de custos médios e receitas do híbrido E. urophylla x E. grandis, em diferentes espaçamentos de plantio, em Lamim, MG

Especificação	Unidades	Espaçamento (m)							
		2x1		2x2		3x2		3x3	
		Qtde	Valor uni.	Qtde	Valor uni.	Qtde	Valor uni.	Qtde	Valor uni.
A - Insumos									
Mudas de eucalipto	un	5000	0,40	2500	0,40	1667	0,40	1112	0,40
Fosfato natural reativo	sc	20	48,00	10	48,00	6,7	48,00	4,5	48,00
Superfosfato Simples	sc	15	76,00	7,5	76,00	5	76,00	3,4	76,00
Adubo 20-00-20	sc	15	95,00	7,5	95,00	5	95,00	3,4	95,00
Cloreto de potássio	sc	30	125,00	15	125,00	10	125,00	6,7	125,00
Herbicida (glifosato)	l	5	20,00	5	20,00	5	20,00	5	20,00
Formicida	kg	2,5	18,00	2,5	18,00	2,5	18,00	2,5	18,00
B - Serviços									
Aplicação herbicida	dh	2	50,00	2	50,00	2	50,00	2	50,00
Abertura de covas	un	5000	0,28	2500	0,29	1667	0,29	1112	0,29
Plantio+adubação	un	5000	0,06	2500	0,06	1667	0,06	1112	0,06
Adubação cobertura	un	5000	0,13	2500	0,13	1667	0,13	1112	0,13
Capina	un	5000	0,24	2500	0,24	1667	0,24	1112	0,24
Roçada	dh	2	50,00	3	50,00	5	50,00	5	50,00
Aplicação formicida	dh	2	50,00	2	50,00	2	50,00	2	50,00
Total		R\$	13.260,00	R\$	6.917,50	R\$	4.878,64	R\$	3.468,67

*Qtde: quantidade; Valor Uni: valor unitário; un: unidade; sc: sacos; l: litros; dh: diária/homem;