

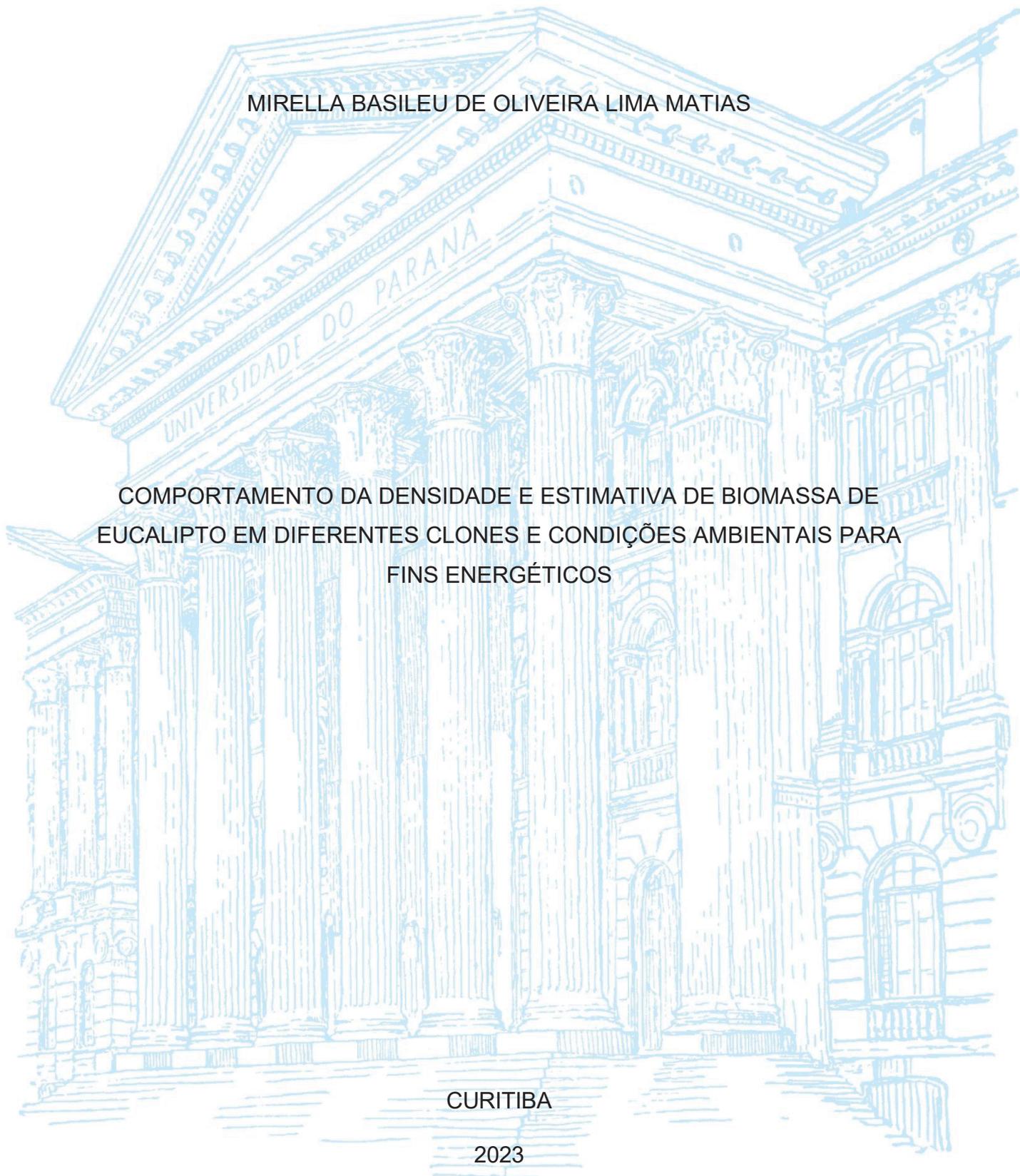
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MIRELLA BASILEU DE OLIVEIRA LIMA MATIAS

COMPORTAMENTO DA DENSIDADE E ESTIMATIVA DE BIOMASSA DE  
EUCALIPTO EM DIFERENTES CLONES E CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA  
FINS ENERGÉTICOS

CURITIBA

2023



MIRELLA BASILEU DE OLIVEIRA LIMA MATIAS

COMPORTAMENTO DA DENSIDADE E ESTIMATIVA DE BIOMASSA DE  
EUCALIPTO EM DIFERENTES CLONES E CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA  
FINS ENERGÉTICOS

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração de Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto

Coorientadores: Prof. Dr. Alexandre Behling e  
Prof. Dr. Mário Tommasiello Filho

CURITIBA

2023

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Matias, Mirella Basileu de Oliveira Lima

Comportamento da densidade e estimativa de biomassa de eucalipto em diferentes clones e condições ambientais para fins energéticos / Mirella Basileu de Oliveira Lima Matias. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto

Coorientadores: Prof. Dr. Alexandre Behling

Prof. Dr. Mário Tommasiello Filho

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 26/04/2023.

1. Biomassa florestal. 2. Biomassa florestal - Medição. 3. Eucalipto - Cultivo. 4. Florestas - Medição. I. Péllico Netto, Sylvio. II. Behling, Alexandre. III. Tommasiello Filho, Mário. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.548

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MIRELLA BASILEU DE OLIVEIRA LIMA MATIAS** intitulada: **COMPORTAMENTO DA DENSIDADE E ESTIMATIVA DE BIOMASSA DE EUCALIPTO EM DIFERENTES CLONES E CONDIÇÕES AMBIENTAIS, PARA FINS ENERGÉTICOS**, sob orientação do Prof. Dr. SYLVIO PÉLLICO NETTO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica  
18/10/2023 17:06:28.0  
SYLVIO PÉLLICO NETTO  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
28/04/2023 16:00:48.0  
EDER PEREIRA MIGUEL  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)

Assinatura Eletrônica  
18/10/2023 17:26:52.0  
FERNANDA TRISLTZ PERASSOLO GUEDES  
Avaliador Externo (SYLVAMO DO BRASIL LTDA)

Assinatura Eletrônica  
03/05/2023 09:51:45.0  
HENRIQUE SOARES KOEHLER  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
25/10/2023 10:03:10.0  
DIMAS AGOSTINHO DA SILVA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

A Deus,  
Aos meus pais Edson e Ivette,  
Ao meu marido Renan Augusto,  
Dedico

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e por me dar força para concluir mais uma etapa em minha vida.

Aos meus pais, Edson e Ivette, minhas inspirações de vida. Vocês batalharam muito para que eu pudesse ter a melhor educação possível desde os meus primeiros anos escolares. Me apoiaram financeiramente durante o primeiro ano sem bolsa de doutorado. E o principal, oraram por mim e me deram forças para concluir este trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da UFPR pela infraestrutura disponibilizada.

À CAPES pelo auxílio financeiro, que permitiram meu custeio e a condução desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Sylvio Péllico Netto pela orientação, conselhos e paciência durante toda essa jornada.

Ao Professor Dr. Alexandre Behling, que mesmo remotamente me deu vários e valiosos conselhos, não somente para o meu trabalho, mas lições para a vida. Agradeço imensamente pela amizade e paciência.

Ao Professor Dr. Mario Tommasiello Filho, pela disposição em ser meu coorientador e por ter me recebido de portas abertas do Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira (LAIM-ESALq).

À Empresa Vallourec pela concessão dos materiais e pelo poio financeiro nas análises laboratoriais.

Aos colaboradores Gustavo e Thalyta da empresa Vallourec, por todo apoio prestado.

A todos os colegas do LAIM-ESALq, pela recepção, momentos de conversas e convivência.

À Kalita, que me acolheu em Piracicaba por 2 meses em sua casa. Muito obrigada por ter me recebido tão bem e pela amizade.

À Fernanda Guedes, pela ajuda nas análises laboratoriais de Densitometria de Raios X, pelas conversas e trocas de experiências super proveitosas e significativas.

Aos membros da Banca: Professor Dr. Eder Miguel, Dra. Fernanda Guedes, Professor Dr. Henrique Koehler e Professor Dr. Dimas Agostinho.

A todos os meus colegas de laboratório, pela boa convivência e parceria.  
Ao Antônio, João e Maycon pela árdua ajuda na coleta de dados em campo.

Ao Rudson, João Paulo e Adri pela ajuda nas análises dos dados.

Aos meus amigos que fiz em Curitiba: Anna Cláudia, Maycon, Franciele, Linamara, Lisandra, Rudson, Cícero, Antônio, Chaiane, Gabriel Orso, Samuel, Jorge, Adri, Myrcia, Amanda.

Às meninas do “Apt 31”: Linamara, Amanda e Myrcia, pela parceria, risadas, conselhos, ajuda na adaptação à nova cidade, incentivo à vida fitness, pelo “kerfirzinho” todas as noites. Morar com vocês foi um imenso aprendizado para mim.

Ao meu marido Renan Augusto, pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis, pelo amor e paciência em tempos de ausência e pelas dicas e contribuições ao trabalho.

Aos meus sogros, Sandra e Luiz, que durante o período de pandemia, me ajudaram a manter a calma durante os tempos difíceis deste projeto.

À minha irmã Victória, pela ajuda na melhoria do trabalho e pelo apoio emocional.

“A natureza é o único livro que oferece um conteúdo valioso em todas as suas folhas.”

Johann Goethe

## RESUMO

As proporções de biomassa nos diferentes componentes variam entre espécies, fase de desenvolvimento e ambiente de crescimento, refletindo, assim, na sua alometria. As equações alométricas são amplamente utilizadas para estimar a biomassa e as principais variáveis utilizadas são DAP e altura, porém, na demanda por desenvolver equações genéricas com diferentes espécies em ambientes distintos, a densidade torna-se potencial variável a ser incorporada nos modelos. Entretanto, como a densidade da madeira apresenta uma variação inter- e intra-específica, dentro do mesmo indivíduo em função da altura ou da posição no raio, além de sofrer influência das condições ambientais, o objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento da densidade e seu efeito na estimativa de biomassa de eucalipto em diferentes clones e condições ambientais. Quatro clones híbridos de *Eucalyptus* spp. foram estudados, em idades de 97 a 110 meses, em duas regiões de Minas Gerais, Brasil. Árvores por material genético e região para determinar a biomassa aérea (fuste, galhos, casca e folhas) foram amostradas, bem como a densidade básica no sentido longitudinal e densidade aparente no sentido radial e longitudinal. O trabalho está estruturado em dois capítulos. No primeiro capítulo foram abordados os efeitos de clone e sítio nas variáveis dendrométricas (diâmetro, altura e volume do lenho) e densidade do lenho no sentido longitudinal e radial. Os objetivos deste trabalho foram fundamentados nas hipóteses de que: i) A variável densidade básica e as variáveis de crescimento (diâmetro, altura e volume do lenho) devem ser considerados conjuntamente para avaliação dos clones, sendo a densidade básica a variável de maior efeito na diferenciação dos clones; ii) Existe efeito de clone na variação da densidade básica no sentido longitudinal e densidade aparente no sentido radial; e iii) As variáveis meteorológicas em ambientes pouco contrastantes apresentam efeito nas médias e no comportamento da densidade básica ao longo do fuste e da densidade aparente no sentido radial para os clones *Eucalyptus* spp.. No segundo capítulo foi avaliado o efeito de densidade básica, sítios e material genético sobre a alometria de eucalipto, em que os estimadores dos componentes da biomassa aérea (lenho, casca, galhos e folhas) e total foram obtidos por diferentes técnicas de ajuste de equações: ajuste independente, ajuste simultâneo (NSUR) e ajuste simultâneo com pesos (WNSUR), e por diferentes metodologias relacionadas às variáveis preditoras: DAP e altura (Procedimento 1); DAP, altura e densidade básica (Procedimento 2); DAP, altura, densidade básica e variáveis *dummy* para região e clone (Procedimento 3). A hipótese formulada é: “A inclusão da covariável densidade básica integrada ao efeito do clone e região, por meio de variáveis *dummy* no sistema de equação de biomassa, apresentam melhor desempenho preditivo e eficiência dos estimadores em relação aos sistemas de equações com apenas variáveis alométricas”. As técnicas de ajuste simultâneo NSUR e WNSUR foram eficientes para desenvolver um sistema de equações de boa qualidade e precisão. A variável densidade melhora a qualidade preditiva em sistemas de equações genéricas de biomassa e incorpora o efeito de clone na alocação da biomassa. O efeito de sítio na alocação de biomassa do lenho ficou evidente, sendo de maior magnitude no clone C1. Observou-se efeito de clone nas médias de densidade e na variação no sentido radial e longitudinal. Observou-se menor efeito da região nas médias de densidade e na variação no sentido radial e

longitudinal, porém com diferenças no grau de associação genótipo x ambiente entre os clones.

Palavras-chave: Ajuste simultâneo; Equações alométricas; Variação radial; Variação longitudinal; Qualidade da madeira.

## ABSTRACT

The proportions of biomass in different components vary between species, stages of development, and growth environments, thus reflecting on their allometry. Allometric equations are widely used to estimate biomass, and the main variables used are DBH (diameter at breast height) and height. However, in the demand for developing generic equations with different species in distinct environments, density becomes a potential variable to be incorporated into the models. However, as wood density presents inter- and intra-specific variation, within the same individual as a function of height or position in the radius, in addition to being influenced by environmental conditions, the objective of this study was to evaluate the behavior of density and its effect on the estimate of *Eucalyptus* spp. biomass in different clones and environmental conditions. Four hybrid clones of *Eucalyptus* spp., aged between 97 and 110 months, were studied in two locations. Trees were sampled by genetic material and clone to determine the aerial biomass (stem, branches, bark, and leaves), the basic density in the longitudinal direction, and apparent density in the radial and longitudinal direction. The study is structured into two chapters, in which, in the first chapter, the effect of clone and site was approached concerning the dendrometric variables (diameter, height, and wood volume) and density of the wood in the longitudinal and radial directions. The objectives of this study were based on the hypotheses that: i) The basic density variable and the growth variables (diameter, height, and wood volume) must be considered together for the evaluation of the clones, with the basic density being the variable with the greatest effect in the differentiation of clones; ii) There is a clone effect in the variation of basic density in the longitudinal direction and apparent density in the radial direction; and iii) The environment influences the averages and the behavior of the basic density along the trunk and the behavior of apparent density in the radial direction. In the second chapter, the effect of basic density, sites, and genetic material on eucalyptus allometry was evaluated, where the estimates of the components of aerial biomass (wood, bark, branches, and leaves) and total biomass were obtained by different equation fitting techniques: independent adjustment, simultaneous adjustment (NSUR) and simultaneous adjustment with weights (WNSUR), by different methodologies related to the predictive variables: DBH and height (Procedure 1); DBH, height and basic density (Procedure 2); DBH, height, basic density and dummy variables for region and clone (Procedure 3). The formulated hypothesis is: "The inclusion of the basic density covariate integrated with the effect of clone and region, through dummy variables in the biomass equation system, presents better predictive performance and efficiency of the estimators in relation to systems of equations with only allometric variables". The simultaneous fitting techniques NSUR and WNSUR were efficient to develop a system of equations of good quality and accuracy. The density variable improves predictive quality in generic biomass equation systems and incorporates the clone effect on biomass allocation. Site effect was evidenced in biomass allocation of wood, being of greater magnitude in clone C1. A clone effect was observed in density means and radial and longitudinal variation. The

region had a smaller effect on density means and in radial and longitudinal variation, but with differences in the degree of genotype x environment association between clones.

Keywords: Allometric equations; Radial variation; Longitudinal variation; Simultaneous adjustment; Wood quality.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 2.1 – CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICAS DAS DUAS REGIÕES DO ESTADO DE MINAS GERAIS..... 31
- FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO SEQUENCIAL NAS REGIÕES 1 E 2. .... 32
- FIGURA 2.3 – OBTENÇÃO DOS PERFIS DE MICRODENSIDADE DO LENHO. (A) CORTE TRANSVERSAL DA AMOSTRA DE LENHO COM EQUIPAMENTO DE DUPLA-SERRA CIRCULAR PARALELA; (B, C) ACLIMATAÇÃO EM CÂMARA DE CLIMATIZAÇÃO E IRRADIAÇÃO DAS AMOSTRAS DO LENHO NO EQUIPAMENTO FAXITRON LX-60; (D, E) SEÇÃO TRANSVERSAL DO LENHO E RESPECTIVAS IMAGENS DIGITAIS..... 35
- FIGURA 2.4 – COMPARAÇÃO DE DOIS PERFIS DE VARIAÇÃO LONGITUDINAL DA DENSIDADE BÁSICA DO LENHO, SUBMETIDOS À (A) HIPÓTESE  $H_0^{(1)}$  -PARALELISMO; (B)  $H_0^{(2)}$  - COINCIDÊNCIA; (C) HIPÓTESE  $H_0^{(3)}$  -PARALELISMO NO EIXO DAS ABSCISSAS..... 39
- FIGURA 2.5 – COMBINAÇÕES DE GRUPOS DE ÁRVORES DE CLONES DE EUCALIPTOS E REGIÕES TESTADOS NA ANÁLISE MULTIVARIADA DE PERFIL. .... 40
- FIGURA 2.6 – ORGANIZAÇÃO DOS DADOS PARA A ELABORAÇÃO DO MAPA DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO. .... 42
- FIGURA 2.7 – DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS AMOSTRAIS UTILIZADOS PARA A ELABORAÇÃO DO MAPA DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO..... 43
- FIGURA 2.8 – (A) ÁRVORE DE CLONE DE EUCALIPTO COM A INDICAÇÃO DAS ALTURAS E DO DAP DO TRONCO; (B) SEÇÃO TRANSVERSAL DO LENHO NO DAP E DEMARCAÇÃO DE AMOSTRA RADIAL; (C,D,E) SEÇÃO RADIAL DO LENHO , IMAGEM DIGITAL OBTIDA POR RAIOS X E PERFIL RADIAL DA MICRODENSIDADE DO LENHO EVIDENCIANDO E DEMARCANDO OS ANÉIS DE CRESCIMENTO ANUAIS DO 1º AO 9º ANO DAS ÁRVORES. .... 44
- FIGURA 2.9 – DAP, ALTURA, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA DO LENHO DAS ÁRVORES DOS 4 CLONES DE EUCALIPTO NAS 2 REGIÕES DO ESTADO DE MG: GRÁFICO BOX PLOT E VIOLINO. .... 46
- FIGURA 2.10 – GRÁFICO DAS FUNÇÕES DISCRIMINANTES 1 E 3 SEPARADOS POR CLONES REFERENTES ÀS VARIÁVEIS DAP, ALTURA, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA. .... 49
- FIGURA 2.11 – GRÁFICO DAS FUNÇÕES DISCRIMINANTES 1 E 5 SEPARADAS POR CLONES DA VARIÁVEL DENSIDADE DO LENHO, NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO..... 51
- FIGURA 2.12 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS 4 CLONES DE EUCALIPTO NAS 2 REGIÕES DO ESTADO DE MG. (A) VARIAÇÃO LONGITUDINAL MÉDIA POR CLONE EM TODAS ALTURAS; (B) DENSIDADE BÁSICA MÉDIA DAS AMOSTRAS DO

	PRIMEIRO GRUPO PARA A ANÁLISE DE PERFIL; (C) DENSIDADE BÁSICA MÉDIA DAS AMOSTRAS DO SEGUNDO GRUPO PARA A ANÁLISE DE PERFIL.....	53
FIGURA 2.13 –	MAPA DE DENSIDADE E PERFIL DE MICRODENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C1 (A) E C2 (B) DE EUCALIPTO EM REGIÃO 1, MG. ....	58
FIGURA 2.14 –	MAPA DE DENSIDADE E PERFIL DE MICRODENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C3 (A) E C4 (B) DE EUCALIPTO na REGIÃO 1, MG. ....	59
FIGURA 2.15 –	MAPA DE DENSIDADE E PERFIL DE MICRODENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES; C1 (A) E C2 (B) DE EUCALIPTO NA REGIÃO 2, MG. ....	60
FIGURA 2.16 –	DENSIDADE APARENTE DO LENHO POR ANEL DE CRESCIMENTO ANUAL E LARGURA DO DAP DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO NA REGIÃO 1 e 2. ....	62
FIGURA 2.17 –	DENSIDADE APARENTE DO LENHO POR ANEL DE CRESCIMENTO ANUAL DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO E PRECIPITAÇÃO ANUAL NA REGIÕES 1 E 2, MG. ....	65
FIGURA 2.18 –	CORRELAÇÃO DE REDE ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS, LARGURA DOS ANÉIS ANUAIS E DENSIDADE DA MADEIRA EM <i>Eucalyptus</i> spp. CULTIVADOS NA REGIÃO 1 e 2. ....	66
FIGURA 3.1 –	PESAGEM DO COMPONENTE COPA (A); PESAGEM DO FUSTE (MADEIRA + CASCA) (B).....	78
FIGURA 3.2 –	AMOSTRAS DE GALHOS E FOLHAS (A); SUBAMOSTRA DE FOLHA (B); SUBAMOSTRA DE GALHO (C); AMOSTRAS DE DISCO DE LENHO E CASCA (D). ....	79
FIGURA 3.3 –	GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (r) DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO.....	84
FIGURA 3.4 –	GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS INDEPENDENTEMENTE E SIMULTANEAMENTE (NSUR E WNSUR) PARA OS COMPONENTES DE BIOMASSA E TOTAL, UTILIZANDO VARIÁVEIS DIÂMETRO E ALTURA COMO PREDITORAS. ....	87
FIGURA 3.5 –	GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS INDEPENDENTES E SIMULTANEAMENTE (NSUR E WNSUR) PARA OS COMPONENTES DE BIOMASSA E TOTAL, UTILIZANDO VARIÁVEIS DAP, ALTURA E DENSIDADE COMO PREDITORAS. ....	90
FIGURA 3.6 –	GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS INDEPENDENTEMENTE E SIMULTANEAMENTE (NSUR E WNSUR) PARA OS COMPONENTES DE BIOMASSA E TOTAL, UTILIZANDO	

VARIÁVEIS DAP, ALTURA, DENSIDADE E <i>DUMMY</i> COMO PREDITORAS.....	94
FIGURA 3.7 – PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DOS COMPONENTES NA BIOMASSA SECA POR CLONE E REGIÃO.....	95

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – RESUMOS DAS CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DOS LOCAIS DE CULTIVO DE CLONES DE <i>Eucalyptus spp.</i> ....	32
TABELA 2.2 – CARACTERIZAÇÃO DAS PLANTAÇÕES DE <i>Eucalyptus spp.</i> EM DUAS REGIÕES DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL. ....	33
TABELA 2.3 – GRUPOS E VARIÁVEIS UTILIZADAS NAS MANOVA E ANÁLISES DISCRIMINANTES. ....	38
TABELA 2.4 – DAP, ALTURA, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA E APARENTE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS 4 CLONES DE EUCALIPTO NAS 2 REGIÕES DO ESTADO DE MG. ....	46
TABELA 2.5 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA MULTIVARIADA PARA AS VARIÁVEIS DAP, ALTURA TOTAL, VOLUME E DENSIDADE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO ....	47
TABELA 2.6 – PORCENTAGEM DA VARIÂNCIA TOTAL EXPLICADA PELAS FUNÇÕES DISCRIMINANTES RELATIVAS AOS AUTOVALORES E COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO CANÔNICA. ....	48
TABELA 2.7 – PESOS DISCRIMINANTES DAS VARIÁVEIS DAP, ALTURA, VOLUME E DENSIDADE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO PARA AS TRÊS FUNÇÕES DISCRIMINANTES. ....	48
TABELA 2.8 – ANÁLISE DA VARIÂNCIA MULTIVARIADA PARA A DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO (0,15 A 85%). ....	50
TABELA 2.9 – PORCENTAGEM DA VARIÂNCIA TOTAL EXPLICADA PELAS FUNÇÕES DISCRIMINANTES RELATIVAS AOS AUTOVALORES E AOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO CANÔNICA PARA CADA FUNÇÃO DISCRIMINANTE. ....	50
TABELA 2.10 – CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS ORIGINAIS AVALIADAS E AS FUNÇÕES DISCRIMINANTES OBTIDAS PARA A DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO (0,15 A 85%). ....	50
TABELA 2.11 – ANÁLISE DO PERFIL DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DAS ÁRVORES DOS 4 CLONES DE EUCALIPTO NAS DUAS REGIÕES DO ESTADO DE MINAS GERAIS. ....	55
TABELA 3.1 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS, VOLUME E DOS COMPONENTES NA BIOMASSA SECA E TOTAL INDIVIDUAL. ....	83
TABELA 3.2 – EQUAÇÕES AJUSTADAS UTILIZANDO VARIÁVEIS PREDITORAS DIÂMETRO E ALTURA, ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO E TESTE DE WHITE PARA AJUSTE INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO NSUR E WNSUR. ....	86
TABELA 3.3 – EQUAÇÕES AJUSTADAS UTILIZANDO VARIÁVEIS PREDITORAS DIÂMETRO, ALTURA E DENSIDADE BÁSICA, ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO E TESTE DE WHITE PARA AJUSTE INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO NSUR E WNSUR. ....	89

TABELA 3.4 – EQUAÇÕES AJUSTADAS UTILIZANDO VARIÁVEIS PREDITORAS DIÂMETRO, ALTURA, DENSIDADE BÁSICA E DUMMY ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO E TESTE DE WHITE PARA AJUSTE INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO NSUR E WNSUR. ....	93
---	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>20</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	22
1.2 HIPÓTESES.....	22
1.3 REFERÊNCIAS .....	23
<b>2 VARIABILIDADE DA DENSIDADE NO SENTIDO RADIAL E LONGITUDINAL DE EUCALIPTO EM DIFERENTES AMBIENTES .....</b>	<b>26</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>26</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>27</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	28
2.1.1 OBJETIVOS .....	29
2.2 METODOLOGIA .....	30
2.2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS .....	30
2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PLANTAÇÕES FLORESTAIS E SELEÇÃO DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO .....	32
2.2.3 ANÁLISES LABORATORIAIS DO LENHO DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO.....	34
2.2.3.1 Avaliação da densidade básica do lenho.....	34
2.2.3.2 Perfil radial de micro densidade aparente do lenho .....	34
2.2.4 ANÁLISE DOS DADOS DENDROMÉTRICOS E DA QUALIDADE DO LENHO DAS ÁRVORES .....	35
2.2.4.1 Análise descritiva dos resultados .....	35
2.2.4.2 Manova e análise discriminante .....	36
2.2.4.3 Análise multivariada de perfil .....	38
2.2.4.4 Mapa de variação da densidade aparente do lenho no fuste das árvores .	41
2.2.4.5 Delimitação e mensuração dos anéis de crescimento e associação com variáveis meteorológicas .....	43
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
2.3.1 Dimensões e densidade do fuste das árvores dos clones híbridos de Eucalipto .....	45
2.3.2 Dimensões e densidade do lenho do fuste das árvores dos clones: análises MANOVA e discriminante.....	47
2.3.3 Densidade básica do lenho no sentido longitudinal do fuste das árvores .....	51
2.3.4 Mapa de densidade aparente e perfil de microdensidade do lenho do fuste das árvores.....	56
2.3.5 Densidade dos anéis de crescimento .....	61
2.3.6 Efeito de sítio na densidade no sentido radial .....	64
2.4 CONCLUSÕES .....	67
2.5 REFERÊNCIAS.....	68

<b>3 EFEITO DE DENSIDADE BÁSICA, SÍTIOS E MATERIAL GENÉTICO SOBRE A ALOMETRIA DE EUCALIPTO.....</b>	<b>73</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>73</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>74</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	75
3.2 OBJETIVO .....	77
3.3 METODOLOGIA .....	77
3.3.1 Coleta de dados.....	78
3.3.2 Ajuste da equação de biomassa.....	80
3. 4 RESULTADOS.....	83
3.4.1 Estatística descritiva.....	83
3.4.2 Procedimento 1- DAP e altura como variáveis de entrada .....	85
3.4.3 Procedimento 2- DAP, altura e densidade usadas como variáveis de entrada .....	88
3.4.4 Procedimento 3 - inclusão de variáveis <i>dummy</i> .....	91
3.4.5 Biomassa dos componentes e total .....	95
3.5 DISCUSSÃO .....	96
3.5.1 Técnicas de ajuste de equações de biomassa.....	96
3.5.2 Estimativas de cada componente da biomassa aérea .....	97
3.5.3 Efeito da densidade básica, sítio e clone na alometria de eucalipto .....	99
3.6. CONCLUSÕES .....	100
3.7 REFERÊNCIAS.....	101
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>106</b>
<b>5 REFERÊNCIAS GERAIS.....</b>	<b>107</b>
<b>6 APÊNDICE 1 – Mapas de densidade aparente .....</b>	<b>117</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A biomassa florestal é todo produto obtido de árvores, arbustos e outras plantas que crescem em florestas naturais e plantadas, podendo ser utilizada como fonte de energia renovável em substituição aos combustíveis fósseis, contribuindo, assim, para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, é necessário o incentivo ao cultivo de florestas plantadas, pois além de garantir o suprimento energético, reduz a pressão para desmatamento de florestas naturais, que são importantes para a manutenção da biodiversidade e para a regulação do clima.

Espécies do gênero *Eucalyptus* são largamente cultivadas no mundo e vêm ganhando destaque na produção de biomassa para bioenergia por apresentarem, de forma geral, altas taxas de crescimento, adaptabilidade às variadas condições de clima e solo, resistência às pragas e doenças, resposta ao manejo silvicultural e plasticidade genética (RECORD e HESS, 1949). No Brasil, as florestas de eucalipto são as mais produtivas do mundo, chegando a produção de  $38,9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$  em plantios de curta rotação (IBÁ, 2022).

A alometria da biomassa de indivíduos arbóreos é a relação entre o tamanho ou o crescimento dos diferentes componentes da árvore em relação à biomassa total. A alocação de biomassa em cada componente é influenciada por fatores como espécie, fase de desenvolvimento, estado nutricional, e condições edafoclimáticas (LARCHER, 1986). E no caso de florestas energéticas, o entendimento da alocação de biomassa é fundamental para maximizar a produção de madeira de qualidade e sustentável.

A obtenção de dados de biomassa acima do solo é classificada em métodos diretos e indiretos (BROWN, 1997; KOEHLER et al., 2002; SANQUETTA, 2002; SOMOGYI et al., 2007; SILVEIRA et al., 2008). Nos métodos diretos, a medição é feita diretamente na biomassa, quando são medidos e pesados os indivíduos arbóreos separadamente (método da árvore individual) ou todos os indivíduos em uma área pré-fixada (método da parcela). Em campo, os pesos verdes são aferidos separadamente para cada componente (tronco, casca, galhos e folhas) e efetuada a coleta de amostras para secagem em estufa até estabilização do peso, para a obtenção do peso seco (CARVALHO et al., 2022; TRAUTENMÜLLER et al., 2023), porém, este tipo de amostragem é

laborioso, de alto custo e demanda mão de obra especializada. Já os métodos indiretos visam estimar a biomassa e seus componentes por meio de fatores de biomassa ou, da forma mais comum, realizando ajuste de equações pelo uso de técnicas de regressão.

Para ajustar equações apropriadas e de boa qualidade para avaliação da biomassa, alguns pressupostos devem ser atendidos: i) aditividade dos estimadores, de forma que o somatório das estimativas dos componentes deva ser igual ao valor da estimativa da biomassa total (KOZAK, 1970; CUNIA; BRIGGS, 1984; REED; GREEN, 1984; BEHLING et al., 2018; TRAUTENMÜLLER et al., 2021); ii) correção da heteroscedasticidade da variância dos resíduos comumente observados na modelagem da biomassa (SAINT-ANDRÉ et al., 2005; BASUKI et al., 2009; BI et al., 2010; SANQUETTA et al., 2015; ZHAO et al., 2015); iii) bom desempenho nos estimadores de biomassa ; iv) maior eficiência estatística (ZELLNER, 1962; BEHLING et al., 2018).

As variáveis DAP, altura e associação de ambas são amplamente utilizadas nos estimadores de biomassa de eucalipto (ANTÓNIO et al., 2007; BI; TURNER; LAMBERT, 2004; ÁLVAREZ GONZÁLEZ et al., 2012; RUIZ-PEINADO GERTRUDIX; MONTERO; DEL RIO, 2012; BI et al., 2015; VEGA-NIEVA et al., 2015; HERNÁNDEZ-RAMOS et al., 2017; HIRIGOYEN et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021). Entretanto, como as empresas do setor trabalham com a condução de povoamentos de diversos clones e em diferentes sítios, equações genéricas são demandadas tanto pela praticidade de utilização, quanto pela redução do tamanho da amostragem.

A densidade básica da madeira é uma das variáveis alternativas mais utilizadas em equações de biomassa tanto por estar diretamente associada com a produção de biomassa (KUMAR et al., 2011), quanto por apresentar estreita correlação com material genético, devido alta herdabilidade genética (BINKLEY et al., 2017).

Entretanto, a densidade apresenta uma variação inter- e intraespecífica, dentro do mesmo indivíduo em função da altura ou da posição no raio, além de sofrer influência das condições ambientais (ZOBEL e JETT; 1995). Essa relação genótipo x ambiente resulta em diferentes expressões fenotípicas (ALMEIDA et al., 2023), que refletem na qualidade dos produtos energéticos e na produção de

biomassa (CAMPOE e BINKLEY, 2020). Portanto, estudos que avaliem o efeito do material genético x ambiente no comportamento da densidade da madeira são importantes para auxiliar gestores florestais na escolha de sítios, além da produtividade, mas considerando a qualidade do material.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento da densidade e o seu efeito na estimativa de biomassa de eucalipto em diferentes clones e condições ambientais.

## 1.2 HIPÓTESES

O objetivo geral deste trabalho foi fundamentado nas hipóteses de que:

- i) A variável densidade básica e as variáveis de crescimento (diâmetro, altura e volume do lenho) devem ser consideradas conjuntamente para avaliação dos clones, sendo a densidade básica a variável de maior efeito na diferenciação dos clones;
- ii) Existe efeito de clone na variação da densidade básica no sentido longitudinal e densidade aparente no sentido radial;
- iii) As variáveis meteorológicas de ambientes pouco contrastantes apresentam efeito nas médias e no comportamento da densidade básica ao longo do fuste e da densidade aparente no sentido radial para os clones *Eucalyptus* spp.
- iv) A inclusão da covariável densidade básica integrada ao efeito do clone e região, por meio de variáveis *dummy* no sistema de equação de biomassa, apresentam melhor desempenho preditivo e eficiência dos estimadores em relação aos sistemas de equações com apenas variáveis alométricas.

### 1.3 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. N. F.; VIDAURRE, G. B.; LOUZADA, J. L. P. C.; et al. Wood density variations of *E. urophylla* clone among growth sites are related to climate. **Canadian Journal of Forest Research**, 2023.

ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.; BALBOA MURIAS, M. Á.; MERINO GARCÍA, A.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R. Estimación de la biomasa arbórea de “*Eucalyptus globulus*” y “*Pinus pinaster*” en Galicia. **Recursos Rurais**, v. 1, p. 21–30, 2012.

ANTÓNIO, N.; TOMÉ, M.; TOMÉ, J.; SOARES, P.; FONTES, L. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 5, p. 895–906, 2007.

BASUKI, T. M.; VAN LAAKE, P. E.; SKIDMORE, A. K.; HUSSIN, Y. A. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 8, p. 1684–1694, 2009.

BEHLING, A.; NETTO, S. P.; SANQUETTA, C. R.; et al. Critical analyses when modeling tree biomass to ensure additivity of its components. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1759–1774, 2018.

BI, H.; LONG, Y.; TURNER, J.; et al. Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 12, p. 2301–2314, 2010.

BI, H.; MURPHY, S.; VOLKOVA, L.; et al. Additive biomass equations based on complete weighing of sample trees for open eucalypt forest species in south-eastern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 349, p. 106–121, 2015. Elsevier B.V.

BI, H.; TURNER, J.; LAMBERT, M. J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. **Trees - Structure and Function**, v. 18, n. 4, p. 467–479, 2004.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271–283, 2017.

BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO ed. 1997.

CAMPOE, O. C.; BINKLEY, D. Environmental and genetic influences on growth in *Eucalyptus* plantations: The TECHS special issue. **Forest Ecology and Management**, v. 476, p. 118464, 2020.

CARVALHO, R. R. de; TRAUTENMÜLLER, J. W.; KOHLER, S. V.; SERPE, E. L.; CORTE, A. P. D.; SILVA, D. A. da; FIGUEIREDO FILHO, A. Biomass modeling in a mixed plantation of *Pinus taeda* L. and *Pinus elliottii* Engelm. **Scientia Forestalis**, v. 50, p. e3894, 2022.

- CUNIA, T.; BRIGGS, R. D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, n. 3, p. 376–384, 1984.
- HERNÁNDEZ-RAMOS, J.; DE LOS SANTOS-POSADAS, H. M.; VALDEZ-LAZALDE, J. R.; et al. Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Agrociência**, v. 51, n. 8, p. 921–938, 2017.
- HIRIGOYEN, A.; RESQUIN, F.; NAVARRO CERRILLO, R.; FRANCO, J.; RACHID CASNATI, C. Stand biomass estimation methods for *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* in Uruguay. **Bosque (Valdivia)**, v. 42, n. 1, p. 53–66, 2021.
- IBÁ. **Anuário estatístico da IBA 2022: Ano base 2021**. Brasília, Brasil., 2022.
- KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: C. R. et al. (Eds.) SANQUETA (Org.); As florestas e o carbono. p.251–264, 2002. Curitiba.
- KOZAK, A. Methods for Ensuring Additivity of Biomass Components by Regression Analysis. **The Forestry Chronicle**, v. 46, n. 5, p. 402–405, 1970.
- KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid, *Acacia auriculaeformis* and Casuarina equisetifolia. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 3, p. 1339–1344, 2011.
- LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Paulo: EPU, 1986.
- OLIVEIRA, T. W. G. DE; RUBILAR, R.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BEHLING, A. Simultaneous estimation as an alternative to young eucalyptus aboveground biomass modeling in ecophysiological experiments. *Acta Scientiarum*. **Agronomy**, v. 43, p. e52126, 2021.
- TRAUTENMÜLLER, J. W.; PÉLLICO NETTO, S.; BALBINOT, R.; WATZLAWICK, L. F.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A. Regression estimators for aboveground biomass and its constituent parts of trees in native southern Brazilian forests. **Ecological Indicators**, v. 130, p. 108025, 2021.
- TRAUTENMULLER, J. W.; PÉLLICO NETTO, S.; BALBINOT, R.; DAVID, H. C.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R.; MALLMANN, A. A.; ENGEL, K.; BEHLING, A. Ratio estimators for aboveground biomass and its parts in subtropical forests of Brazil. **Ecological Indicators**, v. 154, p. 110530, 2023.
- RECORD, S. J.; HESS, R. W. **Timbers of the New Haven**. Yale University Press, 1949.
- REED, D. D.; GREEN, E. J. Compatible individual tree taper and volume ratio equations. **Forest Science**, v. 30, p. 977–990, 1984.
- RUIZ-PEINADO GERTRUDIX, R.; MONTERO, G.; DEL RIO, M. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. **Forest Systems**, v. 21, n. 1, p. 42, 2012.

SAINT-ANDRÉ, L.; M'BOU, A. T.; MABIALA, A.; et al. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo. **Forest Ecology and Management**, v. 205, n. 1–3, p. 199–214, 2005.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: C. R. SANQUETTA; L. F. WATZLAWICK; R. BALBINOT; M. A. B. ZILLOTTO; F. dos S. GOMES (Orgs.); **As florestas e o carbono**. Curitiba. p.119–140, 2002. Curitiba: Ed. dos Autores.

SANQUETTA, C. R.; PAULA, A.; CORTE, D.; et al. Probabilistic Modeling of Diameter Increment for *Pinus* sp. Stands over a Cycle of 28 years in Southern Brazil. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 9, n. July, p. 625–632, 2015.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, p. 185–206, 2008.

SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, E.; MÄKIPÄÄ, R.; et al. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. **European Journal of Forest Research**, v. 126, n. 2, p. 197–207, 2007.

VEGA-NIEVA, D. J.; VALERO, E.; PICOS, J.; JIMÉNEZ, E. Modeling the above and belowground biomass of planted and coppiced *Eucalyptus globulus* stands in NW Spain. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 7, p. 967–980, 2015.

ZELLNER, A. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. **Journal of the American Statistical Association**, v. 57, n. 298, p. 348–368, 1962.

ZHAO, D.; KANE, M.; MARKEWITZ, D.; TESKEY, R.; CLUTTER, M. Additive Tree Biomass Equations for Midrotation Loblolly Pine Plantations. **Forest Science**, v. 61, n. 4, p. 613–623, 2015.

ZOBEL, B J; JETT, J. B. **Genetics of wood production**. Berlin, 1995.

## 2 VARIABILIDADE DA DENSIDADE NO SENTIDO RADIAL E LONGITUDINAL DE EUCALIPTO EM DIFERENTES AMBIENTES

### RESUMO

A homogeneidade da densidade do lenho é uma característica almejada pelo setor florestal, e é o que impulsiona os estudos que visam compreender a variabilidade da densidade interespecífica em diferentes clones e ambientes. Portanto, o objetivo deste estudo é avaliar comparativamente as árvores de quatro clones híbridos de *Eucalyptus* spp. de 8-9 anos de idade implantados em duas regiões, concernentes às variáveis dendrométricas e densidade no sentido longitudinal e radial. Cinco árvores de cada clone e região foram colhidas e em sete posições base-topo determinadas as densidades básica e aparente da madeira. Também foram obtidos o DAP, altura e volume de cada indivíduo. Para identificar as diferenças entre clones quanto às variáveis dendrométricas e de densidade básica em diferentes posições do fuste, uma análise multivariada de variância foi efetuada. Com a finalidade de comparar a densidade no sentido longitudinal dos diferentes clones, foi utilizada a análise de perfil multivariada. Realizou-se a leitura por raios-X nas sete posições base-topo e no sentido medula-casca, e mapas de variação espacial foram elaborados. Para comparação do efeito de sítio e clone na densidade foram correlacionados dados meteorológicos com a densidade aparente média por anel de crescimento e a largura de cada anel biológico. A densidade deve ser considerada conjuntamente com as variáveis dendrométricas para avaliação dos clones. Observou-se efeito de clone na variação da densidade no sentido radial e longitudinal. Não foi verificada diferença estatística no comportamento e nas médias da densidade básica no sentido longitudinal do mesmo clone em diferentes ambientes. As variáveis meteorológicas anuais não apresentaram correlações significantes com a densidade anual do lenho, porém a densidade foi mais correlacionada com a largura do anel (variável de crescimento) e a idade com intensidade maior para o clone C2 do que para o C1.

Palavras-chave: Mapa de variação espacial, Condições meteorológicas, Qualidade da madeira, Interação genótipo-ambiente, Análise de perfil.

## ABSTRACT

The homogeneity of wood density is a desired feature by the forest sector, and it is what drives studies that aim to understand the variability of interspecific density in different clones and environments. Therefore, the objective of this study is to comparatively evaluate the trees of four *Eucalyptus* spp. hybrid clones, 8-9 years old, implanted in two regions, concerning dendrometric variables and density in the longitudinal and radial directions. Five trees of each clone and region were harvested, in seven base-top positions, and the basic and apparent wood densities were determined. DBH (diameter at breast height), height, and volume of each tree were also obtained. A multivariate analysis of variance was performed to identify differences between clones in terms of dendrometric and basic density variables at different stem positions. Multivariate profile analysis was used to compare the density in the longitudinal direction of the different clones. The X-rays were read at seven base-to-top positions, in the pith-bark direction, and maps of spatial variation were prepared. To compare the effect of site and clone on density, meteorological data were correlated with the average apparent density per growth ring and the width of each biological ring. Density must be considered together with dendrometric variables for clone evaluation. A clone effect was observed in the variation of density in the radial and longitudinal directions. There was no statistical difference in the behavior and averages of basic density in the longitudinal direction of the same clone in different environments. The annual meteorological variables did not present significant correlations with the annual density of the wood; however, the density was more correlated with the width of the ring (growth variable) and the age with greater intensity for clone C2 than C1.

Keywords: Map of spatial variation, Meteorological conditions, Wood quality, Genotype-environment interaction, Profile analysis.

## 2.1 INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* engloba espécies importantes para o fornecimento de matéria-prima para diversas finalidades industriais em função das características da madeira, sua adaptabilidade à diferentes condições edafoclimáticas, alta variabilidade genética, viabilizando os programas de melhoramento genético, facilidade de propagação vegetativa e a produção e plantio clonal de alta produtividade.

No Brasil, o gênero Eucalipto ocupa 75,8% da área de florestas plantadas (IBÁ, 2022) e o segmento de bioenergia ocupa posição de relevância e crescente demanda por produtos renováveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2022 (EPE, 2022), a lenha e o carvão vegetal oriundos de florestas nativas e plantadas são responsáveis por 8,9% da matriz energética brasileira. Visando uma produção de carvão para fins energéticos mais sustentável, o entendimento das características da madeira e como são impactadas pelo material genético e pelo clima é fundamental.

Em se tratando da qualidade de produtos energéticos, um importante índice para avaliação da qualidade da madeira é a densidade básica (FOELKEL et al., 1990), pois de forma simplista, pode ser resumida como sendo um somatório das demais características da madeira como a espessura de paredes celulares, teor de lignina, celulose e hemicelulose. Kumar et al. (2011) também relatam que a densidade básica da madeira está diretamente relacionada com a produção de energia, ou seja, quanto maior a densidade, maior a quantidade de energia estocada por unidade de volume na madeira. Entretanto, apesar de a metodologia para determinação da densidade básica ser relativamente simples, é complexo obter com precisão a sua variabilidade. A densidade básica da madeira apresenta uma variação inter- e intraespecífica, dentro do mesmo indivíduo em função da altura ou da posição no raio, além de sofrer influência das condições ambientais (ZOBEL e JETT; 1995).

A variação da densidade básica dentro do caule ocorre no sentido longitudinal e radial. Vidaurre et al. (2020) avaliaram vários trabalhos com as principais espécies de eucalipto plantadas no Brasil e concluíram que, no geral: o comportamento da densidade no sentido base-topo da árvore tem o maior valor na base, reduzindo até o DAP e seguindo aumentando ou diminuindo até à copa;

no sentido medula-casca ocorre um aumento nos valores de densidade, porém esse é o padrão mais comum, mas não é universal, então estudos discricionais em nível de espécie x ambiente são importantes para melhor entendimento dessas relações.

Essa complexidade intrínseca da madeira é que a torna importante para estudos que visem compreender a variabilidade da densidade da madeira a fim de selecionar espécies não somente com maiores valores médios de densidade, mas também materiais mais homogêneos, aumentando a sua eficiência na queima direta, nos rendimentos em carvão, no teor de carbono e em outras propriedades desejadas na sua utilização como termorreductor (SANTOS et al., 2012).

### 2.1.1 OBJETIVOS

Avaliar comparativamente as árvores de 4 clones híbridos de *Eucalyptus* spp. implantados em duas regiões do Estado de Minas Gerais, concernentes às variáveis dendrométricas (diâmetro, altura e volume do lenho) e densidade do lenho no sentido longitudinal e radial.

Os objetivos deste trabalho foram fundamentados nas hipóteses de que: i) A variável densidade básica e as variáveis de crescimento (diâmetro, altura e volume do lenho), devem ser considerados conjuntamente para avaliação dos clones, sendo a densidade básica a variável de maior efeito para a sua diferenciação; ii) Existe efeito de clone na variação da densidade básica no sentido longitudinal e densidade aparente no sentido radial; e iii) As variáveis meteorológicas de ambientes pouco contrastantes apresentam efeito nas médias e no comportamento da densidade básica ao longo do fuste e da densidade aparente no sentido radial para os clones de *Eucalyptus* spp.

## 2.2 METODOLOGIA

### 2.2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS

As áreas compreendendo as plantações florestais de eucaliptos encontram-se em duas regiões do Estado de Minas Gerais. A Região 1 está localizada no Norte do Estado e o relevo é classificado como Chapada do Rio Jequitinhonha, com altitude média de 866 m. À distância linear de 227,33 km no sentido Sul, encontra-se a Região 2, onde o relevo é do tipo Depressão do alto-médio Rio São Francisco em altitude de 753 m.

Para ambas as regiões o solo é classificado como Latossolo vermelho distrófico e o clima subtropical com inverno seco e verão quente classificado como Cwa por Köppen e Geigen (ÁLVARES et al., 2013).

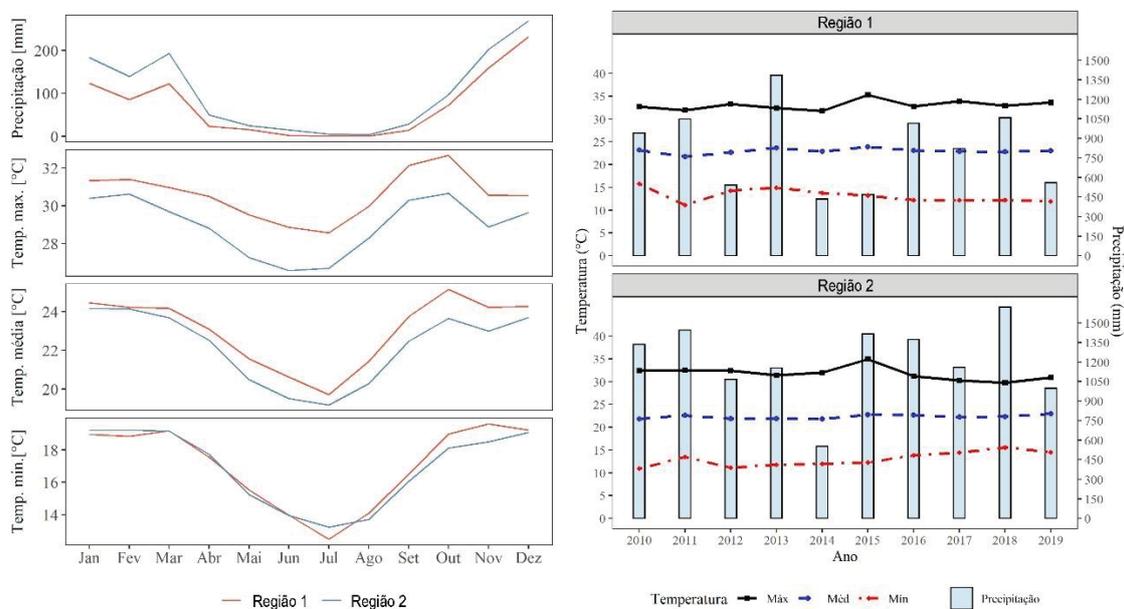
A temperatura das áreas experimentais, no período de 2010-2019, indica baixa variabilidade da amplitude térmica mensal, porém a máxima mensal é ligeiramente mais alta na Região 1 (FIGURA 2.1). O mês de julho é o mais frio, com a temperatura mínima média de 16,28 °C, oscilando durante o dia, com a média máxima de 30,3 °C. O mês de setembro é o mais quente, com média de 28 °C e máxima de 35,95 °C. Na região, as oscilações de temperatura caracterizam o verão e o inverno, apesar de uma baixa variabilidade da amplitude térmica mensal.

O regime de chuva mensal médio em ambas as regiões é fortemente marcado por um período chuvoso, presente entre os meses de novembro a março e um período de estiagem (seca) observado entre o período de maio a setembro, já os meses abril e outubro são períodos entre estas duas estações marcantes na região. Novembro é o mês que apresentou maior precipitação, tanto para Região 1 (231,43 mm), quanto para a Região 2 (268,88 mm). O mês mais seco para a Região 1 foi em julho (0,55 mm), e para Região 2 ocorreu em agosto (4,11 mm).

A diferença mais evidenciada nas duas regiões é o volume de chuva, em que na Região 2 chove anualmente em média 1.212,16 mm e na Região 1 851,21 mm, correspondendo a 29,77% de diferença no aporte de água entre as duas regiões. Esta diferença considerável deu-se devido nos anos 2012, 2014, 2015 e 2019, na Região 1, ter chovido abaixo de 600 mm. Os valores de

temperatura e de precipitação – no período entre 2010 e 2019 – foram obtidos das estações meteorológicas do INMET de Juramento para a Região 1 e de Sete Lagoas e de Belo Horizonte para a Região 2.

FIGURA 2.1 – CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICAS DAS DUAS REGIÕES DO ESTADO DE MINAS GERAIS.

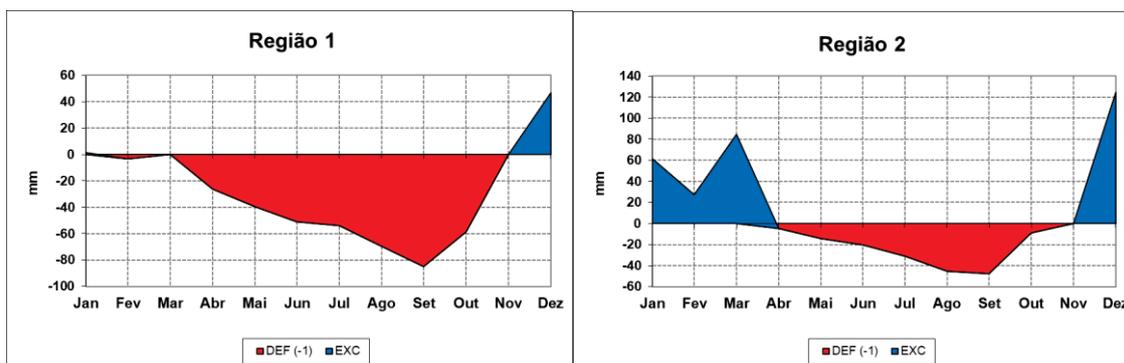


FONTE: O autor (2023).

Os balanços hídricos climatológicos sequenciais (BHC) em escala mensal para as duas regiões foi obtido pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) e modificado por Camargo (1971) estão apresentados na FIGURA 2.2. Os valores utilizados da capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) foi 150 mm (GALVÃO et al., 2018) na Região 2 e 100 mm na Região 1.

Na Região 2 ocorreu um acúmulo de deficiência de água (DEF) no solo durante seis meses, com total de 163,7 mm entre abril e novembro, e excedente hídrico (EXC) entre os meses de dezembro a março, totalizando 298,1 mm. Já na Região 1 o déficit hídrico ocorreu entre os meses de fevereiro a novembro, com total de 387,1 mm, 57,71% maior que o observado na Região 2, resultando em uma menor disponibilidade hídrica para as culturas florestais de eucalipto. Os resumos das características edafoclimáticas dos ambientes estudados estão apresentados na TABELA 2.1.

FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO SEQUENCIAL NAS REGIÕES 1 E 2.



FONTE: O autor (2023).

Em que: DEF é o déficit hídrico mensal (mm) e EXC é o excedente hídrico mensal.

TABELA 2.1 – RESUMOS DAS CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS DOS LOCAIS DE CULTIVO DE CLONES DE *Eucalyptus spp.*

	Região 1	Região 2
<b>Solo</b>	Latossolo Vermelho	Latossolo Vermelho
<b>Altitude (m)</b>	866	753
<b>PP anual (mm)</b>	851,21	1212,16
<b>Tmáx. (°C)</b>	30,58	28,98
<b>Tméd. (°C)</b>	23,05	22,23
<b>Tmin. (°C)</b>	17,08	16,94
<b>INMET- estação</b>	Juramento (83452)	Sete Lagoas (A569) e Belo Horizonte (A447)
<b>CAD (mm)</b>	100	150

FONTE: O autor (2023).

Em que: PP é a precipitação anual média (mm); Tmáx é a temperatura máxima média (°C); Tméd é a temperatura média (°C); Tmin é a temperatura mínima média (°C); CAD é a capacidade de armazenamento de água (mm).

## 2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PLANTAÇÕES FLORESTAIS E SELEÇÃO DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO

Os plantios híbridos clonais de *Eucalyptus spp.* nas duas regiões, compreendem 4 clones (C1, C2, C3, C4), em idades de 97 a 110 meses e espaçamentos de 3,0 m x 2,80 m e 3,10 m x 2,40 m (TABELA 2.2). Os clones C1 e C2 são os materiais comuns em ambas as regiões.

TABELA 2.2 – CARACTERIZAÇÃO DAS PLANTAÇÕES DE *Eucalyptus* spp. EM DUAS REGIÕES DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL.

Região (Nome)	Clone (No)	Árvores (No)	Idade (meses)	Espaçamento (m)
Região 1	C1	5	97,05	3,00 x 2,80
Região 1	C2	5	109,74	3,00 x 2,80
Região 1	C3	5	96,95	3,00 x 2,80
Região 1	C4	5	102,38	3,00 x 2,80
Região 2	C1	5	97,41	3,10 x 2,40
Região 2	C2	5	109,41	3,10 x 2,40

FONTE: O autor (2023).

Em cada região e clone foram selecionados 5 indivíduos com base na distribuição diamétrica do tronco, utilizando como fonte de dados um inventário contínuo, totalizando 30 árvores. As árvores de eucalipto foram cortadas e tiveram as variáveis diâmetro à altura do peito (DAP), altura total e comercial mensuradas, para posterior efetuação da cubagem rigorosa pelo método de Hohenadl. A altura comercial do fuste foi definida até o diâmetro mínimo de 4 cm do tronco, devido esta ser uma medida adotada na região.

Na cubagem rigorosa, o comprimento dos toretes do lenho foi medido a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% da altura total da árvore. Os diâmetros dos toretes do fuste foram mensurados no DAP (diâmetro a 1,30 m em relação ao solo) e nas posições (base, 5%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 95%) da altura total. O volume total do fuste da árvore foi calculado pelo método de Huber (Eq. 2.1).

$$v = \sum g_i l_i + \frac{1}{3} \frac{(g_{85\%} + g_{95\%})}{2} l_p \quad \text{Eq. 2.1}$$

Em que:  $v$  volume total (m<sup>3</sup>);  $g_i$  área seccional tomada no meio do torete (m<sup>2</sup>), na  $i$ -ésima posição;  $l_i$  é o comprimento da secção (m), na  $i$ -ésima posição;  $l_p$  é o comprimento da última secção (m).

Para as análises laboratoriais foram cortados 2 discos do lenho com 10 cm de espessura na base a 0,15 m; 0,7 m; 1,3 m (DAP), 30%, 50%, 70% e 85% da altura total do fuste de cada árvore (CALEGARIO et al., 2017), correspondendo a 14 discos por árvore, totalizando 420 amostras do lenho em 30 árvores. Os discos tiveram seus diâmetros e espessuras de casca mensurados, etiquetados e embalados em sacos de estopa para prevenir a infestação por fungos.

## 2.2.3 ANÁLISES LABORATORIAIS DO LENHO DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO

### 2.2.3.1 Avaliação da densidade básica do lenho

Um disco do lenho de cada altura foi utilizado para determinar a densidade básica. Os discos foram cortados em 4 partes iguais e diametralmente opostas. Duas partes diametralmente opostas de cada disco foram utilizadas para a determinação da densidade básica do lenho pela metodologia proposta na NBR 11941 (ABNT, 2003). A densidade básica média do fuste de cada árvore foi obtida pela ponderação do valor da densidade do lenho e do volume de cada torete e o total:

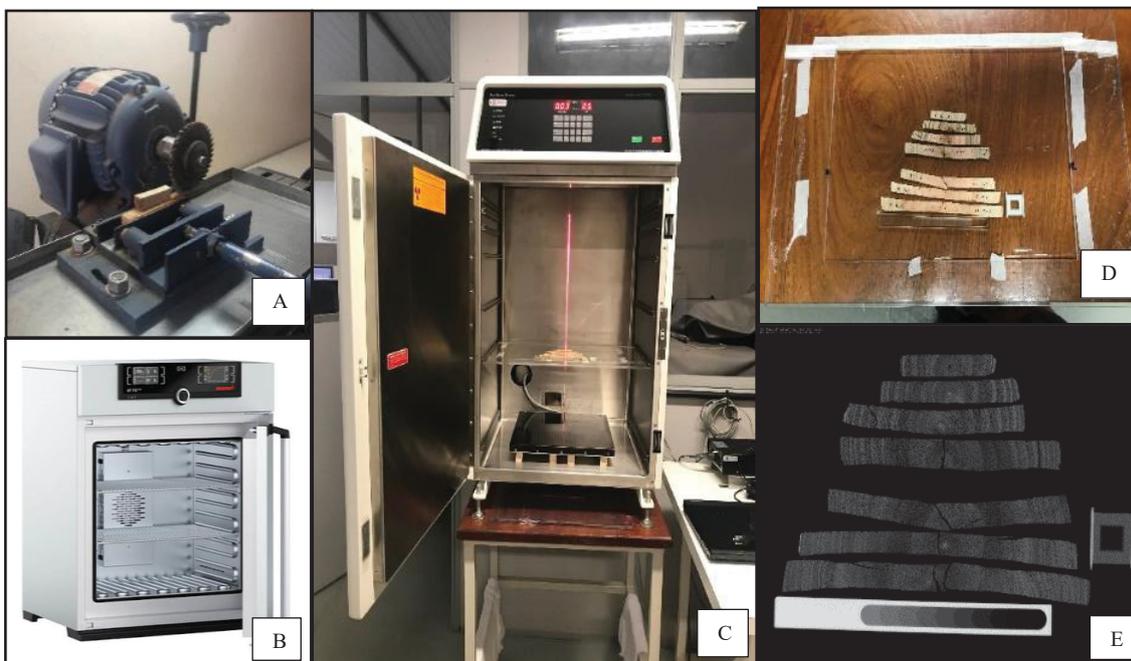
$$\rho_{pond} = \frac{\frac{\rho_{0,15} + \rho_{0,7}}{2} v_1 + \frac{\rho_{0,7} + \rho_{dap}}{2} v_2 + \dots + \frac{\rho_i + \rho_{i+1}}{2} v_i + \rho_{85} v_p}{V_s} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Em que:  $\rho_{pond}$  é a massa específica básica média ponderada em função do volume da árvore ( $\text{g.cm}^{-3}$ );  $v_1, v_2, v_i$  é o volume sem casca do torete correspondente às duas posições sucessivas ( $\text{m}^3$ );  $v_p$  é o volume da ponta sem casca ( $\text{m}^3$ );  $v_s$  é o volume total sem casca da árvore ( $\text{m}^3$ ).

### 2.2.3.2 Perfil radial de micro densidade aparente do lenho

Na seção transversal de cada um dos discos restantes, em cada altura do fuste, foram retirados corpos de prova diametraes de 10 mm de largura e 2 mm de espessura. Essas amostras foram acondicionadas em câmara de climatização com temperatura de 20 °C e umidade relativa de 60% UR até atingirem 12% de umidade, conforme Tomazello Filho (2008). As amostras do lenho foram escaneadas em câmara de irradiação do equipamento de raios X (Faxitron LX-60) obtendo-se as imagens digitais radiográficas. Essas imagens foram analisadas com o *software* Windendro® (Régent Instruments Inc.) para obtenção do perfil de micro densidade, com medições a cada 0,4 mm (FIGURA 2.3-A-E).

FIGURA 2.3 – OBTENÇÃO DOS PERFIS DE MICRODENSIDADE DO LENHO. (A) CORTE TRANSVERSAL DA AMOSTRA DE LENHO COM EQUIPAMENTO DE DUPLA-SERRA CIRCULAR PARALELA; (B, C) ACLIMATAÇÃO EM CÂMARA DE CLIMATIZAÇÃO E IRRADIAÇÃO DAS AMOSTRAS DO LENHO NO EQUIPAMENTO FAXITRON LX-60; (D, E) SEÇÃO TRANSVERSAL DO LENHO E RESPECTIVAS IMAGENS DIGITAIS.



FONTE: O autor (2023).

## 2.2.4 ANÁLISE DOS DADOS DENDROMÉTRICOS E DA QUALIDADE DO LENHO DAS ÁRVORES

### 2.2.4.1 Análise descritiva dos resultados

A análise inicial compreendeu a aplicação da estatística descritiva das variáveis dendrométricas (DAP, altura total e volume individual do tronco) e da qualidade do lenho (densidade básica e aparente do lenho) das árvores de cada clone dos híbridos de eucaliptos dos povoamentos das duas regiões, visando a obtenção dos valores médios dos parâmetros e desvio padrão. Também, foram elaborados gráficos Box Plot - os quais expressam graficamente as variáveis de interesse, como locação (mediana/quartis), dispersão (variabilidade), grau de assimetria, presença de valores extremos/discrepantes (outliers) - e de gráfico violino - os quais geram uma curva de distribuição proveniente da função densidade de probabilidade estimada via kernel, enfatizando a distribuição dos dados - (BUSSAB e MORETTIN, 2010).

#### 2.2.4.2 Manova e análise discriminante

Os dados relacionados às variáveis dendrométricas e de densidade básica em diferentes posições do fuste foram submetidos à análise multivariada de variância (MANOVA), para identificar e avaliar as diferenças entre os clones. A MANOVA é a extensão da ANOVA, ou seja, busca-se testar se existe diferença entre as populações usando-se duas ou mais variáveis de forma simultânea. Para a avaliação da significância estatística foram aplicados 4 testes multivariados sendo: critério de Pillai (PILLAI, 1955), lambda de Wilks (WILKS, 1932), traço de Hotelling (HOTELLING, 1938; 1951) e maior raiz de Roy (ROY, 1953). A hipótese de nulidade para todos os testes é a não diferença das médias das variáveis para cada clone testado a um nível de significância  $\alpha > 0,05$ .

Dada uma diferença estatística significativa entre os clones indicada pela MANOVA, procurou-se entender o quão diferente ou semelhante os clones estavam entre si, e quais variáveis melhor separam essas populações. Dessa forma, foi realizada a análise discriminante múltipla (MDA), uma técnica que distingue grupos ou populações por meio de uma(as) função(ões) discriminante(es), que são combinações lineares que resultam em um valor escore Z discriminante, um valor máximo para separar as populações (clones). O número de funções discriminantes é dado pelo menor número entre: (número de variáveis independentes e o número de populações -1) (FÁVERO et al., 2009; HAIR Jr. et al., 2009).

A função discriminante é obtida pelo somatório de duas ou mais variáveis (X) independentes multiplicadas por um peso discriminante (W), que é a razão entre a variância entre os grupos e a variância dentro dos grupos (Eq. 2.3).

$$Z_{jk} = a + W_1 X_{1k} + W_2 X_{2k} + \dots + W_i X_{ik} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Em que:  $Z_{jk}$  é o escore Z discriminante da função discriminante j para o grupo (clone) k; a é o intercepto;  $W_i$  é o peso discriminante para a variável i;  $X_{ik}$  é a variável independente i para o grupo (clone) k.

Os *outputs* gerados pela MDA são os autovalores (*eigenvalues*), correlação canônica, lambda de Wilks, e o Qui-quadrado. Os autovalores indicam o grau de afastamento ou distanciamento entre grupos, ou seja, quanto mais afastado de 1, maior é a variação entre os grupos explicada pela função discriminante (PESTANA e GAGEIRO, 2003).

Sua medida em percentual da primeira função discriminante é dada pela Eq. 2.4:

$$\text{Variância } \%_1 = \frac{\text{autovalor}_1}{\sum \text{autovalor}_j} * 100 \quad \text{Eq. 2.4}$$

Em que: j é a função discriminante.

As correlações canônicas medem o grau de associação entres os escores Z discriminantes e os clones (grupos), sendo dada pela expressão:

$$\text{CANCOR} = \sqrt{\frac{SQ_{eg}}{SQT}} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Em que: CANCOR é a correlação canônica;  $SQ_{eg}$  é a soma dos quadrados entre os grupos; SQT é a soma de quadrados total.

O lambda de Wilks, obtido para cada função discriminante linear de Fisher, varia de 0 a 1 e quanto mais próximo este estiver de 0, melhor é a capacidade da função discriminante separar os grupos. Para g grupos, há g-1 funções discriminantes, sendo que a primeira função discrimina o primeiro grupo dos demais, a segunda função discrimina o segundo grupo dos demais, porém, não considerando o primeiro grupo e assim por diante.

Para avaliar a significância global de todas as funções discriminantes, o lambda de Wilks foi transformado em uma distribuição do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com p.(g-1) graus de liberdade (Eq. 2.6) (SHARMA, 1996):

$$\chi^2 = - \left[ n - \frac{(p+g)}{2} - 1 \right] \cdot \ln(\Lambda_k) \quad \text{Eq. 2.6}$$

Em que: n é o número de observações; p é o número de variáveis explicativas; g é o número de grupos (clones);  $\Lambda_k$  é o valor de lambda de Wilks da função discriminante K.

Na MDA, as variáveis explicativas foram subdivididas em dois conjuntos, o primeiro refere-se às variáveis dendrométricas e densidade básica média e o segundo à densidade básica ao longo do fuste (TABELA 2.3). No primeiro grupo, buscou-se avaliar quais variáveis são mais importantes para a discriminação dos clones, pois essas são mais usuais nos inventários contínuos e/ou em seleção de clones. No segundo grupo buscou-se investigar em qual porção do fuste há diferenciação dos clones em relação à densidade básica.

TABELA 2.3 – GRUPOS E VARIÁVEIS UTILIZADAS NA MANOVA E NAS ANÁLISES DISCRIMINANTES.

Grupo	Conjunto 1	Conjunto 2
Grupo 1: Clone de C1 Região 1	DAP (cm), Altura total (m), Volume individual (m <sup>3</sup> ) e Densidade básica média (g.cm <sup>-3</sup> )	Densidade básica (g.cm <sup>-3</sup> ): 0,15 m, 0,7 m, DAP, 30%, 50%, 70% e 85%
Grupo 2: Clone de C2 Região 1		
Grupo 3: Clone de C3 Região 1		
Grupo 4: Clone de C4 Região 1		
Grupo 5: Clone de C1 Região 2		
Grupo 6: Clone de C2 Região 2		

FONTE: O autor (2023).

#### 2.2.4.3 Análise multivariada de perfil

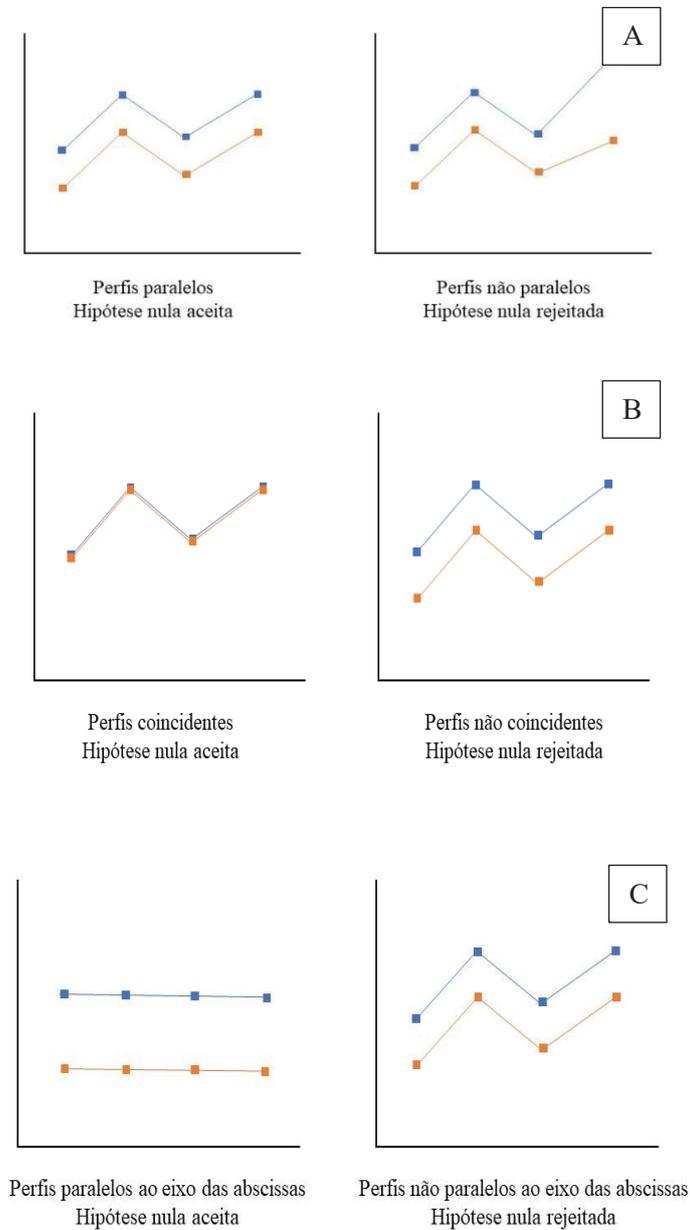
Os dados de densidade básica do lenho tomados em diferentes alturas (sentido base-ápice) são caracterizados como dados longitudinais, expressando a sua distribuição/variação no fuste em relação à posição no espaço. Cada conjunto de variáveis resposta é definido como perfil individual de resposta e o perfil médio das variáveis resposta é a média dos perfis individuais das árvores pertencentes ao mesmo clone e região (mesmos grupos). Para testar a diferença entre os perfis de média da densidade básica do lenho no sentido longitudinal/alturas do fuste (tratamentos) para os clones das árvores de eucalipto em diferentes regiões, utilizou-se a Análise Multivariada de Perfil. Esta análise é uma técnica estatística para avaliar par-a-par as médias de densidade do lenho em diferentes alturas do fuste das árvores, simultaneamente, testando três hipóteses (RENCHER, 2002):

$H_0^{(1)}$  - Os perfis médios de resposta correspondentes a diferentes alturas do fuste são **paralelos**. Não existe interação entre clone/região e posição longitudinal do fuste (FIGURA 2.4-A).

$H_0^{(2)}$  - Os perfis médios de resposta correspondentes a diferentes alturas do fuste são **coincidentes**. Não existe efeito do comportamento de clones/regiões (FIGURA 2.4-B).

$H_0^{(3)}$  - Os perfis médios de resposta correspondentes a diferentes alturas do fuste são **paralelos ao eixo das abscissas**. Não existe efeito da posição longitudinal do fuste (FIGURA 2.4-C).

FIGURA 2.4 – COMPARAÇÃO DE DOIS PERFIS DE VARIAÇÃO LONGITUDINAL DA DENSIDADE BÁSICA DO LENHO, SUBMETIDOS À (A) HIPÓTESE  $H_0^{(1)}$  – PARALELISMO; (B)  $H_0^{(2)}$  –COINCIDÊNCIA; (C) HIPÓTESE  $H_0^{(3)}$  -PARALELISMO NO EIXO DAS ABCISSAS.



FONTE: (RENCHE, 2002).

Segundo Rencher (2002), o valor calculado para testar as hipóteses  $H_0^{(1)}$  e  $H_0^{(3)}$  foi comparado com o valor tabelado de  $T^2$  de Hotelling ao nível de 0,05 de significância (Eq. 2.7). Para testar  $H_0^{(2)}$  utilizou-se o valor tabelado da distribuição t ao nível de 0,05 de significância (Eq. 2.8).

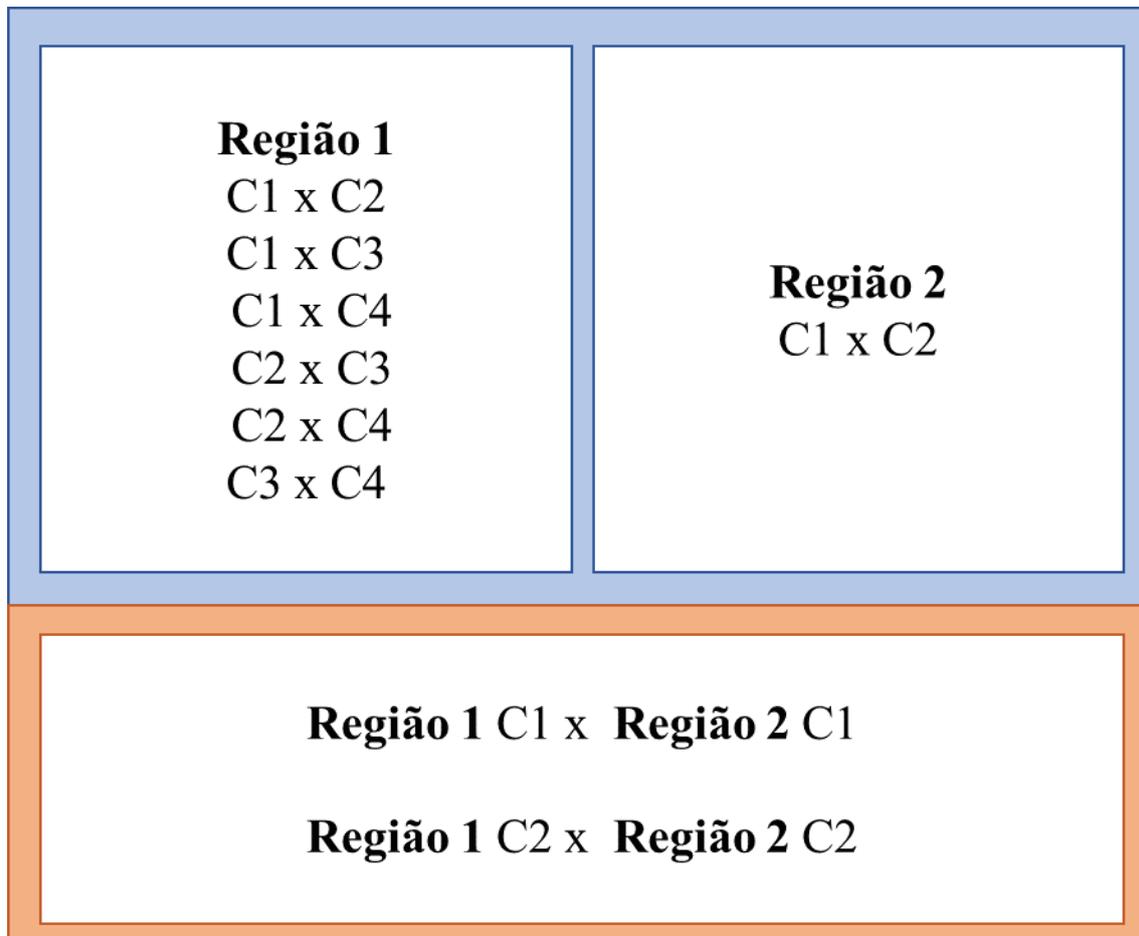
Para a análise de perfil, considerou-se o valor da densidade básica do lenho na posição longitudinal do fuste em 2 grupos: (i) densidade básica do lenho a 0,15 m, 0,70 m e 1,30 m (DAP) do tronco; (ii) densidade básica do lenho a 30%, 50%, 70% e 85% do tronco. Os pares de perfis testados estão apresentados na FIGURA 2.5, sendo o *software* Matlab (MATrix LABoratory) utilizado para o processamento.

$$T_{p-1, n_1+n_2-2}^2 \quad \text{Eq. 2.7}$$

$$|t| = t_{\alpha/2; n_1+n_2-2} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Em que: p é o número de medidas tomadas em diferentes alturas (tratamentos);  $n_1$  é o número de observações do grupo 1 (clone/região);  $n_2$  é o número de observações do grupo 2 (clone/região).

FIGURA 2.5 – COMBINAÇÕES DE GRUPOS DE ÁRVORES DE CLONES DE EUCALIPTOS E REGIÕES TESTADOS NA ANÁLISE MULTIVARIADA DE PERFIL.



FONTE: O autor (2023).

#### 2.2.4.4 Mapa de variação da densidade aparente do lenho no fuste das árvores

Estudos envolvendo amostragem da densidade em diferentes alturas e distâncias da medula permitem conhecer a variação dessa propriedade da madeira dentro de uma árvore e podem ser mais bem visualizados e descritos na forma de mapas de variação da densidade da madeira. Para o desenvolvimento desses mapas utiliza-se algoritmos de interpolação de dados e a natureza do algoritmo selecionado determinará sua interpretação e validação, porém, para processar esses dados em um dos *softwares* de geoprocessamento, por exemplo o ArcGIS (ESRI, 2010), será necessária a espacialização dos valores de densidade básica do lenho em um sistema de coordenadas.

O banco de dados dispõe de pontos de altura (y) e diâmetro do fuste (x) em metros e centímetros, respectivamente. No sistema de coordenadas UTM, o globo terrestre foi fracionado em 60 fusos e, cada um, com limite de 10.000.000 m iniciado na linha do equador, sendo que ao sul subtrai-se a distância de 10.000.000 e ao norte inicia-se em 0 até 10.000.000 m. A linha central que divide o fuso verticalmente inicia-se com o valor de 500.000 m, sendo que à direita soma-se 500.000 à distância percorrida em metros, já à esquerda subtrai-se 500.000 a distância percorrida em metros

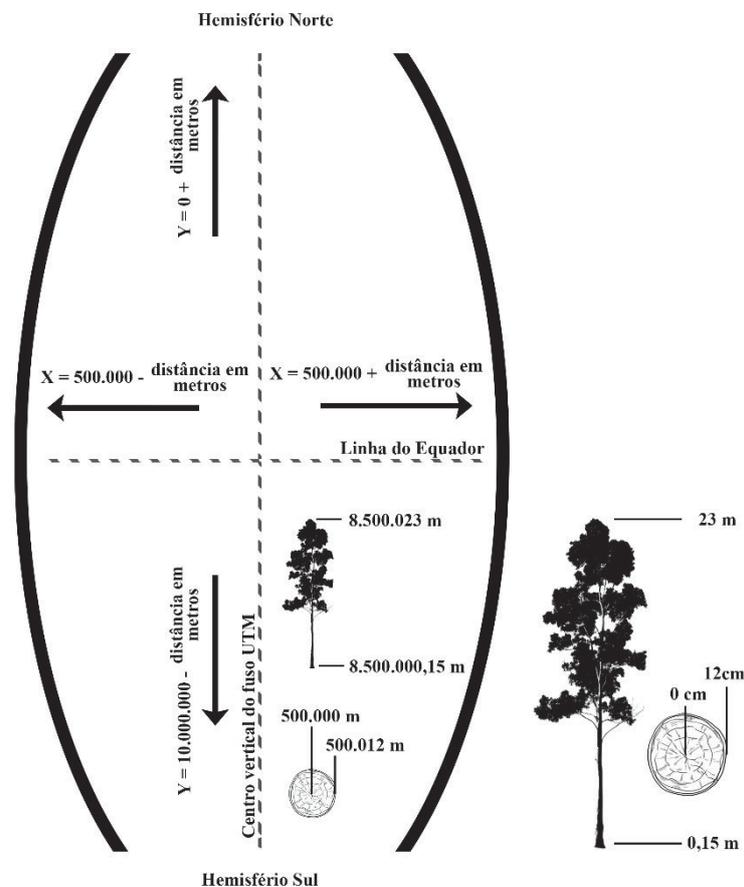
A estratégia para a espacialização dos dados, de forma a manter sua proporcionalidade, foi projetá-los em um local arbitrário no globo terrestre, sendo padronizado somar 8.500.000 m como coordenada sul aos dados (y) de altura do tronco, e 500.000 m a leste para os valores de diâmetro (x) do fuste da árvore (FIGURA 2.6), o que permite a utilização de software de geoprocessamento para interpolação dos dados de densidade.

Os mapas da variação da densidade do lenho foram desenvolvidos pelo interpolador determinístico *Global Polynomial Interpolation* (GPI), que ajusta os pontos de uma superfície por meio de uma função polinomial, cuja ordem do polinômio depende de como os pontos estão distribuídos. No presente trabalho, o mapa de densidade do lenho foi gerado para cada árvore de eucalipto por meio do ajuste do modelo *Global Polynomial Interpolation* de 3º Grau.

Os pontos amostrais utilizados para a elaboração dos mapas foram provenientes dos perfis radiais de microdensidade do lenho em 7 diferentes

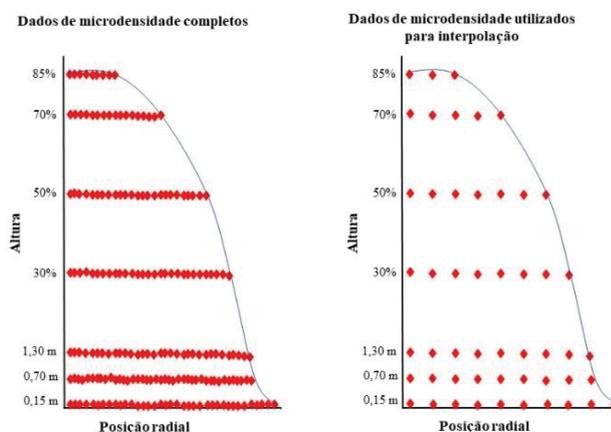
alturas do fuste, com as coordenadas  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  constituindo a distância radial, a altura do fuste e a densidade do lenho, respectivamente. Como no sentido do eixo  $X$  há um número de pontos amostrais muito superior que os dos pontos no eixo  $Y$ , o que prejudica na interpolação, optou-se por utilizar a média de pontos no sentido  $X$  a cada 10% da largura da amostra da base do tronco, conforme exemplificado na FIGURA 2.7.

FIGURA 2.6 – ORGANIZAÇÃO DOS DADOS PARA A ELABORAÇÃO DO MAPA DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO.



FONTE: O autor (2023).

FIGURA 2.7 – DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS AMOSTRAIS UTILIZADOS PARA A ELABORAÇÃO DO MAPA DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO.



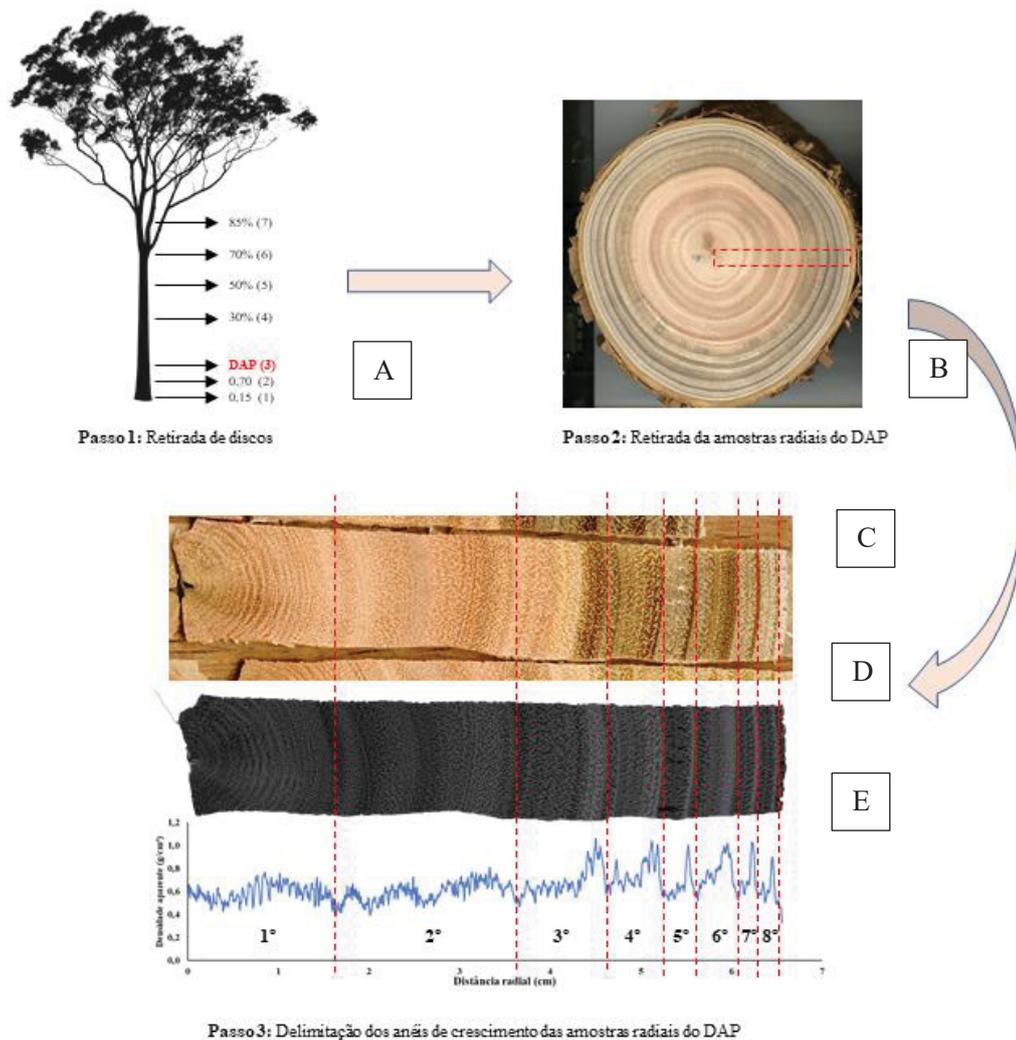
FONTE: O autor (2023).

#### 2.2.4.5 Delimitação e mensuração dos anéis de crescimento e associação com variáveis meteorológicas

A delimitação dos anéis de crescimento dos clones de eucalipto em diferentes regiões foi realizada utilizando estrutura anatômica macroscópica (FIGURA 2.8-C), imagem radiográfica (FIGURA 2.8-D), e perfil radial da micro densidade do lenho (FIGURA 2.8-E), proveniente de duas tiras radiais diametralmente opostas retiradas na altura do DAP (FIGURA 2.8-A e B).

Os anéis de crescimento anuais foram delimitados pela identificação de um pico seguido de uma depressão no gráfico do perfil micro-densitométrico. Esse pico corresponde ao lenho tardio, formado em períodos secos e implica na formação de células com paredes celulares mais espessas e lumens menores culminando em maior densidade e a depressão corresponde ao lenho inicial, formado nos períodos chuvosos e que correspondem às células com parede celular mais fina e lumens maiores culminando em menores densidades. Para auxiliar na delimitação dos anéis, utilizou-se imagens radiográficas em escala de cinza, na qual o cinza mais intenso corresponde ao lenho tardio e as regiões de cinza mais claro ao lenho inicial. Também foram utilizadas imagens da amostra lixada e escaneada, nas quais as regiões com cor marrom escuro correspondem ao lenho tardio e as regiões marrom mais claro ao lenho inicial.

FIGURA 2.8 – (A) ÁRVORE DE CLONE DE EUCALIPTO COM A INDICAÇÃO DAS ALTURAS E DO DAP DO TRONCO; (B) SEÇÃO TRANSVERSAL DO LENHO NO DAP E DEMARCAÇÃO DE AMOSTRA RADIAL; (C,D,E) SEÇÃO RADIAL DO LENHO, IMAGEM DIGITAL OBTIDA POR RAIOS X E PERFIL RADIAL DA MICRODENSIDADE DO LENHO EVIDENCIANDO E DEMARCANDO OS ANÉIS DE CRESCIMENTO ANUAIS DO 1º AO 9º ANO DAS ÁRVORES.



FONTE: O autor (2023).

A idade do primeiro anel é definida pela data de plantio até o início da estação chuvosa, em seguida, às idades dos outros anéis, foram somados 12 meses. Na região de estudo, o início da estação chuvosa ocorre no mês de outubro, logo, o ano fisiológico de crescimento é compreendido entre o mês de outubro até o mês de setembro do próximo ano.

Após a delimitação dos anéis de crescimento para cada amostra de lenho do DAP dos clones estudados, foi aferida a largura de cada anel e calculada a densidade aparente média. Essas variáveis foram analisadas graficamente e posteriormente correlacionadas com as variáveis meteorológicas para cada ano entre os períodos 2011 a 2019: Temperatura máxima, média e mínima, precipitação anual e déficit hídrico anual. O preparo dos dados foi efetuado segundo a descrição de Câmara et al. (2021).

A correlação entre as variáveis foi calculada pelo método de correlação de redes, utilizando o pacote “qgraph” (EPSKAMP et al., 2012) no software estatístico R Core Team (2022).

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.3.1 Dimensões e densidade do fuste das árvores dos clones híbridos de Eucalipto

Na TABELA 2.4 estão apresentados os valores médios e de desvio padrão das variáveis DAP (cm), altura total (m), volume individual ( $m^3$ ), densidade básica ( $g.cm^{-3}$ ) e densidade aparente ( $g.cm^{-3}$ ) das árvores amostradas por clone e região. Também, os dados estão apresentados por meio da análise gráfica do tipo Box Plot e Violino na FIGURA 2.9.

Os dados demonstram que, para a amostragem realizada, na Região 1, o clone C2 detém o maior valor médio de DAP com e sem casca, e, também, a maior altura total, porém o clone C1 apresentou a média do volume individual com e sem casca ligeiramente maior. Isso ocorreu porque a dispersão dos valores de altura total no clone C2 é bem superior ao que foi encontrado no clone C1. Já para a densidade básica ( $g.cm^{-3}$ ) e densidade aparente ( $g.cm^{-3}$ ), a maior média foi encontrada no clone C4, seguidos pelos clones C2, C3 e C1. Já na Região 2, o clone C2 foi superior em todas as variáveis analisadas.

No setor de produção de madeira para fins energéticos, recomenda-se utilizá-la com valores de densidade básica acima de  $0,54 g.cm^{-3}$  (VIDAURRE et al., 2020). Portanto, utilizando apenas este parâmetro referencial, somente o clone C4 seria adequado. Entretanto, outros critérios de relevância para avaliação do desempenho dos clones são: a produção volumétrica de madeira e, principalmente, a biomassa seca, a qual é obtida pela multiplicação do volume

individual médio pela densidade básica média, por clone e região. Considerando esses outros critérios, o clone C2 poderia ser um candidato interessante para a produção de carvão, apesar de sua densidade básica estar entre 0,525 e 0,529 g.cm<sup>-3</sup>.

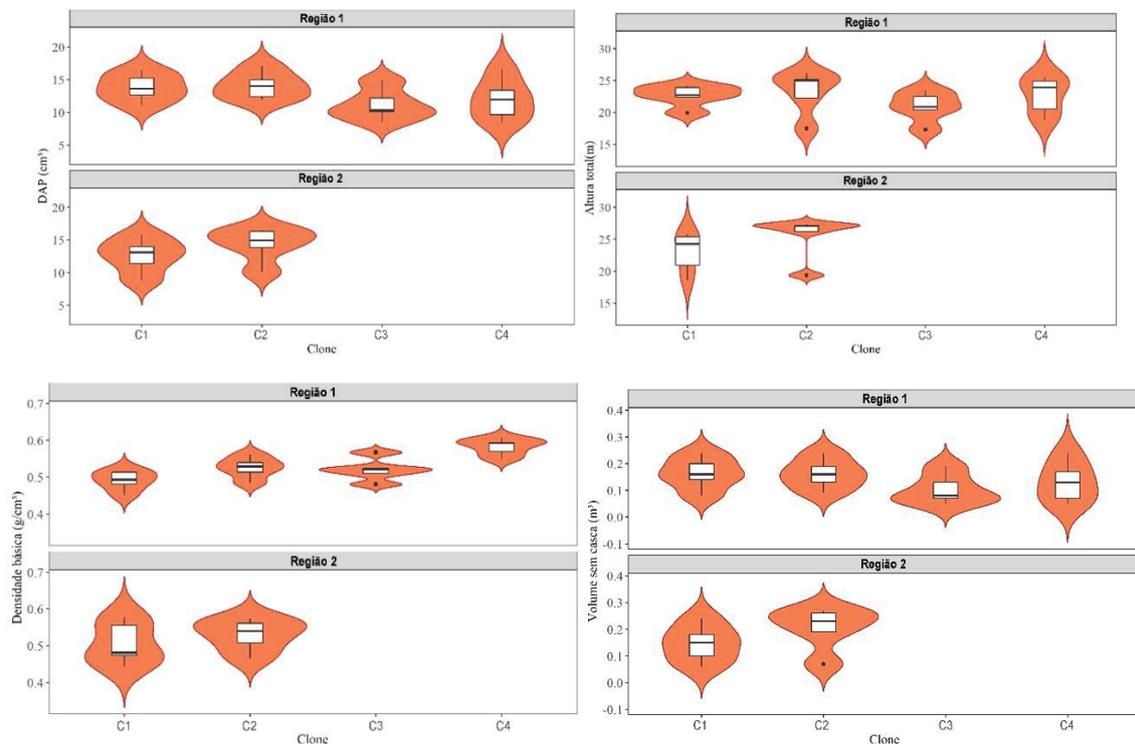
TABELA 2.4 – DAP, ALTURA, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA E APARENTE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS 4 CLONES DE EUCALIPTO NAS 2 REGIÕES DO ESTADO DE MG.

Região	Clone	DAP <sub>cc</sub> (cm)	DAP <sub>sc</sub> (cm)	HT (m)	V <sub>cc</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>sc</sub> (m <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
Região 1	C1	14,13 ±2,13	13,81± 2,10	22,62 ±1,68	0,174± 0,07	0,164± 0,07	0,505± 0,03	0,661± 0,02
Região 1	C2	14,38 ±2,12	14,09± 2,07	23,20 ±3,49	0,172± 0,07	0,162± 0,06	0,529± 0,03	0,686± 0,03
Região 1	C3	11,41 ±2,50	11,18± 2,45	20,93 ±2,37	0,111± 0,06	0,105± 0,06	0,520± 0,04	0,670± 0,03
Região 1	C4	12,25 ±3,30	12,00± 3,22	22,75 ±2,91	0,141± 0,09	0,133± 0,08	0,582± 0,02	0,727± 0,02
Região 2	C1	12,90 ±2,65	12,63± 2,64	22,97 ±3,11	0,154± 0,08	0,146± 0,08	0,490± 0,06	0,657± 0,07
Região 2	C2	15,04 ±2,74	14,74± 2,67	25,44 ±3,42	0,219± 0,09	0,207± 0,09	0,525± 0,05	0,677± 0,05

FONTE: O autor (2023).

Em que: HT é a altura total do tronco, V<sub>cc</sub> é o volume do fuste com casca, V<sub>sc</sub> é o volume do fuste sem casca, ρ é a densidade básica do lenho e ρ<sub>ap</sub> é a densidade aparente do lenho.

FIGURA 2.9 – DAP, ALTURA, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA DO LENHO DAS ÁRVORES DOS 4 CLONES DE EUCALIPTO NAS 2 REGIÕES DO ESTADO DE MG: GRÁFICO BOX PLOT E VIOLINO.



FONTE: O autor (2023).

### 2.3.2 Dimensões e densidade do lenho do fuste das árvores dos clones: análises MANOVA e discriminante

Os resultados da análise de variância multivariada mostram um efeito significativo para clones ( $p$ -valor  $<0,05$ ) para todos os critérios, sendo um indicativo desse efeito para, pelo menos, uma das médias das variáveis (TABELA 2.5). Este resultado indica potencial diferenciação em no mínimo um dos clones quanto às suas dimensões (DAP, altura e volume) e densidade básica média.

A primeira hipótese delineada neste trabalho: “A variável densidade básica e os parâmetros de crescimento (diâmetro, altura e volume do lenho), devem ser considerados conjuntamente para a seleção dos melhores clones para a produção de biomassa, sendo a densidade básica a variável de maior efeito na diferenciação dos clones”, foi confirmada conforme resultados apresentados na análise discriminante das variáveis DAP, altura total, volume e densidade do lenho das árvores dos clones, para as quais a função discriminante 1 foi a que melhor explica a variabilidade total (62,6%), apresentando correlações entre as variáveis e as funções discriminantes maiores do que 0,77 (TABELA 2.6). Na primeira função discriminante, a variável densidade do lenho apresentou-se como a de maior peso a ela associada (correlação canônica). A segunda função discriminante apresentou pesos semelhantes e baixos entre as variáveis, sendo desconsiderada na presente análise. Para a terceira função discriminante, as variáveis DAP, altura total e volume foram as de maior peso (TABELA 2.7), com os quais foram elaborados os gráficos das funções canônicas com as funções 1 e 3.

TABELA 2.5 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA MULTIVARIADA PARA AS VARIÁVEIS DAP, ALTURA TOTAL, VOLUME E DENSIDADE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO

Variável	Critério	Valor	Aproximação de F	Significância
Clone	Traço de Pillai	1,222	2,113	0,009*
	Lambda de Wilks	0,190	2,298	0,006*
	Traço de Hotelling	2,417	2,356	0,004*
	Maior raiz de Roy	1,513	7,261	$< 0,0001^*$

FONTE: O autor (2023).

Em que: \* significativa a 95% de probabilidade.

TABELA 2.6 – PORCENTAGEM DA VARIÂNCIA TOTAL EXPLICADA PELAS FUNÇÕES DISCRIMINANTES RELATIVAS AOS AUTOVALORES E COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO CANÔNICA.

<b>Função Discriminante</b>	<b>Autovalor</b>	<b>Percentual da variância</b>	<b>Percentual acumulativo</b>	<b>Correlação canônica</b>
1	1,513	62,6	62,6	0,776
2	0,627	25,9	88,5	0,621
3	0,217	9,0	97,5	0,422
4	0,061	2,5	100,0	0,239

FONTE: O autor (2023).

TABELA 2.7 – PESOS DISCRIMINANTES DAS VARIÁVEIS DAP, ALTURA, VOLUME E DENSIDADE DO LENHO DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO PARA AS TRÊS FUNÇÕES DISCRIMINANTES.

<b>Variável</b>	<b>Funções discriminantes</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Dens. básica	0,611*	0,406	0,585
DAP	-0,006	-0,271	0,954*
Altura Total	-0,241	-0,159	0,942*
Volume	-0,138	-0,288	0,920*

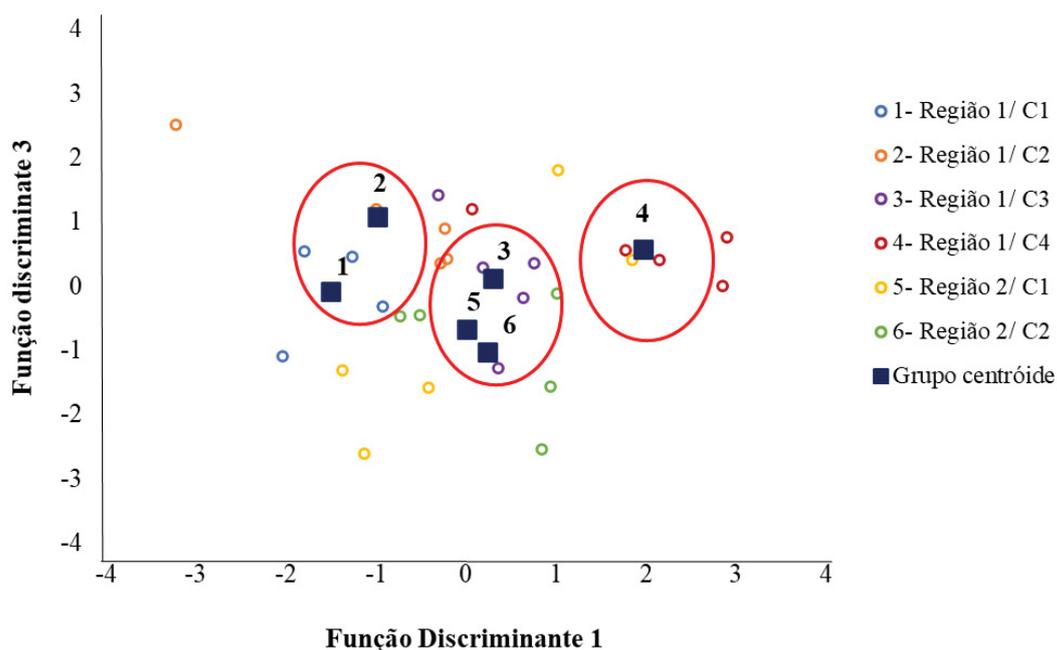
FONTE: O autor (2023).

\* Maior correlação absoluta entre cada variável e qualquer função discriminante

Os resultados das funções discriminantes 1 e 3 por clone com os respectivos grupos centróides das variáveis DAP, altura, volume e densidade do lenho (FIGURA 2.10) indicam a separação em 3 grupos. O primeiro grupo compreende o clone C4; o segundo compreende os clones C1 e C2 da Região 2 e C2 da Região 1; o terceiro, os clones C1 e C2 da Região 1. O que evidencia o efeito de sítio ao analisar as variáveis dendrométricas e de qualidade da madeira conjuntamente.

O DAP, altura e volume do fuste são variáveis já obtidas rotineiramente nas empresas florestais e podem ser utilizadas para selecionar os melhores clones. No entanto, a densidade do lenho é imprescindível para a diferenciação dos clones, pois foi a variável de maior peso e responsável por mais de 60% do poder discriminatório na primeira função discriminante. Nos estudos de Pereira et al. (2021) foi utilizada a função discriminante de Fisher para classificação do carvão vegetal de 12 clones de *Corymbia* sp. e *Eucalyptus* sp. e verificaram que as variáveis carbono fixo e densidade relativa aparente foram os principais atributos de qualidade do carvão vegetal para diferenciar os clones.

FIGURA 2.10 – GRÁFICO DAS FUNÇÕES DISCRIMINANTES 1 E 3 SEPARADOS POR CLONES REFERENTES ÀS VARIÁVEIS DAP, ALTURA, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA.



FONTE: O autor (2023).

Os resultados da análise de variância multivariada mostram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para todos os critérios, indicando diferenças na variação da densidade no sentido longitudinal do fuste dos clones de eucalipto na Região 1 e Região 2 (TABELA 2.8).

Os resultados da TABELA 2.9 mostram que a primeira função contribuiu com 57,2% para configurar as diferenças entre os grupos. Na função discriminante 1, a variável densidade do lenho no DAP e 70% da altura do fuste é a de maior correlação canônica na função discriminante 1 (TABELA 2.10), com as demais variáveis evidenciadas na função 5, justificando a seleção das funções 1 e 5 para a construção da figura das funções discriminantes. Nas funções discriminantes 2, 3 e 4 os pesos foram baixos entre as variáveis, portanto foram desconsideradas.

TABELA 2.8 – ANÁLISE DA VARIÂNCIA MULTIVARIADA PARA A DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO (0,15 A 85%).

	<b>Critério</b>	<b>Valor</b>	<b>Aproximação de F</b>	<b>Significância</b>
Clone	Traço de Pillai	1,682	1,594	0,036*
	Lambda de Wilks	0,081	1,825	0,014*
	Traço de Hotelling	4,191	1,964	0,007*
	Maior raiz de Roy	2,399	7,540	< 0,0001*

FONTE: O autor (2023).

Em que: \* significativa a 95% de probabilidade.

TABELA 2.9 – PORCENTAGEM DA VARIÂNCIA TOTAL EXPLICADA PELAS FUNÇÕES DISCRIMINANTES RELATIVAS AOS AUTOVALORES E AOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO CANÔNICA PARA CADA FUNÇÃO DISCRIMINANTE.

<b>Função</b>	<b>Autovalor</b>	<b>% de variância</b>	<b>% acumulativa</b>	<b>Correlação canônica</b>
1	2,399	57,2	57,2	0,840
2	1,209	28,9	86,1	0,740
3	0,449	10,7	96,8	0,557
4	0,128	3,1	99,9	0,337
5	0,006	0,1	100,0	0,075

FONTE: O autor (2023).

TABELA 2.10 – CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS ORIGINAIS AVALIADAS E AS FUNÇÕES DISCRIMINANTES OBTIDAS PARA A DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO (0,15 A 85%).

<b>Posições longitudinais</b>	<b>Funções discriminantes</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
70%	0,632*	0,101	0,396	0,520	0,314
30%	0,582*	0,225	0,049	0,007	0,481
50%	0,556*	-0,040	-0,021	0,479	0,528
1,3 m	0,401*	0,247	0,120	0,250	0,329
0,15 m	0,269	0,444	0,206	0,430	0,656*
85%	0,308	-0,204	0,508	0,024	0,618*
0,7 m	0,317	0,200	0,100	0,190	0,535*

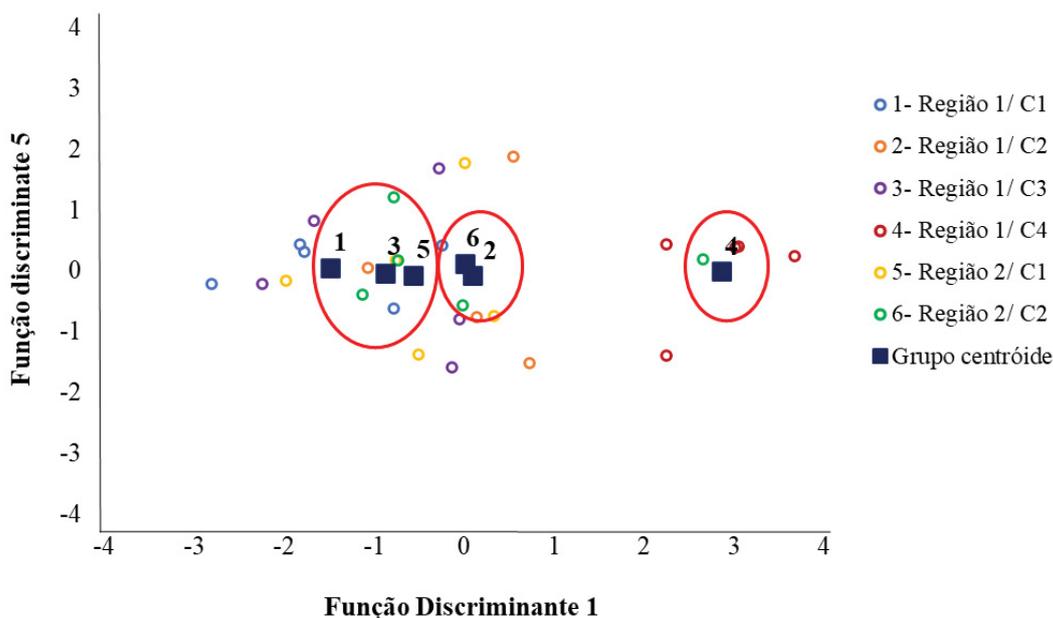
FONTE: O autor (2023).

\* Maior correlação absoluta entre cada variável e qualquer função discriminante

Na FIGURA 2.11 estão disponibilizadas as funções discriminantes 1 e 5 separadas por clones referentes às variáveis densidade básica do lenho ao longo do fuste, com o Clone C4 diferenciando-se fortemente dos demais e formando um grupo. O segundo grupo foi formado pelo clone C2 das duas regiões e o

terceiro grupo foi formado pelos clones C3 e C1. Essa separação entre grupos de mesmo clone confirma o que era esperado, dado que a variável densidade possui grande herdabilidade genética (TAN et al., 2018), sendo mais bem evidenciado no clone C2 do que o C1.

FIGURA 2.11 – GRÁFICO DAS FUNÇÕES DISCRIMINANTES 1 E 5 SEPARADAS POR CLONES DA VARIÁVEL DENSIDADE DO LENHO, NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO.



FONTE: O autor (2023).

### 2.3.3 Densidade básica do lenho no sentido longitudinal do fuste das árvores

Na FIGURA 2.12 estão apresentadas as médias de densidade básica ao longo do fuste para cada clone e região. Nota-se que o clone C4 apresenta as maiores médias em todas as posições do fuste, variando a densidade de 0,562 a 0,601 g.cm<sup>-3</sup>. As médias de densidade básica do Clone C1 na Região 1 e Região 2 apresentaram similaridade até à altura do DAP, depois, acima de 30% da altura relativa dos fustes, os indivíduos da Região 1 apresentaram maior densidade básica. Já para o clone C2, as médias da densidade básica até 50% foram similares nas duas regiões, e para as demais alturas, a densidade das amostras de lenho na Região 1 foram maiores.

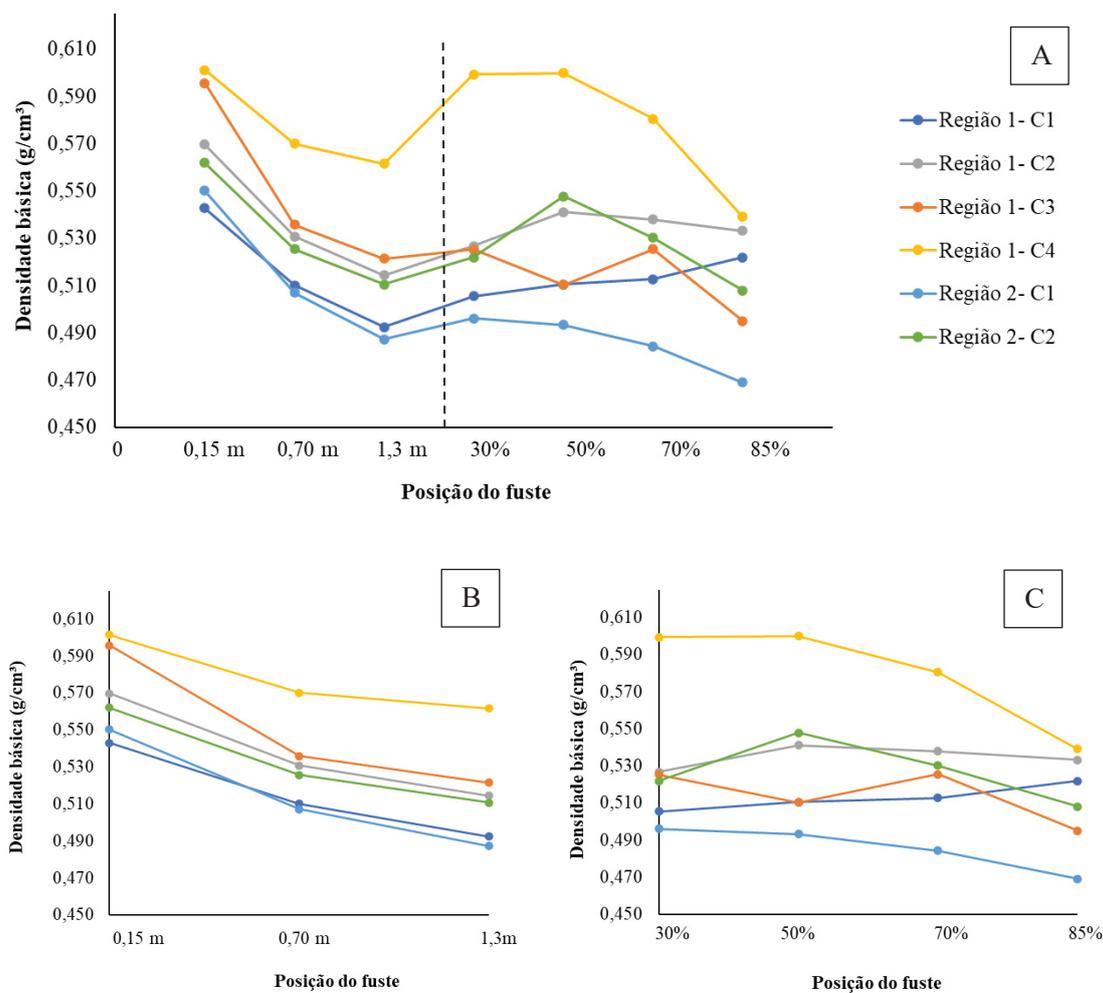
Os clones deste estudo apresentaram o comportamento da densidade básica de forma distinta. Os clones C2 das duas regiões, C1 na Região 2 e C4 na Região 1 apresentaram os valores médios de densidade decrescente até o

DAP, seguido de um aumento entre 50% e 70% da altura e, a partir daí, decresce até o ápice. Esse comportamento também foi reportado por Moutinho (2013), ao estudar indivíduos híbridos de *Eucalyptus* spp. aos 5 e 6 anos de idade na região de Itamarandiba-MG. Já o comportamento da densidade média para o clone C3 foi decrescente até o DAP, seguido de uma pequena variação. A terceira tendência encontrada foi para o clone C1 da Região 1, em que a densidade reduziu até o DAP e depois aumentou até o ápice.

Estudos envolvendo a caracterização da variação da densidade da madeira no sentido base-topo em clones híbridos de *E. urophylla* x *E. camaldulensis* são incipientes, sendo apenas reportados em trabalhos que analisam a densidade básica média, e os comportamentos para *E. camaldulensis* (STURION et al., 1987; EVANGELISTA, 2007; LIMA et al., 1992; FARIA et al., 2015).

Para o híbrido *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, vários autores descreveram o seu comportamento longitudinal (ALZATE et al., 2005; PADUA, 2009; SÃO TEAGO, 2012; BOSCHETTI, 2014). Em um estudo mais recente, Carneiro et al. (2014) observaram seis tendências de variações para clones do mesmo híbrido aos 6 anos de idade, em Aracruz-ES, sendo elas: (i) Redução da densidade da base ao DAP, seguido de aumento em até 50%, e diminuição até o topo; (ii) Aumento da densidade da base em 75%, seguido por queda até o topo; (iii) Redução da densidade da base em 25%, seguido de aumento até o topo; (iv) Redução da densidade da base ao DAP, seguido de aumento em até 50%, diminuição novamente em até 75%, e aumento até o topo; (v) Redução da densidade da base ao DAP, seguido por um aumento até o topo; e (vi) Redução da densidade da base ao DAP, seguido de aumento até 75%, e queda no topo.

FIGURA 2.12 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS 4 CLONES DE EUCALIPTO NAS 2 REGIÕES DO ESTADO DE MG. (A) VARIAÇÃO LONGITUDINAL MÉDIA POR CLONE EM TODAS AS ALTURAS; (B) DENSIDADE BÁSICA MÉDIA DAS AMOSTRAS DO PRIMEIRO GRUPO PARA A ANÁLISE DE PERFIL; (C) DENSIDADE BÁSICA MÉDIA DAS AMOSTRAS DO SEGUNDO GRUPO PARA A ANÁLISE DE PERFIL.



FONTE: O autor (2023).

Avaliando os resultados da análise de perfil (TABELA 2.11), para a hipótese  $H_0^{(1)}$ , que testa o paralelismo dos perfis médios da densidade básica, não houve diferença significativa, referente às alturas 0,15 m a 1,30 m (DAP) para todos os pares de combinações, o que mostra não haver diferença no comportamento da densidade básica em até o DAP para os diferentes clones e regiões. Já para os valores de densidade tomadas nas alturas relativas de 30% a 85%, houve diferença significativa para os respectivos pares na Região 1:

clones C1 x C2 e clones C2 x C3. Essa evidência do efeito de clone no comportamento da densidade básica ao longo do fuste é divergente dos estudos de Serenini et al. (2020), que avaliaram o efeito dos clones de *Eucalyptus* spp. na densidade básica obtida ao longo da árvore por meio da ANOVA e concluíram que não houve estatística significativa ( $\alpha < 5\%$ ) na interação entre os clones e densidade básica, portanto as variações da densidade são as mesmas para todos os clones.

Para a hipótese  $H_0^{(2)}$ , que indica se as curvas são coincidentes, os perfis médios de densidade básica nas alturas 0,15 m a 1,30 m (DAP) foram não significantes, exceto os pares de combinações dos clones C1 x C4 e clones C2 x C4. Quanto às demais alturas, o perfil de densidade C4 é significativo em relação aos demais clones.

Quanto à hipótese  $H_0^{(3)}$ , todos os pares de combinações da densidade tomada nas alturas 0,15 m a 1,3 m foram significantes, indicando que houve efeito da posição longitudinal do fuste. Já analisando a densidade básica média nas alturas relativas de 30% a 85%, verificou-se pela não significância do teste, ou seja, nenhuma diferença ocorreu na densidade tomada à diferentes posições do fuste para as seguintes combinações: C2 x C3 na Região 1, C1 x C2 Região 2, C1 na Região 1 X Região 2 e C2 na Região 1 X Região 2.

No presente estudo, o método de análise de perfil foi utilizado para determinar a diferença da densidade básica aferida em diferentes posições do fuste para diferentes clones, porém a análise mais comum encontrada nos trabalhos é a análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey, caso haja diferença significativa. A ANOVA compara as médias de densidade aparente em diferentes alturas para os grupos de clones separadamente. Entretanto, a análise de perfil permite testar as médias de densidade ao longo fuste simultaneamente, permitindo, assim, detectar mais informações para o mesmo conjunto de dados, como as seguintes análises: interação entre clone e posição longitudinal do fuste, efeito do clone nas médias de densidade básica, efeito da posição longitudinal nas médias de densidade básica. Além de lidar com a autocorrelação das observações.

TABELA 2.11 – ANÁLISE DO PERFIL DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DAS ÁRVORES DOS 4 CLONES DE EUCALIPTO NAS DUAS REGIÕES DO ESTADO DE MINAS GERAIS.

Região	Clone	Hipóteses	Valor Cal	Valor tab	Valor Cal	Valor tab
			0,15 a DAP	(T <sup>2</sup> , t)	30% a 80%	(T <sup>2</sup> , t)
Região 1	C1 x C2	H <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	0,579 <sup>ns</sup>	10,828	21,383*	19,028
		H <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	1,002 <sup>ns</sup>	2,306	2,319*	2,306
		H <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	58,928*	10,828	25,157*	19,028
Região 1	C1 x C3	H <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	0,587 <sup>ns</sup>	10,828	6,574 <sup>ns</sup>	19,028
		H <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	1,993 <sup>ns</sup>	2,306	1,608 <sup>ns</sup>	2,306
		H <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	51,928*	10,828	28,845*	19,028
Região 1	C1 x C4	H <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	8,949 <sup>ns</sup>	10,828	18,271 <sup>ns</sup>	19,028
		H <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	3,974*	2,306	5,858*	2,306
		H <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	139,69*	10,828	75,552*	19,028
Região 1	C2 x C3	H <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	1,388 <sup>ns</sup>	10,828	50,427*	19,028
		H <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	1,060 <sup>ns</sup>	2,306	0,768 <sup>ns</sup>	2,306
		H <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	33,16*	10,828	16,299 <sup>ns</sup>	19,028
Região 1	C2 x C4	H <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	0,730 <sup>ns</sup>	10,828	12,401 <sup>ns</sup>	19,028
		H <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	3,054*	2,306	3,337*	2,306
		H <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	38,438*	10,828	34,492*	19,028
Região 1	C3 x C4	H <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	3,253 <sup>ns</sup>	10,828	5,145 <sup>ns</sup>	19,028
		H <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	1,78 <sup>ns</sup>	2,306	4,314*	2,306
		H <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	36,425*	10,828	68,775*	19,028
Região 2	C1 x C2	H <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	0,082 <sup>ns</sup>	10,828	0,876 <sup>ns</sup>	19,028
		H <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	0,753 <sup>ns</sup>	2,306	0,717 <sup>ns</sup>	2,306
		H <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	27,359*	10,828	1,341 <sup>ns</sup>	19,028
Região 1 x Região 2	C1	H <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	2,051 <sup>ns</sup>	10,828	8,418 <sup>ns</sup>	19,028
		H <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	0,009 <sup>ns</sup>	2,306	0,966 <sup>ns</sup>	2,306
		H <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	237,843*	10,828	0,794 <sup>ns</sup>	19,028
Região 1 x Região 2	C2	H <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	0,031 <sup>ns</sup>	10,828	3,718 <sup>ns</sup>	19,028
		H <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>	0,288 <sup>ns</sup>	2,306	0,349 <sup>ns</sup>	2,306
		H <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	19,740*	10,828	9,864 <sup>ns</sup>	19,028

FONTE: O autor (2023).

Em que: \* significativa a 95% de probabilidade; ns não significativa a 95% de probabilidade; T<sup>2</sup> é o valor tabelado do teste de Hotelling a 95% de probabilidade; t é o valor tabelado do teste t a 95% de probabilidade.

#### 2.3.4 Mapa de densidade aparente e perfil de microdensidade do lenho do fuste das árvores

Nas Figuras 2.13 a 2.15 estão apresentados os mapas da variação da densidade aparente do lenho das árvores e os perfis de micro densidade das árvores mais representativas de cada clone e região. Os mapas de densidade aparente de cada indivíduo estão incluídos no Apêndice I. De forma geral, os mapas elaborados utilizando o interpolador determinístico GPI de 3º Grau, que descreve a variação da densidade aparente, foram consistentes e de simples interpretação. Nesse sentido, Schimleck et al. (2009), na construção de mapas de variação da densidade do lenho de árvores de *Pinus taeda*, aplicaram os métodos de Akima, “*semiparametric bivariate smoothing*” e de Krigagem Universal, obtendo resultados similares e indicativos de que a densidade do lenho é uma variável física altamente previsível.

No entanto, trabalhos mais recentes não chegam a um consenso sobre os melhores e mais comuns algoritmos de interpolação espacial. Mora e Schimleck (2009) recomendam o método de interpolação de Akima pela praticidade na construção dos mapas de densidade do tronco. Da mesma forma, são relatados outros interpoladores como *Cubic spline method* (AUTY et al., 2014; HEIN et al., 2016; LONGUETAUD et al., 2016) e Krigagem Universal (CALEGARIO et al., 2017) e *Bivariate spline* (EBERHARDT et al., 2019). Na seleção do interpolador a ser utilizado é imprescindível considerar a natureza espacial dos dados e que tenham ou representem a variação biológica da densidade do lenho ou biomecânica do tronco. Mora e Schimleck (2009) destacam, também, que na aplicação de um método de análise espacial, a precisão das interpolações é essencialmente dependente da precisão do controle dos pontos de micro densidade do lenho, que são medidos. O sucesso dos resultados da aplicação dessas técnicas relaciona-se com o método de obtenção dos valores de densidade e de amostragem suficientemente representativa.

Assim, os mapas de variação da densidade aparente para o clone C1 da Região 1 evidenciam a densidade do lenho aumentando no sentido medula-casca até 12 m, correspondendo à 50% da altura total do tronco. Entre a porção do fuste de 50% a 85%, observou-se que até 1 cm de distância da medula, a densidade média aparente foi de 0,61 g.cm<sup>-2</sup>, depois houve uma redução seguida

de um aumento, conforme se distancia da medula. Este mesmo comportamento estendeu-se para a maioria das árvores abatidas deste clone, porém observou-se que a árvore com maior diâmetro apresentou a formação de lenho adulto próximo à casca até quase que 70% da altura relativa da árvore (FIGURA 2.13-A).

Nas árvores do clone C1 na Região 2 foi verificado o mesmo padrão de variação radial na base do tronco deste clone, embora com menor valor da densidade do lenho (FIGURA 2.15-A). Nesta localização, os indivíduos de menor diâmetro apresentaram na região da medula valores de densidade aparente acima de  $0,76 \text{ g.cm}^{-3}$ , o que acarretou o aumento da densidade média dos indivíduos com diâmetros menores do que nas árvores com diâmetros maiores.

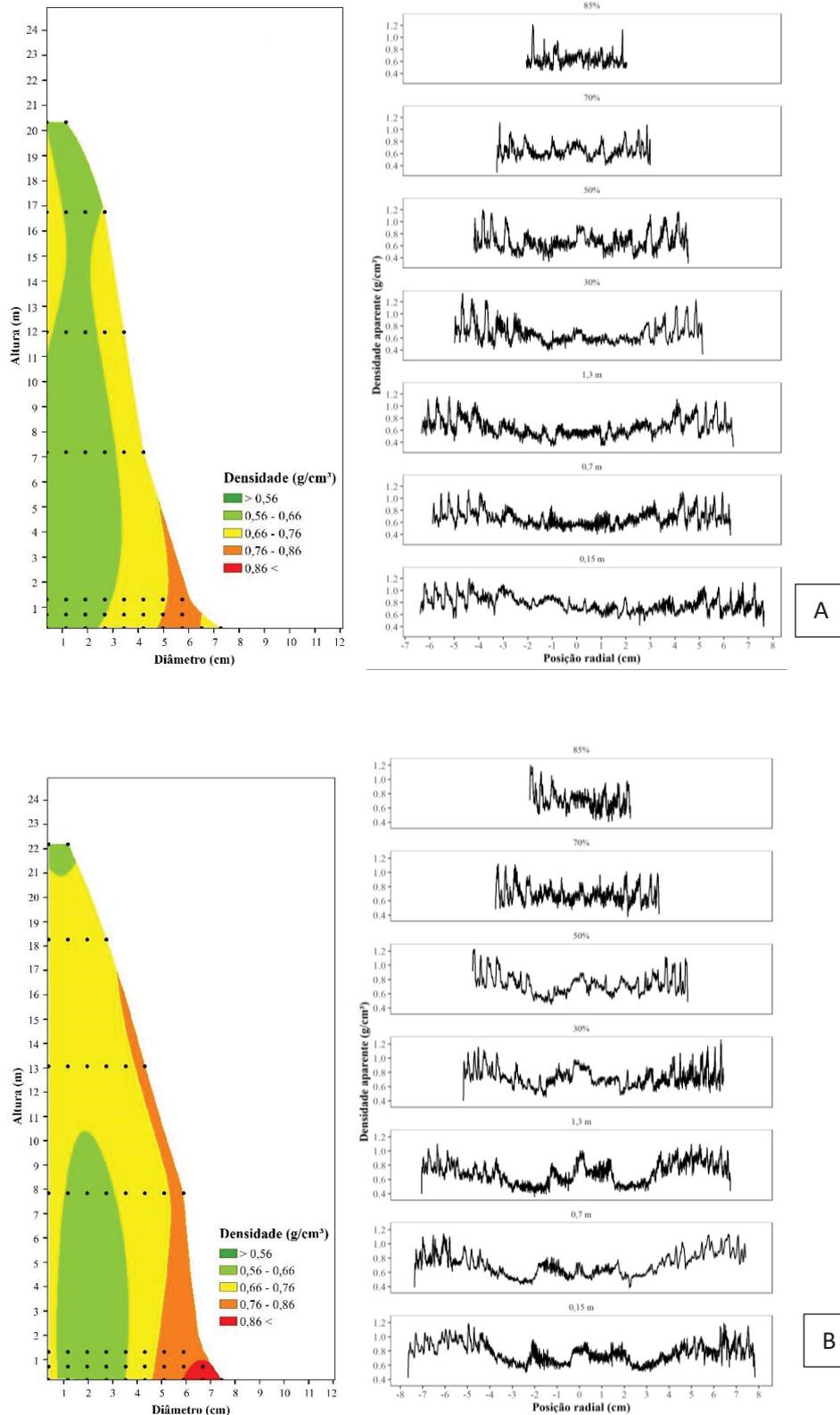
Para o clone C2 (FIGURA 2.13-B) na Região 1, a densidade até 30% da altura relativa total reduz até 3,5 cm de distância da medula e até à casca há um aumento. Nas porções mais altas do fuste há um padrão de crescimento da densidade sentido medula-casca e base-topo. Para os outros indivíduos amostrados, o comportamento revelou-se semelhante e observou-se a formação de lenho adulto para os indivíduos de maior diâmetro. Para o mesmo clone, na Região 2, o padrão de variação da densidade revelou-se bem semelhante, porém foi mais evidenciada a formação do lenho adulto para a maioria dos indivíduos coletados.

Na FIGURA 2.14-A, o clone C3 foi o que apresentou a menor variação de densidade nas duas direções de comportamento, sendo que em grande parte da região central do fuste não há notável variação da densidade. Nos outros indivíduos do mesmo clone houve diferenciação no comportamento da densidade, tendo-se notado redução da densidade básica acima do DAP, o que evidencia a diferença no comportamento da densidade em indivíduos com diâmetros diferentes. Por fim, para o clone C4 (FIGURA 2.14-B e Apêndice I), foi verificado o aumento da densidade no sentido medula-casca em quase todos os pontos longitudinais da árvore.

A distribuição da densidade no interior do tronco afeta diretamente a qualidade de madeiras para fins energéticos, permitindo, assim, aumento do rendimento do processo de carbonização e melhora as propriedades físico-químicas (TRUGILHO et al., 2005). Portanto, o clone C3 se destacou em relação

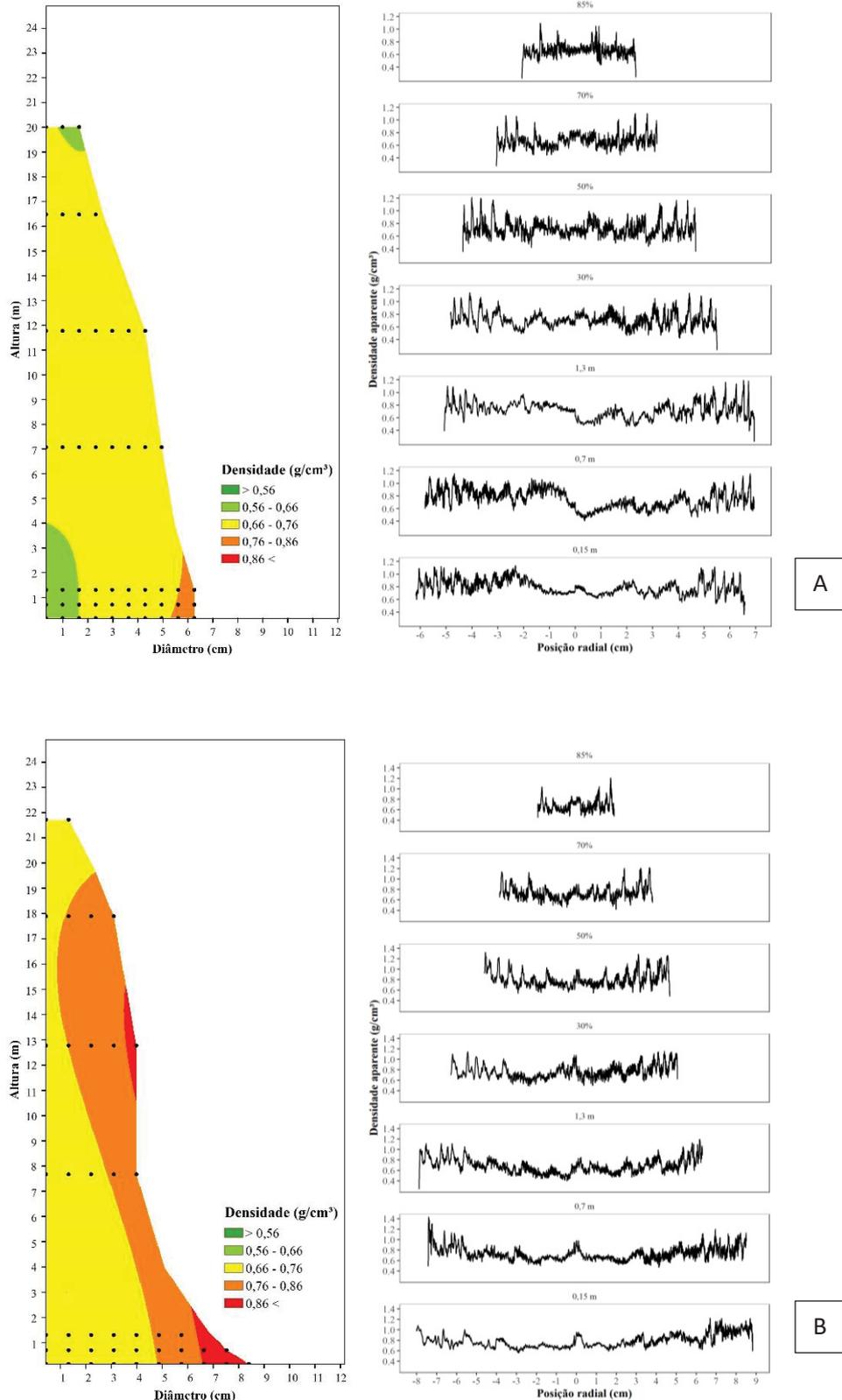
a essa propriedade, dado que este apresentou a menor variabilidade da densidade, tanto no sentido radial quanto longitudinal.

FIGURA 2.13 – MAPA DE DENSIDADE E PERFIL DE MICRODENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C1 (A) E C2 (B) DE EUCALIPTO EM REGIÃO 1, MG.



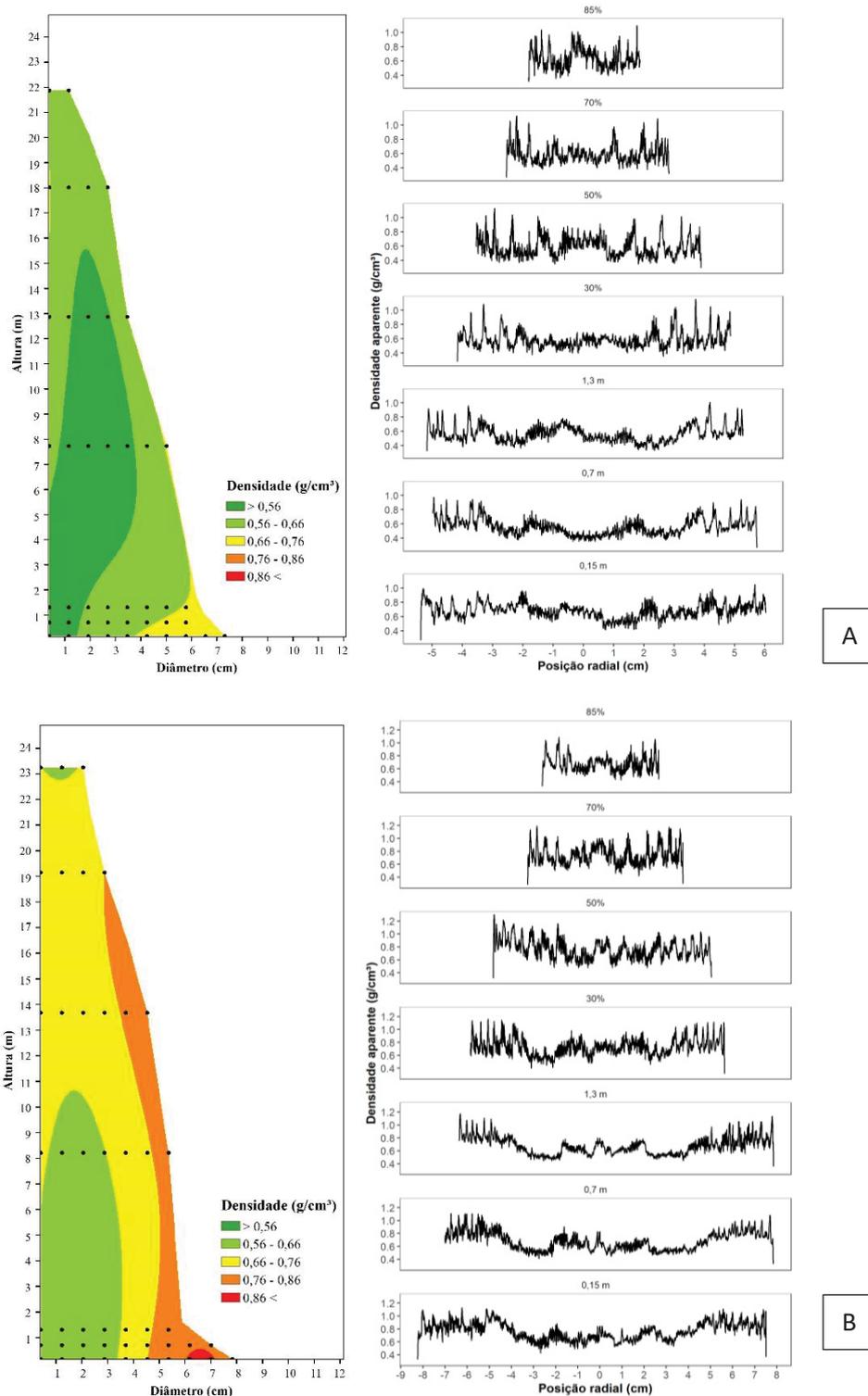
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 2.14 – MAPA DE DENSIDADE E PERFIL DE MICRODENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C3 (A) E C4 (B) DE EUCALIPTO na REGIÃO 1, MG.



FONTE: O autor (2023).

FIGURA 2.15– MAPA DE DENSIDADE E PERFIL DE MICRODENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES; C1 (A) E C2 (B) DE EUCALIPTO NA REGIÃO 2, MG.



FONTE: O autor (2023).

### 2.3.5 Densidade dos anéis de crescimento

Os valores médios de densidade aparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) e largura média (cm) em função da idade (anel biológico) para cada clone e região estão apresentados na FIGURA 2.16. A variação radial da densidade aparente do clone C1 na Região 1 esteve entre  $0,58 \text{ g.cm}^{-3}$  a  $0,769 \text{ g.cm}^{-3}$  nas idades de 22 e 46 meses, respectivamente. Quanto ao crescimento máximo e mínimo em centímetros no raio, foram observados os valores de 1,93 cm aos 22 meses e 0,19 cm aos 94 meses de idade (FIGURA 2.16). Comparando com o mesmo clone, porém na Região 2, a variação da densidade foi ligeiramente menor, variando entre  $0,57 \text{ g.cm}^{-3}$  a  $0,753 \text{ g.cm}^{-3}$  aos 10 meses e 94 meses, respectivamente. Também, o crescimento máximo e mínimo dado pela largura do anel foi numericamente inferior, estando entre 1,89 cm aos 10 meses e 0,14 cm aos 94 meses.

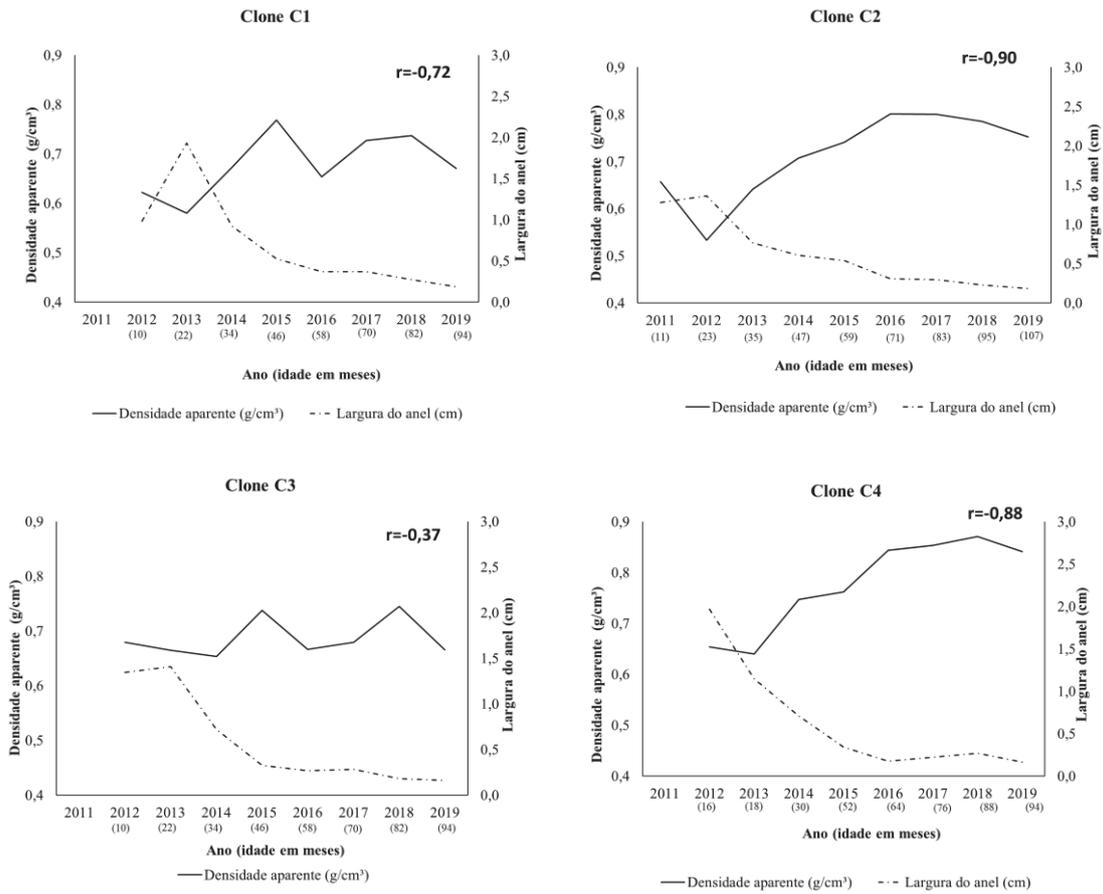
O clone C2 nos sítios da Região 1 e Região 2 apresentaram as curvas de densidade média e largura semelhantes, tanto no comportamento quanto nos valores, em que os valores médios de densidade aparente estiveram entre  $0,515 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $0,789 \text{ g.cm}^{-3}$ . Isto se torna um indicativo de que não ocorreu efeito da região na densidade aparente no sentido radial.

Entre os clones analisados, o C4 foi o que apresentou menor crescimento em largura e a densidade aparente esteve entre  $0,640 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $0,871 \text{ g.cm}^{-3}$ . Já o clone C3 apresentou a menor variação da densidade aparente, expressa em percentual entre a densidade máxima ( $0,745 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e mínima ( $0,664 \text{ g.cm}^{-3}$ ), da ordem de 10,76%, o que representa boa homogeneidade da densidade e que reflete na estabilidade da madeira do clone.

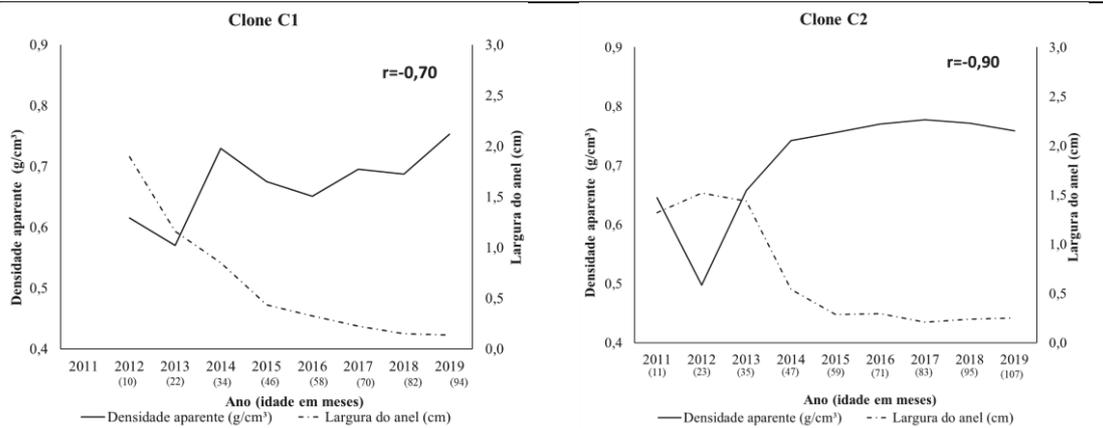
Portanto, a segunda hipótese delineada neste trabalho: “Existe efeito de clone na variação da densidade básica no sentido longitudinal e densidade aparente no sentido radial” foi comprovada.

FIGURA 2.16 – DENSIDADE APARENTE DO LENHO POR ANEL DE CRESCIMENTO ANUAL E LARGURA DO DAP DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO NA REGIÃO 1 e 2.

REGIÃO 1



REGIÃO 2



FONTE: O autor (2023).

Quanto ao comportamento da densidade por anel de crescimento, foi possível observar que os clones C1 e C2 apresentaram maiores valores de densidade próximo à medula, seguido por um decréscimo da densidade no segundo anel e retomando o crescimento no sentido da casca. Esse comportamento também foi encontrado no trabalho de Sette Junior et al. (2009), em que, ao avaliar a densidade aparente do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* com 24 meses de idade, encontrou-se maiores valores observados na medula (0,80–1,20 g.cm<sup>-3</sup>), devido à presença de substâncias de reserva (amido) nas células do parênquima axial, seguindo esta redução e estabilização (0,30–0,50 g.cm<sup>-3</sup>) até atingir o câmbio.

Já os valores da densidade aparente média por anel do clone C4 apresentou um comportamento crescente no sentido medula-casca. Esse comportamento é o mais comumente encontrado em estudos com *Eucalyptus*. Arantes et al. (2016), ao trabalharem com clone híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de 6 anos, observaram que a densidade aparente tendeu a aumentar no sentido medula casca em todas as amostras radiais coletadas. Casto et al. (2017), estudando povoamentos de *Eucalyptus grandis* com 12, 24 e 36 meses, verificaram que a variação radial da densidade aparente mostrou maior diferença a partir do terceiro ano de idade das árvores e com tendência de crescimento no sentido medula-casca. Outros autores também encontraram o mesmo comportamento do perfil radial da densidade aparente para *Eucalyptus*: Castro et al. (2020), Serenini et al. (2020), Vega et al. (2020), CHERELLI et al. (2018) e Tommazello-Filho (1985).

O clone C3 apresentou variação da densidade aparente suave e sem tendência aparente. Knapic et al. (2014) analisaram a densidade aparente no sentido radial de 19 espécies de *Eucalyptus* e observaram que 7 espécies apresentaram variações da densidade com poucas flutuações, tendendo a ser constantes. Os mesmos autores reportaram que as outras 12 espécies estudadas mostram tendência geral de valores decrescentes de densidade da medula ao câmbio, não sendo encontrada nos clones do presente estudo.

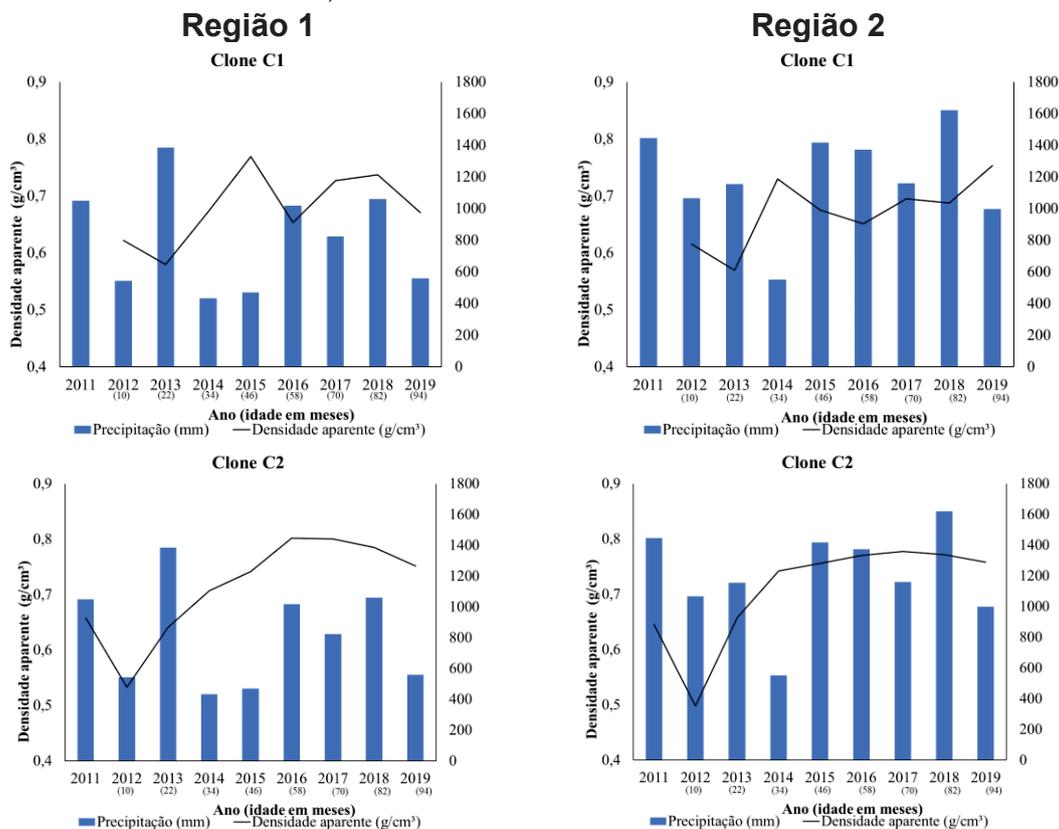
A variação do câmbio vascular ocorre pela alteração dos constituintes anatômicos como dimensões das fibras, organização da parede celular e a frequência e o diâmetro vascular (VIDAURRE et al., 2020) em resposta da interação idade x condições ambientais x material genético. Para todos os clones

estudados foi observado que até os 36 meses de plantio os indivíduos arbóreos já possuíam mais 60% da dimensão final em diâmetro. Esse comportamento é característico em espécies de *Eucalyptus* (POERSCH et al., 2017). Entretanto, apesar do expresso potencial produtivo volumétrico, a relação entre densidade x crescimento radial ocorreu de forma distinta entre os clones, de modo que os clones que apresentaram maior correlação em ordem crescente foram: C2, C4, C1 e C3, o que evidencia que a densidade é afetada pelo crescimento diamétrico e idade em diferentes magnitudes.

### 2.3.6 Efeito de sítio na densidade no sentido radial

Para comparar o efeito de ambiente na densidade aparente e seu comportamento no sentido medula-casca para os clones C1 e C2, foi primeiramente utilizada a precipitação anual de cada região entre os anos de plantio (2011-2019). No clone C1 nota-se que a densidade aparente, tanto para a Região 2 quanto para a Região 1, aumentou em anos que a precipitação era menor que a anterior, e reduziu em anos que a precipitação vigente era maior que a anterior (FIGURA 2.17). Já para o clone C2, não foi observado qualquer tendência no comportamento da densidade por anel biológico com a pluviosidade (FIGURA 2.17). Para ambos os clones analisados, a densidade por anel é ligeiramente menor na Região 2, que corresponde à uma região em que houve maior disponibilidade hídrica.

FIGURA 2.17 – DENSIDADE APARENTE DO LENHO POR ANEL DE CRESCIMENTO ANUAL DAS ÁRVORES DOS CLONES DE EUCALIPTO E PRECIPITAÇÃO ANUAL NA REGIÕES 1 E 2, MG.



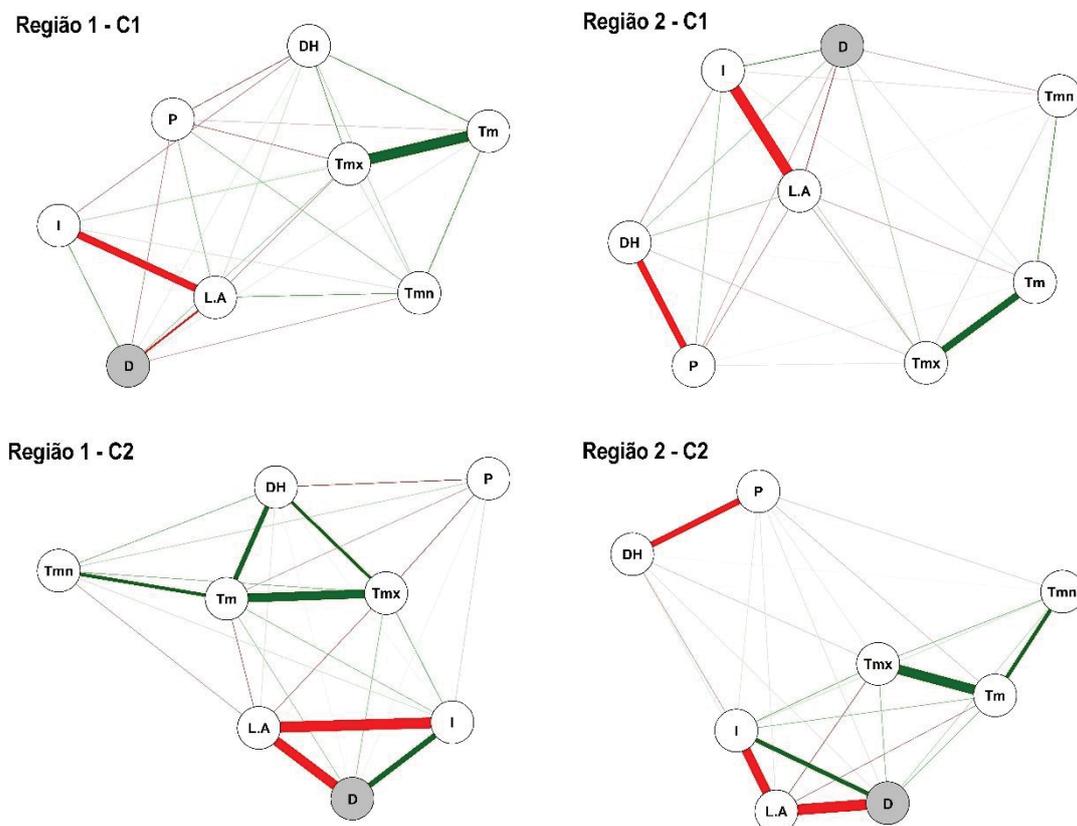
FONTE: O autor (2023).

Na Figura 2.18 estão apresentadas as redes de correlações de Pearson entre as variáveis meteorológicas, densidade aparente e largura do anel para os clones C1 e C2 na Região 1 e Região 2. As linhas mais espessas em verde indicam que as correlações foram positivas e significantes pelo teste t com valor de corte 0,7, já as linhas em vermelho indicam a significância das correlações negativas.

As densidades anuais nos dois clones analisados em ambas as regiões não apresentaram correlações significantes com as variáveis meteorológicas, mas no clone C2 das duas regiões, a densidade apresentou forte conectividade positiva com a idade e negativa com a largura do anel. Já para o clone C1 a densidade apresentou correlações significantes com a idade e largura de anel, porém mais fracas comparadas com as conectividades encontradas no clone C2. As correlações não significantes encontradas para ambos os clones entre a densidade e as variáveis meteorológicas também foram encontradas no estudo

de Câmara et al. (2021) para *E. urophylla* e *E. grandis* × *E. camaldulensis* em quatro regiões.

FIGURA 2.18 – CORRELAÇÃO DE REDE ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS, LARGURA DOS ANÉIS ANUAIS E DENSIDADE DA MADEIRA EM *Eucalyptus* spp. CULTIVADOS NA REGIÃO 1 e 2.



Em que: P é a precipitação anual média (mm), Tmx é a temperatura máxima média (°C), Tm é a temperatura média (°C), Tmn é a temperatura mínima média (°C), DH é o déficit hídrico anual (mm), I idade em anos, D é a densidade aparente anual e L.A é a largura do anel para cada ano de crescimento.

A densidade básica média e a densidade no sentido radial e longitudinal em ambos os clones foram menores na Região 2, devido à sua maior disponibilidade hídrica. Contudo, os resultados indicaram que a interação genótipo x ambiente, analisando a densidade em si, foi pouco expressiva, diferente dos resultados encontrados por Stape et al. (2004), Gouvêa et al. (2012), Downes et al. (2014), Meneses et al. (2015), porém, Barbosa et al. (2019) também observaram baixa influência dos sítios na variação da densidade em clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 6 anos de idade. Este resultado possivelmente ocorreu porque tanto os sítios avaliados, quanto no estudo anteriormente citado, apresentaram baixa variação climática entre eles, refletindo na baixa expressão fenotípica da densidade. Além disso, clones das

espécies *E. urophylla* são amplamente utilizados no território brasileiro por apresentarem características adaptativas às diversidades ambientais, e associado ao trabalho de melhoramento genético para maximizar a produtividade, os clones são considerados plásticos (BINKLEY et al., 2017).

Assim, a terceira hipótese: “As variáveis meteorológicas de ambientes pouco contrastantes apresentam efeito nas médias e no comportamento da densidade básica ao longo do fuste e da densidade aparente no sentido radial para os clones *Eucalyptus* spp.” foi rejeitada. Apesar da falta de relação direta verificada entre a densidade e as variáveis meteorológicas, os sítios florestais não são limitados a essas variáveis, mas todo um conjunto de fatores ambientais edafoclimáticos, que associados às práticas de manejo afetam a produtividade florestal e qualidade da madeira. Tendo em vista o termo sítio ser amplo e complexo, neste estudo, as inferências sobre o efeito de ambiente na densidade e variáveis dendrométricas foram restritas às variáveis meteorológicas estudadas.

## 2.4 CONCLUSÕES

As variáveis dendrométricas (DAP, altura e volume) e densidade básica quando analisadas de forma conjunta permitiram uma avaliação dos melhores clones para a produção de biomassa, sendo a densidade básica a variável de maior efeito na diferenciação dos materiais genéticos analisados.

Os resultados da análise de perfil permitiram verificar que houve efeito de clone no comportamento e nas médias da densidade básica ao longo do fuste a partir do DAP, porém, não foi verificada diferença estatística no comportamento e nas médias da densidade básica no sentido longitudinal, para o mesmo clone em diferentes ambientes.

As variáveis meteorológicas anuais não apresentaram correlações significantes com a densidade anual do lenho, porém a densidade foi mais correlacionada com a largura do anel (variável de crescimento) e a idade com intensidade maior para o clone C2 do que para o C1.

## 2.5 REFERÊNCIAS

- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica, Rio de Janeiro, 2003.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALZATE, S. B. A.; FILHO, M. T.; PIEDADE, S. M. S. DE. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 68, p. 87–95, 2005.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; FILHO, M. T.; LIMA, J. T.; VIDAURRE, G. B. Densitometria de raios x na madeira e carvão de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake1. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 155–162, 2016.
- AUTY, D.; ACHIM, A.; MACDONALD, E.; CAMERON, A. D.; GARDINER, B. A. Models for predicting wood density variation in Scots pine. **Forestry**, v. 87, n. 3, p. 449–458, 2014.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271–283, 2017.
- BOSCHETTI, W. T. N. **Qualidade da madeira de árvores do híbrido clonal *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* inclinadas por ação de ventos para produção de celulose**, 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Jerônimo Monteiro: Universidade Federal do Espírito Santo.
- BUSSAB, W.; MORETTIN, P. **Estatística Básica**. 6 ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2010.
- CALEGARIO, N.; GREGOIRE, T. G.; DA SILVA, T. A.; TOMAZELLO FILHO, M.; ALVES, J. A. Integrated system of equations for estimating stem volume, density, and biomass for Australian redcedar (*Toona ciliata*) plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 47, n. 5, p. 681–689, 2017.
- CÂMARA, A. P.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. C. L.; et al. Changes in rainfall patterns enhance the interrelationships between climate and wood traits of eucalyptus. **Forest Ecology and Management**, v. 485, 2021.
- CAMARGO, A. P. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. 3.ed ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1971.
- CARNEIRO, A. DE C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375–381, 2014.

CASTRO, V. R.; CHAMBI-LEGOAS, R.; FILHO, M. T.; et al. The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis*. Scientific Reports. **Nature Research**, abr. 2020.

CHERELLI, S. G.; SARTORI, M. M. P.; PRÓSPERO, A. G.; BALLARIN, A. W. Heartwood and sapwood in eucalyptus trees: non-conventional approach to wood quality. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 1, p. 425–438, 2018.

DOWNES, G.; HARWOOD, C.; WASHUSEN, R.; et al. Wood properties of *Eucalyptus globulus* at three sites in Western Australia: effects of fertiliser and plantation stocking. **Australian Forestry**, v. 77, n. 3–4, p. 179–188, 2014.

EBERHARDT, T. L.; SO, C. L.; LEDUC, D. J. Wood property maps showing wood variability in mature longleaf pine: Does getting old change juvenile tendencies? **Wood and Fiber Science**, v. 51, n. 2, p. 193–208, 2019. Society of Wood Science and Technology.

EPE. Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021. Rio de Janeiro, 2022.

EPSKAMP, S.; CRAMER, A. O. J.; WALDORP, L. J.; SCHMITTMANN, V. D.; BORSBOOM, D. qgraph: Network Visualizations of Relationships in Psychometric Data. **Journal of Statistical Software**, v. 48, n. 4, 2012.

ESRI. **ArcGIS** Desktop: release 10. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2010.

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2007.

FARIA, W. S.; RESENDE, D. R.; GUIMARÃES, I.; PRÓTASIO, T.; GUIMARÃES JÚNIOR, I. Avaliação das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* tratado e não tratado com preservativo. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, v. 11, n. 21, 2015.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, F. L.; CHAN, B. L. **Análise de Dados: Modelagem Multivariada para Tomada de Decisões**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FOELKEL, C. E.; MORA, E.; MENOCELLI, S. **Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose**. In: **CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO**, 6., Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão, p. 719–728, 1990.

GALVÃO, P.; HIRATA, R.; CONICELLI, B. Estimating groundwater recharge using GIS-based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 10, p. 398, 2018.

- GOUVÊA, A. DE F. G.; GOMES, C. M.; MATOS, L. M.; et al. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose Kraft. **Ciência da Madeira** (Braz. J. Wood Sci.), v. 3, p. 102–114, 2012.
- HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HEIN, P. R. G.; CHAIX, G.; CLAIR, B.; BRANCHERIAU, L.; GRIL, J. Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along *Eucalyptus* trunks grown under contrasting growth conditions. *Trees - Structure and Function*, **Springer Verlag**. v. 30, n. 3, p. 871–882, 2016.
- HOTELLING, H. The General Welfare in Relation to Problems of Taxation and of Railway and Utility Rates. **Econometrica**, v. 6, n. 3, p. 242, 1938.
- HOTELLING, H. **The Impact of R. A. Fisher on Statistics**. *Journal of the American Statistical Association*, v. 46, n. 253, p. 35, 1951.
- IBÁ. **Anuário estatístico da IBA 2022**: Ano base 2021. Brasília, Brasil., 2022.
- KNAPIC, S.; PIRRALHO, M.; LOUZADA, J. L.; PEREIRA, H. Early assessment of density features for 19 *Eucalyptus* species using X-ray microdensitometry in a perspective of potential biomass production. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 1, p. 37–49, 2014.
- KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 3, p. 1339–1344, 2011.
- LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; OLIVEIRA, A. D. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus camaldulensis* no sentido longitudinal dos caules. *Ciência e Prática*, p. 123–127, 1992.
- LONGUETAUD, F.; MOTHE, F.; FOURNIER, M.; et al. Within-stem maps of wood density and water content for characterization of species: a case study on three hardwood and two softwood species. *Annals of Forest Science*, v. 73, n. 3, p. 601–614, 2016.
- MENESES, V. A.; 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/Forest Sciences**, v. 43, n. 105, p. 101–116, 2015.
- MORA, C. R.; SCHIMLECK, L. R. Determination of within-tree variation of Pinustaedawood properties by near infraredspectroscopy. Part 2: Whole tree woodproperty maps. **Appita Journal**, v. 62, n. 3, p. 232–239, 2009.
- MOUTINHO, V. H. P. **Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão**. Tese

(Doutorado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2013.

PADUA, F. A. DE. Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T Blake. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Lavras, 2009.

PEREIRA, K. D.; CARNEIRO, A. P. S.; CARNEIRO, A. DE C. O.; SANTOS, G. R. DOS; FIALHO, L. DE F. Função discriminante de Fisher para classificação do carvão vegetal de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, 2021.

PESTANA, M. H.; GAGEIRO, J. N. **Análise de dados para as Ciências Sociais. A complementaridade do SPSS**. Lisboa: Edições Sílabo, 2003.

PILLAI, K. C. S. Some new test criteria in multivariate analysis. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 26, p. 117–21, 1955.

POERSCH, N. L.; FILHO, L. R. T. F.; MIGUEL, E. P.; et al. Influence of climate variables in the initial growth of *Corymbia citriodora* and different species of eucalyptus. **Bioscience Journal**, p. 1452–1464, 2017.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2022.

RENCHER, A C. **Methods of multivariate analysis**. 2<sup>th</sup> ed., Wiley-Interscience, 2002.

ROY, S. N. On a Heuristic Method of Test Construction and its use in Multivariate Analysis. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 24, n. 2, p. 220–238, 1953.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Arvore**, v. 36, n. 5, p. 971–980, 2012.

SÃO TEAGO, G. B. **Qualidade das madeiras de acácia e eucalipto provenientes de cultivo misto visando a produção de celulose**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Jerônimo Monteiro: Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

SCHIMLECK, L. R.; MORA, C. R.; JORDAN, L.; et al. Determination of within-tree variation of Pinus taeda wood properties by near infrared spectroscopy. Part 1: Development of multiple height calibrations. **Appita Journal**, 2009.

SERENINI, L.; DE MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; PIMENTA, A. S. Wood quality of six eucalyptus clones planted in northern Mato Grosso state, Brazil. **Wood Research**, v. 65, n. 4, p. 543–554, 2020.

SETTE JUNIOR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. S.; CHAGAS, M. P.; LACLAU, J. P. Efeito da aplicação do potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* HILL EX. MAIDEN, aos 24 meses de idade. **Floresta (Online)**, v. 39, p. 535–546, 2009.

SHARMA, S. **Applied Multivariate Techniques**. New York: John Wiley and Sons Inc, 1996.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light, and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 2004.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; ALBINO, J. C.; MORITA, M. Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 14, p. 28–28, 1987.

TAN, B.; GRATTAPAGLIA, D.; WU, H. X.; INGVARSSON, P. K. Genomic relationships reveal significant dominance effects for growth in hybrid Eucalyptus. **Plant Science**, v. 267, p. 84–93, 2018.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology**, n. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1), p. 104, 1955.

TOMAZELLO FILHO, M. Application of technique in nondestructive evaluation of eucalyptus wood. Maderas: **Ciencia y Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 139–150, 2008.

TRUGILHO, P. F.; DA SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; et al. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de Eucalyptus. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 178–186, 2005.

VEGA, M.; HAMILTON, M.; DOWNES, G.; HARRISON, P. A.; POTTS, B. Radial variation in modulus of elasticity, microfibril angle and wood density of veneer logs from plantation-grown *Eucalyptus nitens*. **Annals of Forest Science**, v. 77, n. 65, 2020.

VIDAURRE, G. B.; SILVA, J. G. M.; MOULIN, J. C.; CARNEIRO, A. C. O. **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. Vitória: EDUFES, 2020.

WILKS, S. S. Certain generalizations in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 24, p. 471–494, 1932.

ZOBEL, B J; JETT, J. B. **Genetics of wood production**. Berlin, 1995.

### 3 EFEITO DE DENSIDADE BÁSICA, SÍTIOS E MATERIAL GENÉTICO SOBRE A ALOMETRIA DE EUCALIPTO

#### RESUMO

As proporções de biomassa nos diferentes componentes variam entre espécies, fase de desenvolvimento e ambiente de crescimento, refletindo, assim, na sua alometria. As equações alométricas são amplamente utilizadas para estimar a biomassa e as principais variáveis utilizadas são DAP e altura, porém, na demanda por desenvolver equações genéricas com diferentes espécies em ambientes distintos, a densidade torna-se uma potencial variável a ser incorporada nos modelos. Quatro clones híbridos de *Eucalyptus* spp. foram estudados, em idades de 97 a 110 meses, em duas regiões de Minas Gerais, Brasil. Cinco árvores por material genético e região para determinar a biomassa aérea (fuste, galhos, casca e folhas) e a densidade básica média foram amostradas. Os estimadores dos componentes da biomassa aérea (lenho, casca, galhos e folhas) e total foram obtidos por diferentes técnicas de ajuste de equações: ajuste independente, ajuste simultâneo (NSUR) e ajuste simultâneo com pesos (WNSUR), e por diferentes metodologias relacionadas às variáveis predictoras: DAP e altura (Procedimento 1); DAP, altura e densidade básica (Procedimento 2); DAP, altura, densidade básica e variáveis *dummy* para região e clone (Procedimento 3). A hipótese formulada é: “A inclusão da covariável densidade básica integrada ao efeito do clone e região, por meio de variáveis *dummy* no sistema de equação de biomassa, apresentam melhor desempenho preditivo e eficiência dos estimadores no sistema de equações com apenas variáveis alométricas.” As técnicas de ajuste simultâneo NSUR e WNSUR foram eficientes para desenvolver um sistema de equações de boa qualidade e precisão. A variável densidade melhora a qualidade preditiva em sistemas de equações genéricas de biomassa e incorpora o efeito de clone na avaliação da biomassa. O efeito de sítio na avaliação de biomassa do lenho ficou evidente, sendo de maior magnitude no clone C1.

Palavras-chave: Ajuste simultâneo, Ajuste simultâneo com pesos, Equações alométricas, Regressão stepwise.

## ABSTRACT

The proportions of biomass in different components vary between species, stages of development, and growth environments, thus reflecting on their allometry. Allometric equations are widely used to estimate biomass, and the main variables used are DBH (diameter at breast height) and height. However, in the demand for developing generic equations with different species in distinct environments, density becomes a potential variable to be incorporated into the models. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effect of basic density, sites, and genetic material on eucalyptus allometry. Four hybrid clones of *Eucalyptus* spp., aged 97 to 110 months, were studied in two regions of Minas Gerais, Brazil. Five trees by genetic material and region to determine the aerial biomass (stem, branches, bark, and leaves) and the average basic density were sampled. The estimates of the components of aerial biomass (wood, bark, branches, and leaves) and total biomass were obtained by different equation fitting techniques: independent adjustment, simultaneous adjustment (NSUR) and simultaneous adjustment with weights (WNSUR), by different methodologies related to the predictive variables: DBH and height (Procedure 1); DBH, height and basic density (Procedure 2); DBH, height, basic density and dummy variables for region and clone (Procedure 3). The formulated hypothesis is: "The inclusion of the covariable basic density integrated to the clone and region effect, through dummy variables in the biomass equation system, presents better predictive performance and efficiency of the estimates in the system of equations with only allometric variables." The simultaneous fitting techniques NSUR and WNSUR were efficient to develop a system of equations of good quality and accuracy. The density variable improves predictive quality in a generic biomass system of equations and incorporates the clone effect on biomass evaluation. Site effect was evidenced in biomass evaluation of wood, being of greater magnitude in clone C1. A clone effect was observed in density means and radial and longitudinal variation. The region had a smaller effect on density means and in radial and longitudinal variation, but with differences in the degree of genotype x environment association between clones.

Keywords: Simultaneous adjustment, Allometric equations, Radial variation, Longitudinal variation, Wood quality.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, os setores público e privado vem tomando medidas mitigatórias que corresponde as mudanças climáticas ocorridas pela utilização de combustíveis não renováveis e pelo desmatamento de florestas naturais. Uma das alternativas para garantir o suprimento energético e redução dos impactos ambientais é o incentivo à expansão de áreas com florestas plantadas para produção de biomassa, com destaque no plantio de espécies do gênero *Eucalyptus*, que atualmente atinge mais de 22,57 milhões de hectares espalhados pelo mundo (Zhang e Wang, 2021). O Brasil detém 33,36% do plantio global, o que corresponde cerca de 7,53 milhões de hectares plantados no território brasileiro (IBÁ, 2022).

No Brasil, as florestas de eucalipto são as mais produtivas do mundo, chegando a produção de  $38,9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  em plantios de curta rotação (IBÁ, 2022). A alta produtividade não é só um atrativo para as atividades econômicas, mas também pelo seu impacto direto na fixação de carbono atmosférico, quando este é incorporado na biomassa por meio da fotossíntese, sendo, por esta razão, um elemento de extrema importância na estrutura das árvores, armazenado nos diversos compartimentos, como folhas, galhos, raízes e fuste (SOUZA e FIORENTIN, 2013).

As proporções de biomassa nos diferentes componentes variam entre espécies, fase de desenvolvimento e ambiente de crescimento (LARCHER, 1986), refletindo, assim, na sua alometria. A forma mais comum de estudar os componentes da biomassa é utilizar equações ajustadas por meio de regressão linear ou não linear, a partir de variáveis preditoras de fácil obtenção e que apresentem alta correlação com a variável preditiva, pois a obtenção da biomassa arbórea é um processo laborioso e de alto custo (TRAUTENMÜLLER et al., 2021).

Para ajustar equações apropriadas e de boa qualidade para avaliação da biomassa, alguns pressupostos devem ser atendidos. O primeiro é quanto a aditividade dos estimadores, ou seja, a somatória das estimativas dos componentes deve ser igual ao valor da estimativa da biomassa total (KOZAK, 1970; CUNIA e BRIGGS, 1984; REED e GREEN, 1984). Os métodos mais comuns e mais utilizados para forçar aditividade das estimativas são os métodos SUR (*seemingly unrelated regressions*), apresentado por Parresol (1999), para

sistema de equações lineares, e NSUR (*nonlinear seemingly unrelated regressions*) para sistema de equações não lineares (PARRESOL, 2001). Entretanto, grande parte dos fenômenos naturais observados apresentam comportamento não linear, razão pela qual a utilização de modelos não lineares produz estimativas mais acuradas do que os lineares (SANTOS, 1996).

Uma característica comum observada na modelagem da biomassa arbórea é que os resíduos se distribuem de forma heterogênea em relação às variáveis preditivas ou preditoras (SAINT-ANDRÉ et al., 2005; BASUKI et al., 2009; BI et al., 2010; SANQUETTA et al., 2015a; ZHAO et al., 2015). As formas mais comuns de identificar a heteroscedasticidade são: primeiramente de forma visual, elaborando gráficos que apresentem os resíduos em função da variável independente, ou aplicando-se testes estatísticos, sendo o mais comum o teste de White (1980).

Uma vez identificada, a heteroscedasticidade da variância dos resíduos pode ser corrigida mediante transformação logarítmica ou por meio da modelagem da estrutura da variância (BEHLING et al., 2018). Por meio da estrutura da variância são estabelecidos pesos e, em seguida, recomenda-se reajuste do sistema de equações por meio do estimador *weighted-nonlinear seemingly unrelated regressions*-WNSUR (PARRESOL, 2001).

Outra característica importante a ser considerada é o desempenho dos estimadores de biomassa, que é analisado pelo comportamento dos coeficientes das equações e as estatísticas de precisão, como, por exemplo: coeficiente de determinação ajustado (STEEL et al., 1996) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), entre outros. Por fim, a última característica relevante em equações de biomassa é sua eficiência, que implica em menor variância obtida das equações, o que determina menores intervalos de confiança da estimativa das variáveis dependentes (PARRESOL, 1999, 2001; SANQUETTA et al., 2015a; ZHAO et al., 2015).

Na literatura há vários estudos envolvendo o ajuste simultâneo de equações de biomassa de *Eucalyptus*, atendendo aos pressupostos da modelagem de biomassa (BI et al., 2004; ANTÓNIO et al., 2007; ÁLVAREZ GONZÁLEZ et al., 2012; GERTRUDIX et al., 2012; BI et al., 2015; VEGA-NIEVA et al., 2015; HERNÁNDEZ-RAMOS et al., 2017; HIRIGOYEN et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021) e utilizando as variáveis DAP e altura como preditoras,

porém a densidade básica pode ser uma interessante variável a ser incorporada ao modelos de biomassa, já que a densidade básica é a relação do peso seco e volume saturado Smith (1954), o que afeta diretamente na produção de biomassa. Alguns estudos apresentam ganhos de precisão ao incorporar a densidade em equações de biomassa (CHAVE et al., 2014; COUTINHO et al., 2018; LIMA et al., 2017, 2019), mas outros autores como Coutinho et al. (2021) e Venturoli e Sanquetta (2019) não observaram melhoria de qualidade preditiva dos estimadores. Neste contexto, mais estudos são importantes na avaliação do efeito da densidade básica nas equações de biomassa para diferentes espécies florestais.

A maioria das empresas florestais possui uma variedade de materiais genéticos e em diferentes ambientes, o que torna inviável a utilização de equações de biomassa específicas, tanto do ponto de vista da amostragem, quanto da praticidade nas rotinas de inventários florestais. Nessa perspectiva, uma alternativa é o uso de variáveis *dummy* em regressão, permitindo, assim, incorporar efeitos de sítio e de clones em uma única equação de biomassa. Além disso, associado ao método de seleção *stepwise*, é possível investigar a possibilidade de as relações entre a biomassa (total ou por componente) e variáveis preditoras (DAP, HT e densidade) serem as mesmas para sítios e clones.

A hipótese formulada é: “A inclusão da covariável densidade básica integrada ao efeito do clone e região, por meio de variáveis *dummy* no sistema de equação de biomassa, apresentam melhor desempenho preditivo e eficiência dos estimadores em relação ao sistema de equações com apenas variáveis alométricas.”

### 3.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de densidade básica, sítios e material genético sobre a alometria de eucalipto.

### 3.3 METODOLOGIA

A caracterização da área de estudo e a coleta de dados estão presentes nos subtópicos 2.1 e 2.2 do Capítulo anterior desta tese.

### 3.3.1 Coleta de dados

A obtenção da biomassa aérea dos indivíduos foi efetuada primeiramente para o componente fuste (madeira do fuste + casca) e copa (galhos + folhas), segundo a metodologia apresentada por Picard et al. (2012). O peso de cada componente foi obtido com uma balança digital (Portable Electronic Scale) (FIGURA 3.1).

FIGURA 3.1 – PESAGEM DO COMPONENTE COPA (A); PESAGEM DO FUSTE (MADEIRA + CASCA) (B).



FONTE: O autor (2023).

Para a determinação da biomassa seca do fuste, foram retirados 4 discos de 3 centímetros de espessura nas posições longitudinais para a altura total: base (0%), DAP, meio (50%) e topo (95%). Em seguida, os discos foram pesados separadamente em dois componentes (madeira e casca) em uma balança digital com precisão de 0,1 g.

A biomassa seca da copa foi determinada por amostragem de três galhos vivos tomada em três estratos distintos (estrato inferior, médio e superior da copa), em que as folhas foram separadas dos galhos e pesadas, conforme a FIGURA 3. 2-A. A partir dessa amostra, coletou-se uma sub-amostra de no máximo 500g dos componentes galhos e folhas (FIGURA 3. 2).

FIGURA 3. 2 – AMOSTRAS DE GALHOS E FOLHAS (A); SUBAMOSTRA DE FOLHAS (B); SUBAMOSTRA DE GALHOS (C); AMOSTRAS DE DISCO DE LENHO E CASCA (D).



FONTE: O autor (2023).

Após a mensuração e pesagem desses componentes, as amostras foram transportadas para uma estufa com circulação forçada de ar a  $103 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  para a realização do cálculo da biomassa seca (Eq. 3. 1).

$$B_m = \frac{MU_{mi}MS_{mi}}{MUA_{mi}} \quad \text{Eq. 3. 1}$$

Em que:  $B_m$  é a biomassa seca do  $m^{\text{th}}$  componente lenho, casca, galhos ou folhas em kg, para a  $t^{\text{th}}$  observação;  $MU_{mi}$  é a massa fresca do  $m^{\text{th}}$  componente lenho, casca, galho ou folha em kg, para a  $t^{\text{th}}$  observação;  $MS_{mi}$  é a massa seca da amostra do  $m^{\text{th}}$  componente lenho, casca, galhos ou folhas, em kg, para a  $t^{\text{th}}$  observação;  $MUA_{mi}$  é a massa fresca da amostra do  $m^{\text{th}}$  componente, lenho, casca, galhos ou folhas, em kg, para a  $t^{\text{th}}$  observação.

### 3.3.2 Ajuste da equação de biomassa

As estimativas de biomassa total e por componentes foram primeiramente obtidas por modelos alométricos não lineares em função do diâmetro ou diâmetro e altura (Eq. 3.2 ao 3.4).

$$y = \beta_0 \text{DAP}^{\beta_1} \quad (\text{HUSCH et al., 2003}) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$y = \beta_0 (\text{DAP}^2 \text{HT})^{\beta_1} \quad (\text{SPURR, 1952}) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$y = \beta_0 \text{DAP}^{\beta_1} \text{ht}^{\beta_2} \quad (\text{SCHUMACHER e HALL, 1932}) \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Em que:  $y$  é a biomassa do componente (lenho, casca, galhos ou folhas) e total (kg), DAP é o diâmetro à altura do peito (cm), HT é a altura total (m) e  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os parâmetros dos modelos.

O próximo passo foi adicionar a densidade básica média ponderada do lenho ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) (Eq. 2.2) como variável independente para avaliar o ganho no desempenho das equações preditivas dos componentes da biomassa (Eq. 3.5 a 3.7).

$$y = \beta_0 \text{DAP}^{\beta_1} \rho^{\beta_2} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

$$y = \beta_0 (\text{DAP}^2 \text{HT})^{\beta_1} \rho^{\beta_2} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$$y = \beta_0 \text{DAP}^{\beta_1} \text{HT}^{\beta_2} \rho^{\beta_3} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Em que:  $y$  é a biomassa do componente (lenho, casca, galhos ou folhas) e total (kg), DAP é o diâmetro à altura do peito (cm), HT é a altura total (m),  $\rho$  é a densidade básica ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) e  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são os coeficientes dos modelos.

Em seguida, o efeito do clone e da região nos parâmetros foram investigados incluindo variáveis *dummy* no modelo linearizado de SCHUMACHER e HALL (1932) adicionada a variável densidade (Eq. 3.8), em que:

$X_1 = 1$  para Região 1,  
= 0 para outra região;

$X_2 = 1$  para Região 2,  
= 0 para outra região.

$X_3 = 1$  para o clone C1,  
= 0 para outros clones;

$X_4 = 1$  para o clone C2,  
= 0 para outros clones;

$X_5 = 1$  para o clone C3,  
= 0 para outros clones;

$X_6 = 1$  para o clone C4,

= 0 para outros clones;

$$\begin{aligned} \ln(y) = & \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP} + \beta_2 \ln \text{HT} + \beta_3 \ln(\rho) + \beta_4 X_1 + \dots + \\ & \beta_9 X_6 + \beta_{10} \ln \text{DAP} * X_1 + \dots + \beta_{15} \ln(\text{DAP}) * X_6 + \beta_{16} \ln(\text{HT}) * X_1 + \dots + \\ & \beta_{21} \ln(\text{HT}) * X_6 + \beta_{22} \ln(\rho) * X_1 + \dots + \beta_{27} \ln(\rho) * X_6 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Em que: y é a biomassa do componente (lenho, casca, galhos ou folhas) e total (kg), DAP é o diâmetro à altura do peito (cm), HT é a altura total (m),  $\rho$  é a densidade básica ( $\text{g.cm}^{-3}$ ),  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$  são as variáveis *dummy* e  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{27}$  são os parâmetros do modelo.

A técnica de seleção das variáveis independentes nos modelos foi efetuada por meio do método *Stepwise regression* (DRAPER e SMITH, 1981), que consiste em selecionar as variáveis explicativas que apresentam maior coeficiente de correlação com a variável preditora de forma que: a primeira variável que entra no modelo é a mais correlacionada com variável biomassa e as demais variáveis serão inseridas na ordem de maior correlação parcial, porém, após cada nova variável ser adicionada, os modelos passam por um teste F para avaliar se a sua contribuição foi significativa a 95% de probabilidade Scolforo (2005).

A aditividade das equações de biomassa foi garantida por meio do ajuste simultâneo das equações dos componentes de biomassa pela técnica de Regressão Aparentemente não Relacionada – *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression* (NSUR), conforme (Parresol, 2001b). Desta forma, a estimativa da biomassa total torna-se uma equação em função de todas as variáveis independentes presentes nas equações de cada componente, colocando, assim, restrições sobre os parâmetros (SANQUETTA et al., 2015b), conforme o modelo definido nas equações 3.9 a 3.12. Posteriormente, foi aplicado o teste de homogeneidade dos resíduos ( $\alpha < 0,05$ ) nas equações por meio do teste de White (1980).

$$\hat{y}_{\text{Lenho}} = f_{\text{Lenho}}(X, \beta) + \varepsilon_{\text{Lenho}} \quad \text{Eq. 3.9}$$

$$\hat{y}_{\text{Casca}} = f_{\text{Casca}}(X, \beta) + \varepsilon_{\text{Casca}} \quad \text{Eq. 3.10}$$

$$\hat{y}_{\text{Galho}} = f_{\text{Galho}}(X, \beta) + \varepsilon_{\text{Galho}} \quad \text{Eq. 3.11}$$

$$\hat{y}_{\text{Folha}} = f_{\text{Folha}}(X, \beta) + \varepsilon_{\text{Folha}} \quad \text{Eq. 3.12}$$

$$\hat{y}_{\text{Total}} = \hat{y}_{\text{Lenho}} + \hat{y}_{\text{Casca}} + \hat{y}_{\text{Galho}} + \hat{y}_{\text{Folha}} + \varepsilon_{\text{Total}} \quad \text{Eq. 3.13}$$

Em que:  $\hat{y}_{\text{Lenho}}$  é a estimativa da biomassa do tronco;  $\hat{y}_{\text{Casca}}$  é a estimativa da biomassa da casca;  $\hat{y}_{\text{Galho}}$  é a estimativa da biomassa dos galhos;  $\hat{y}_{\text{Folha}}$  é a estimativa da biomassa das folhas;

$\hat{y}_{Total}$  é a estimativa da biomassa total;  $X$  são as variáveis de entrada dos modelos;  $\beta$  são os coeficientes dos modelos e  $\varepsilon_i$  são os respectivos termos de erro dos modelos.

Para as equações cujos resíduos foram heteroscedásticos os coeficientes das equações ajustadas independentemente ou por NSUR foram utilizados para modelar a variância do erro e obter pesos (HARVEY, 1976; PARRESOL, 2001). Sequencialmente, os mesmos sistemas de equações foram ajustados pelo método de Regressão Aparentemente não Relacionada Ponderada (*Weight-Nonlinear Seemingly Unrelated Regressions* – WNSUR), seguido por aplicação do teste de White.

O processamento dos dados foi efetuado utilizando a função PROC model do SAS® *software* (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM [SAS], 2002) com o Algoritmo de *Levenberg–Marquardt*. A qualidade dos ajustes foi avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado –  $R^2_{aj}$ , raiz quadrada do erro médio (RMSE), gráfico de dispersão dos resíduos e gráfico das variáveis dependentes observadas e estimadas.

$$R^2_{aj} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (w_c - w_{c-est})}{\sum_{i=1}^n (w_c - \bar{w}_c)} \right) \left( \frac{n-1}{n-p} \right) \quad (\text{Eq. 3.14})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_c - w_{c-est})^2}{n - p}} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Em que:  $RMSE$  é a raiz quadrada do erro médio (Kg),  $R^2_{aj}$  é o coeficiente de determinação ajustado,  $w_{c-est}$  é a biomassa seca estimada do componente  $c$ ,  $n$  é o número de observações,  $p$  é o número de parâmetros do modelo,  $\bar{w}_c$  é o valor médio da variável dependente observada para o componente  $c$  e  $c$  refere-se à biomassa do componente ou total.

Em resumo, o ajuste dos modelos independentes de biomassa parcial e total e a utilização do método NSUR e WNSUR foram aplicados em 3 diferentes procedimentos:

- Procedimento 1: ajustes por meio das variáveis preditoras diâmetro e altura.
- Procedimento 2: ajustes por meio das variáveis preditoras diâmetro, altura e densidade básica.
- Procedimento 3: ajustes por meio das variáveis preditoras diâmetro, altura, densidade básica e inclusão de variáveis *dummy*.

Após a seleção do sistema de equações mais apropriado e de boa qualidade para estimativa da biomassa, foi avaliado efeito de clone e sítios na alocação da biomassa dos componentes aéreos: lenho, casca, galhos e folhas.

### 3. 4 RESULTADOS

#### 3.4.1 Estatística descritiva

Na TABELA 3.1 estão apresentados os resultados das estatísticas descritivas das variáveis independentes e dependentes consideradas na modelagem da biomassa de *Eucalyptus* spp. na Região 1 e Região 2. Com base nas medições de 5 indivíduos amostrados por clone em cada sítio, os maiores diâmetros e alturas médios foram encontrados no clone C2 em ambos os locais estudados. Quanto à densidade básica média ponderada, se destaca o clone C4, que apresenta a densidade no mínimo 11% maior que nos demais clones. O clone C3 apresentou biomassa dos componentes e total abaixo dos demais, apesar de as idades dos povoamentos serem próximas.

TABELA 3.1 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS, VOLUME E DOS COMPONENTES NA BIOMASSA SECA E TOTAL INDIVIDUAL.

Região	Clone		DAP (cm)	HT (m)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Fuste (kg)	Casca (kg)	Galho (kg)	Folha (kg)	Total (kg)
Região 1	C1	$\bar{x}$	14,13	22,62	0,505	102,67	15,96	4,14	2,40	125,18
		s	±2,13	±1,68	±0,026	±66,31	±9,09	±3,98	±1,86	±81,16
Região 1	C2	$\bar{x}$	14,38	23,20	0,529	96,58	12,93	1,76	1,91	113,18
		s	±2,12	±3,49	±0,024	±38,71	±4,34	±1,41	±0,73	±44,43
Região 1	C3	$\bar{x}$	11,41	20,93	0,520	58,38	7,15	2,24	1,77	69,54
		s	±2,50	±2,37	±0,023	±31,73	±4,22	±2,12	±0,97	±38,71
Região 1	C4	$\bar{x}$	12,25	22,75	0,582	91,54	10,70	4,41	2,88	109,53
		s	±3,30	±2,91	±0,016	±57,60	±6,92	±4,89	±2,66	±71,50
Região 2	C1	$\bar{x}$	12,90	22,97	0,490	74,91	11,92	1,45	1,08	89,36
		s	±2,65	±3,11	±0,043	±31,87	±4,14	±0,75	±0,60	±36,81
Região 2	C2	$\bar{x}$	15,04	25,44	0,525	118,80	13,21	2,07	1,43	135,51
		s	±2,74	±3,42	±0,028	±50,07	±50,07	±1,60	±1,23	±57,20

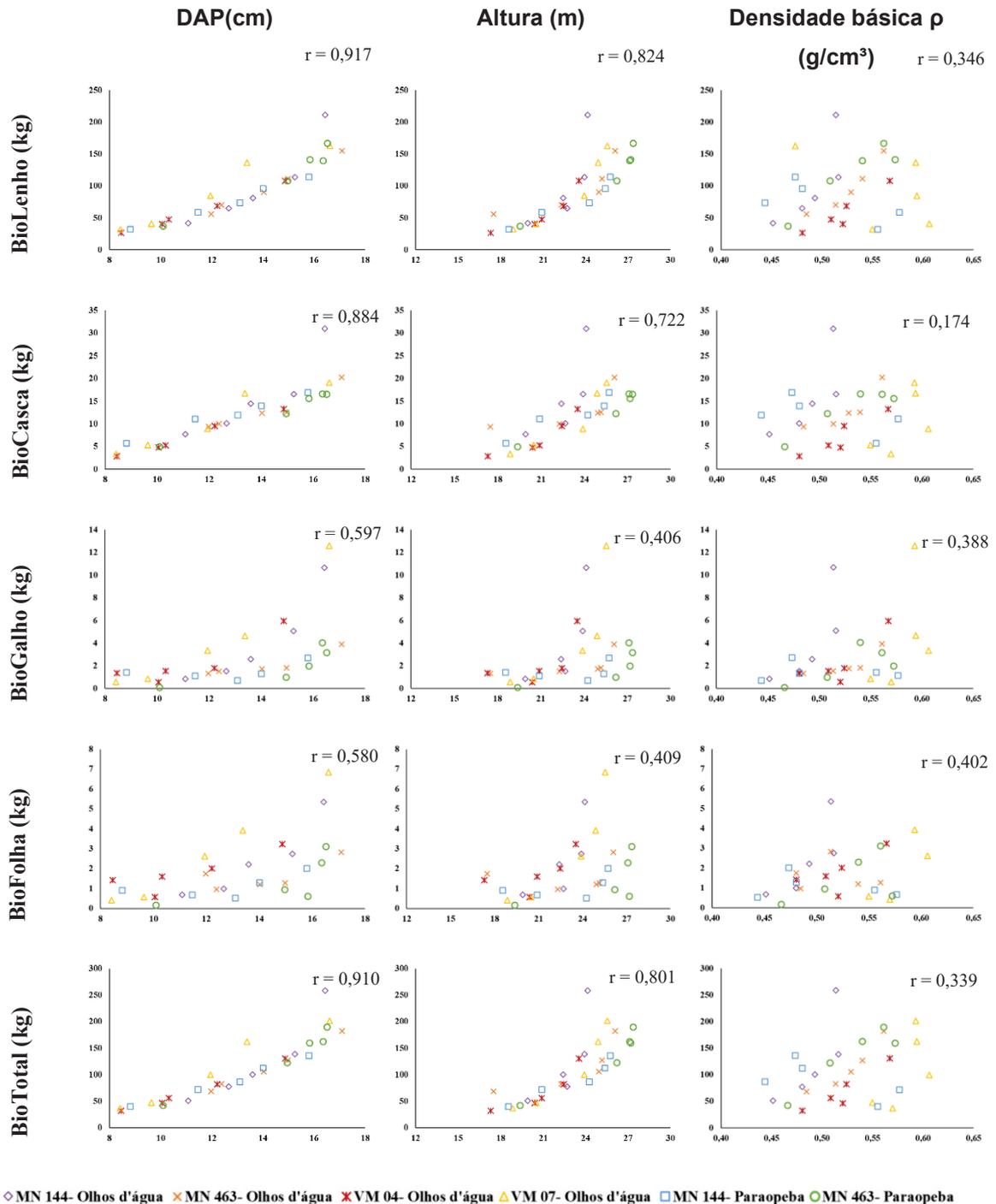
FONTE: O autor (2023).

Em que:  $\rho$  é a densidade básica (g.cm<sup>-3</sup>), DAP é o diâmetro à altura do peito (cm), HT é a altura total (m).

A correlação de Pearson (r) e os gráficos de correlação entre as variáveis preditoras DAP, altura e densidade básica, entre os componentes e total da biomassa seca individual para todo o conjunto de dados estão apresentados na FIGURA 3. 3 3.3. De modo geral, as variáveis DAP e altura apresentaram alta correlação positiva com a biomassa do lenho, casca e total ( $r > 0,8$ ), diferente do

que foi observado quanto à variável densidade ( $0,174 \geq r \leq 0,339$ ). Para biomassa de galhos e folhas, as variáveis dendrométricas e de densidade básica apresentaram correlação positiva moderada ( $0,388 \geq r \leq 0,597$ ), destacando-se o DAP como a melhor variável preditora.

FIGURA 3. 3 – GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (r) DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO.



FONTE: O autor (2023).

### 3.4.2 Procedimento 1- DAP e altura como variáveis de entrada

O desempenho das equações ajustadas para os componentes de biomassa e total, utilizando as variáveis DAP e altura como preditoras e provenientes dos ajustes independentes dos modelos e da regressão aparentemente não relacionada (NSUR e WNSUR) estão apresentadas na TABELA 3.2. Para as equações ajustadas de forma independente, a predição dos componentes de biomassa do lenho e total, apesar de apresentarem bons valores de  $R^2_{\text{ajustado}}$  (0,86 e 0,85, respectivamente), os coeficientes para a variável altura foram negativos. Isto é consequência da heteroscedasticidade dos resíduos, verificado pelo teste de White ( $\alpha < 0,05$ ), o que resulta em ineficiência nas estimativas dos componentes de biomassa. Já as estimativas dos componentes de biomassa da casca, dos galhos e das folhas, apresentaram menores valores de  $R^2_{\text{ajustado}}$  (0,73; 0,40 e 0,36, respectivamente) e RMSE (3,151; 2,188 e 1,213, respectivamente), mostrando-se que os coeficientes foram mais realísticos.

Ao ajustar as equações pela técnica NSUR, as estatísticas de ajuste e precisão resultaram em valores ligeiramente inferiores, porém o ajuste simultâneo melhorou o viés devido aos valores negativos dos coeficientes associados à altura e assegurou a aditividade dos componentes de biomassa.

Entretanto, quanto à homogeneidade dos resíduos, foi verificada pelo teste de White a 95% de probabilidade que os resultados apresentaram p-valores significativos para estimativas dos componentes fuste, galhos e biomassa total para as equações independentes e nas estimativas de fuste e galhos pelo sistema de modelos NSUR. A heterogeneidade dos resíduos também foi constatada, conforme pode-se observar na FIGURA 3.4, tendo sido detectado um padrão sistemático na distribuição dos erros, com aumento da dispersão dos resíduos, quando aumenta o peso da biomassa do fuste, dos galhos e da biomassa total.

Assim, procedeu-se o ajuste das equações com aplicação dos pesos obtidos pela estrutura de variância (WNSUR) proveniente dos coeficientes das equações simultâneas de cada componente e do ajuste independente da biomassa total.

Com aplicação do método WNSUR, foi corrigida a heteroscedasticidade dos resíduos, como mostrado na ilustração gráfica e no teste de White, porém ocorreu queda de precisão ao estimar a biomassa da casca, dos galhos, das folhas e do total, refletindo na redução dos valores de  $R^2_{ajustado}$ . Após a correção da heteroscedasticidade dos resíduos e da aditividade das equações de biomassa, o sistema de equações ainda não resultou em valores satisfatórios, pois o coeficiente associado à variável altura permaneceu negativo ao ser estimado o componente folhas, o que não é coerente com a correlação positiva verificada entre os dados de biomassa e altura (

FIGURA 3. 3), além da qualidade dos ajustes dos coprodutos galhos e folhas serem não satisfatórias.

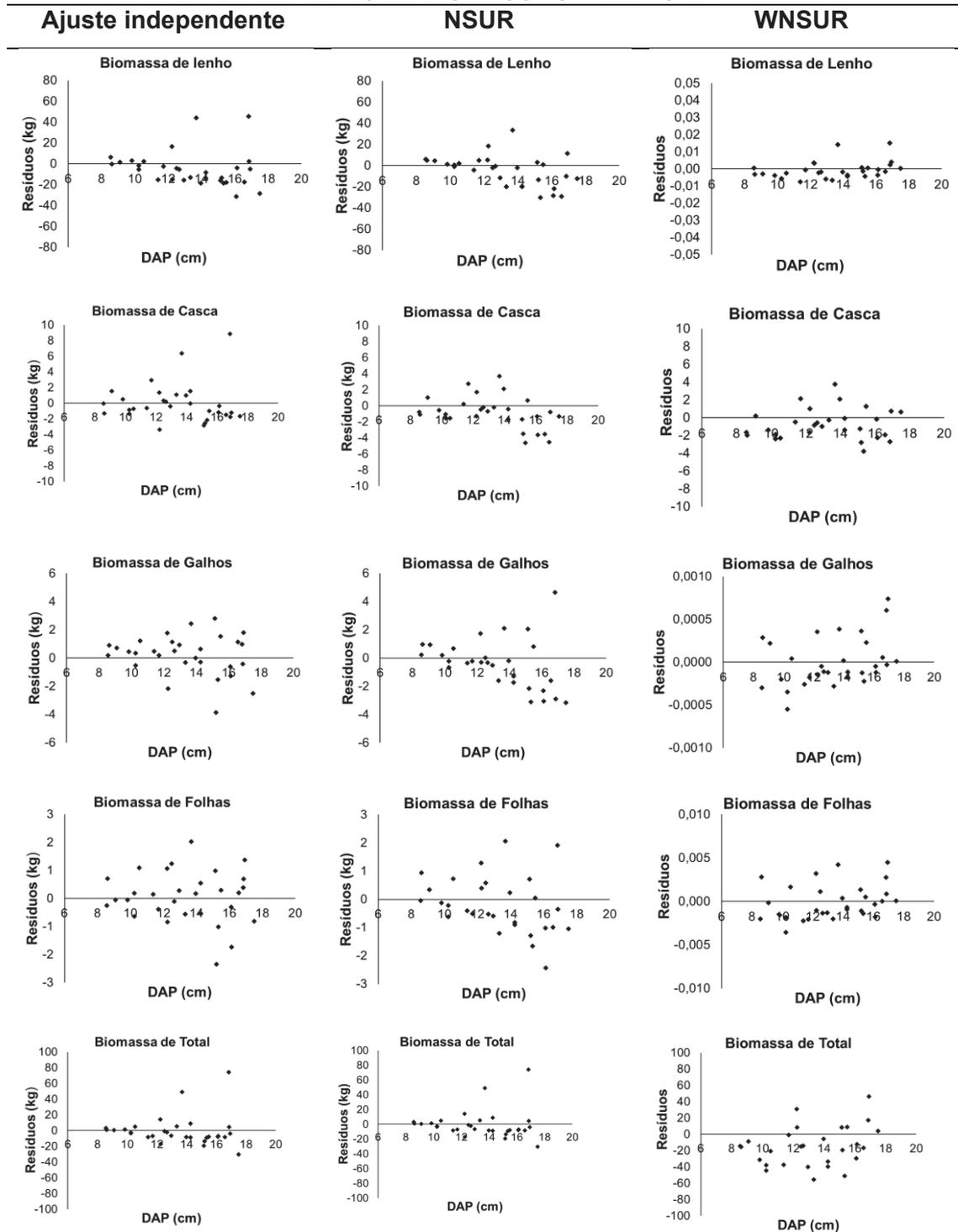
TABELA 3.2 – EQUAÇÕES AJUSTADAS UTILIZANDO VARIÁVEIS PREDITORAS DIÂMETRO E ALTURA, ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO E TESTE DE WHITE PARA AJUSTE INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO NSUR E WNSUR.

Técnica	Equação	R <sup>2</sup> aj	RMSE	White (valor p)
Independente	$BL = 0,0892DAP^{2,7869}HT^{-0,1068}$	0,86	17,659	0,0363*
	$BC = 0,0086(DAP^2HT)^{0,868}$	0,73	3,151	0,3539 <sup>ns</sup>
	$BG = 0,0001DAP^{4,4601}$	0,40	2,188	0,0199*
	$BF = 0,0007DAP^{2,9985}$	0,36	1,213	0,1884 <sup>ns</sup>
	$BT = 0,216013DAP^{3,024122}HT^{-0,5296}$	0,85	21,782	0,0288*
NSUR	$BL = 0,0009DAP^{1,4872}HT^{2,4072}$	0,82	21,265	0,0123*
	$BC = 0,0050(DAP^2HT)^{0,9309}$	0,73	3,110	0,3318 <sup>ns</sup>
	$BG = 0,0001DAP^{4,1223}$	0,42	2,153	0,0306*
	$BF = 0,0008DAP^{2,9541}$	0,38	1,192	0,1966 <sup>ns</sup>
	$BT = BL + BC + BG + BF$	0,76	28,112	0,0594 <sup>ns</sup>
WNSUR	$BL = 0,0164DAP^{1,5147}HT^{1,4712}$	0,82	20,448	0,0695 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{6,6399}HT^{-0,4252}}}$		0,005	
	$BC = 0,0195(DAP^2HT)^{0,7692}$	0,72	3,157	0,6297 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{(DAP^2HT)^{0,6518}}}$		0,193	
	$BG = 0,0163DAP^{1,9003}$	0,24	2,458	0,6458 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{6,6992}}}$		0,001	
	$BF = 0,4449DAP^{2,5137}HT^{-1,6465}$	0,32	1,252	0,9086 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{4,8687}}}$		0,002	
	$BT = BL + BC + BG + BF$	0,76	27,808	0,4503 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{8,1339}HT^{-7,2033}}}$		46,131	

FONTE: O autor (2023).

Em que: DAP é o diâmetro à altura do peito (cm), HT é a altura total (m), BL é a biomassa do lenho (kg), BC é a biomassa da casca (kg), BG é a biomassa dos galhos, BF é a biomassa das folhas (BF), BT é a biomassa total (kg),  $R^2_{aj}$  é o coeficiente de determinação ajustado e RMSE é a raiz quadrada do erro médio (kg).

FIGURA 3.4 – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS INDEPENDENTEMENTE E SIMULTANEAMENTE (NSUR E WNSUR) PARA OS COMPONENTES DE BIOMASSA E TOTAL, UTILIZANDO VARIÁVEIS DIÂMETRO E ALTURA COMO PREDITORAS.



FONTE: O autor (2023).

### 3.4.3 Procedimento 2 - DAP, altura e densidade usadas como variáveis de entrada

Os resultados quanto ao desempenho das equações ajustadas para biomassa seca do lenho, casca, folhas, galhos e total ao adicionar a densidade básica como covariável encontram-se apresentados na Tabela 3.3. As precisões das equações provenientes dos ajustes independentes e simultâneos (NSUR) foram ligeiramente melhores quando comparadas às estimativas da biomassa utilizando as variáveis DAP e altura como predictoras.

A técnica de ajuste por regressão não-linear aparentemente não relacionada (NSUR) foi utilizada para solucionar o pressuposto de aditividade dos componentes da biomassa, porém, como os resíduos da estimativa do componente lenho não se apresentaram homogêneos, verificada pela rejeição da hipótese do teste de White (1980), a estrutura da variância foi modelada por meio da técnica *weighted-nonlinear seemingly unrelated regressions* – WNSUR. A melhoria do sistema de equações foi alcançada por meio da aplicação dos pesos apenas para os resíduos das equações do lenho e da biomassa total, ou seja, o sistema de equações tornou-se mais simples e com qualidade preditiva.

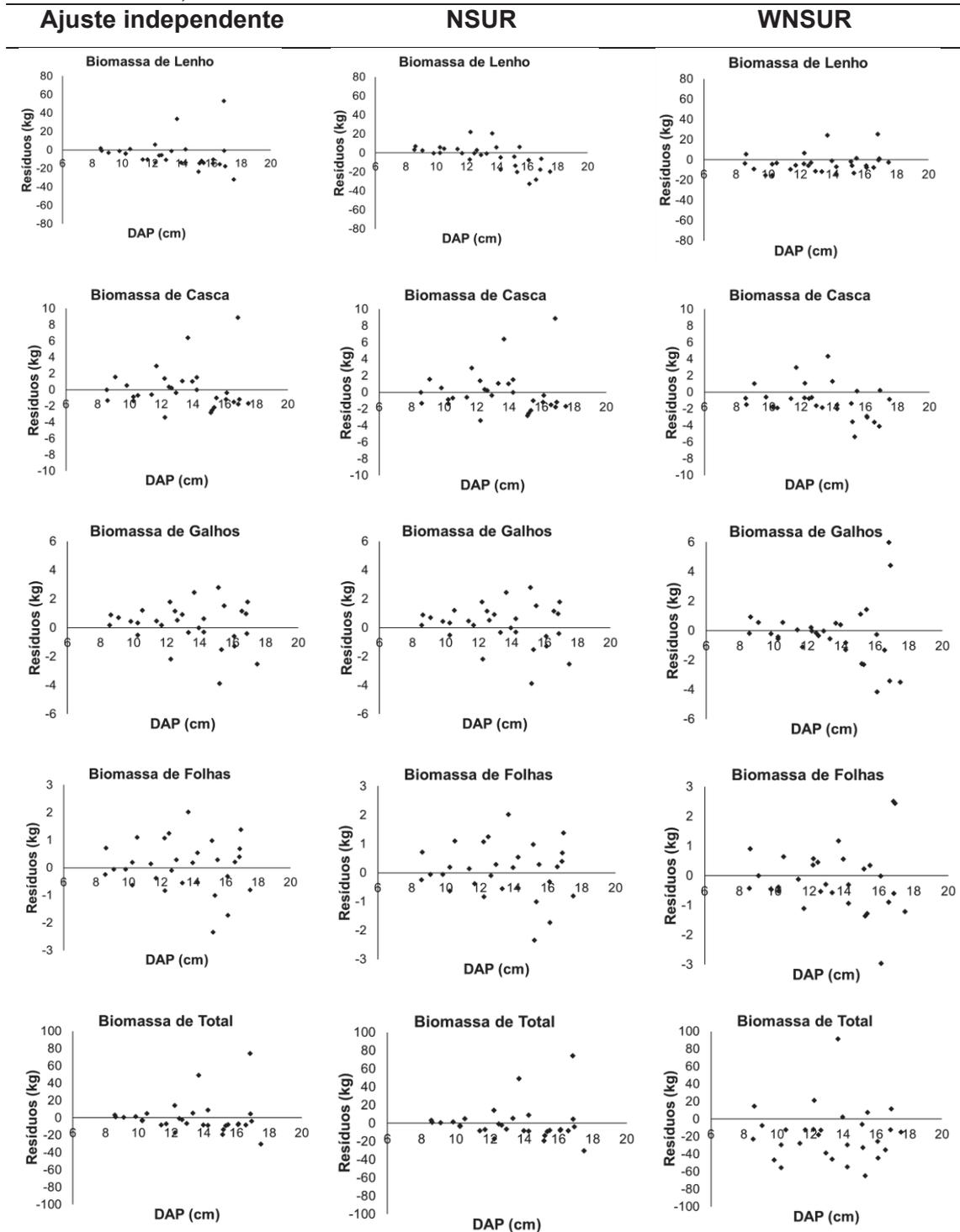
Analisando os gráficos de resíduos em valores absolutos (kg) das equações ajustadas para estimar os componentes de biomassa e total (FIGURA 3.5), não foi encontrada qualquer tendência nos erros para biomassa de casca, galhos e folhas, independente da técnica de ajuste utilizado. Já nos gráficos de dispersão do erro para lenho e biomassa total, observou-se nas equações ajustadas individualmente que houve maior dispersão dos resíduos à medida que aumentou os valores de biomassa no ajuste, apresentando tendenciosidade, porém esse viés foi corrigido com o ajuste simultâneo ponderado (WNSUR).

TABELA 3.3 – EQUAÇÕES AJUSTADAS UTILIZANDO VARIÁVEIS PREDITORAS DIÂMETRO, ALTURA E DENSIDADE BÁSICA, ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO E TESTE DE WHITE PARA AJUSTE INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO NSUR E WNSUR.

	Equação	R <sup>2</sup> aj	RMSE	White (p valor)
<b>Independente</b>	$BL = 0,3249DAP^{2,6506}HT^{-0,2196}\rho^{0,8949}$	0,87	16,721	0,0320*
	$BC = 0,0056(DAP^2HT)^{0,8929}\rho^{-0,3309}$	0,72	3,191	0,5385 <sup>ns</sup>
	$BG = 0,0075DAP^{3,2794}\rho^{4,3100}$	0,46	2,072	0,0547 <sup>ns</sup>
	$BF = 0,044962DAP^{2,339982}\rho^{3,7733}$	0,45	1,121	0,1601 <sup>ns</sup>
	$BT = 0,8162DAP^{2,8832}HT^{-0,6478}\rho^{0,9065}$	0,88	20,757	0,0261*
<b>NSUR</b>	$BL = 0,0024DAP^{1,4823}HT^{2,3381}\rho^{1,2006}$	0,81	21,014	0,0351*
	$BC = 0,003248(DAP^2HT)^{0,986584}\rho^{0,085657}$	0,72	3,191	0,4680 <sup>ns</sup>
	$BG = 0,007011DAP^{3,767533}\rho^{6,491811}$	0,47	2,059	0,0574 <sup>ns</sup>
	$BF = 0,056227DAP^{2,669229}\rho^{5,68305}$	0,45	1,119	0,2579 <sup>ns</sup>
	$BT = BL + BC + BG + BF$	0,74	29,081	0,4139 <sup>ns</sup>
<b>WNSUR</b>	$BL = 0,0178DAP^{1,5387}HT^{1,5901}\rho^{0,8026}$	0,84	18,761	0,3177 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{12,5387}HT^{-9,1908}\rho^{5,1746}}}$		9,258	
	$BC = 0,0038(DAP^2HT)^{0,9205}\rho^{-0,6007}$	0,73	3,125	0,4812 <sup>ns</sup>
	$BG = 0,00646DAP^{3,2275}\rho^{3,7825}$	0,49	2,020	0,0512 <sup>ns</sup>
	$BF = 0,0356DAP^{2,2531}\rho^{2,9727}$	0,47	1,096	0,1010 <sup>ns</sup>
	$BT = BL + BC + BG + BF$	0,78	26,202	0,4140 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{10,7843}HT^{-8,6437}\rho^{4,1756}}}$		41,153	

Em que: DAP é o diâmetro à altura do peito (cm), HT é a altura total (m),  $\rho$  é a densidade básica do lenho, BL é a biomassa do lenho (kg), BC é a biomassa da casca (kg), BG é a biomassa dos galhos, BF é a biomassa das folhas (BF), BT é a biomassa total (kg), R<sup>2</sup>aj é o coeficiente de determinação ajustado e RMSE é a raiz quadrada do erro médio (kg).

FIGURA 3.5 – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS INDEPENDENTES E SIMULTANEAMENTE (NSUR E WNSUR) PARA OS COMPONENTES DE BIOMASSA E TOTAL, UTILIZANDO VARIÁVEIS DAP, ALTURA E DENSIDADE COMO PREDITORAS.



FONTE: O autor (2023).

### 3.4.4 Procedimento 3 - inclusão de variáveis *dummy*

Após a aplicação do método *stepwise* nos ajustes independentes das equações de cada compartimento da biomassa e total, as variáveis preditivas que melhor estimam cada componente estão presentes nas equações 3.16 a 3.20. As equações foram convertidas para a forma não linear, com o intuito de comparar com outros sistemas de equações e aplicar ajustes simultâneos.

$$\text{Lenho} = \exp(\beta_0) \text{DAP}^{(\beta_1)} \rho^{(\beta_3)} \text{HT}^{(\beta_{21} X_6)} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

$$\text{Casca} = \exp(\beta_0 + \beta_6 X_3) \text{DAP}^{(\beta_1)} \rho^{(\beta_3)} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

$$\text{Galho} = \exp(\beta_0 + \beta_4 X_1) \text{DAP}^{(\beta_1)} \rho^{(\beta_{23} X_2 + \beta_{25} X_4)} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

$$\text{Folha} = \exp(\beta_0) \text{DAP}^{(\beta_1)} \rho^{(\beta_{23} X_2)} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

$$\text{Total} = \exp(\beta_0) \text{DAP}^{(\beta_1 + \beta_{13} X_4)} \rho^{(\beta_3)} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

Em que: DAP é o diâmetro à altura do peito (cm), HT é a altura total (m),  $\rho$  é a densidade básica ( $\text{g.cm}^{-3}$ ),  $X_1$  é a *Dummy* para Região 1,  $X_2$  é a *Dummy* para Região 2,  $X_3$  é a *Dummy* para o clone C1,  $X_4$  é a *Dummy* para o clone C2,  $X_5$  é a *Dummy* para o clone C3,  $X_6$  é *Dummy* para o clone C4, e  $\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_{27}$  são os parâmetros dos modelos.

Na estimativa do lenho, as variáveis mais correlacionadas foram DAP, densidade e altura, sendo que na altura, o coeficiente angular está associado à variável *dummy*  $X_6$ , indicando melhoria na estimativa do lenho ao incluir a altura apenas para o clone C4.

A melhor combinação matemática para a estimativa do componente casca foi a inserção das covariáveis DAP, densidade e a variável *dummy*  $X_3$  junto ao coeficiente de escala, indicando que todos os clones e regiões tem o mesmo comportamento, porém em intensidades diferentes em se tratando do clone C1.

O modelo gerado para estimar o componente galho usando-se o método *stepwise* resultou na seleção das variáveis DAP e densidade básica, porém um maior número de variáveis independentes foi retido, pois três variáveis *dummy* foram incluídas: a variável  $X_1$ , que indica a presença ( $X_1=1$ ) e ausência ( $X_1=0$ ) do efeito na Região 1, associada ao coeficiente escala; e variáveis  $X_2$  e  $X_4$  associadas ao coeficiente angular densidade básica, em que  $X_2$  é local de plantio na Região 2 e  $X_4$  representa o clone C2.

Para o modelo do componente folhas as variáveis mais correlacionadas foram o DAP e a densidade básica integrada à variável *dummy*  $X_2$ , que corresponde à Região 2. Por fim, o modelo de biomassa total teve como variáveis independentes a densidade básica e o DAP com dois coeficientes angulares, um que está conjuntamente com a variável *dummy*  $X_4$ , significativo ( $X_4=1$ ) para o

conjunto de dados pertencentes ao clone C2, e outro coeficiente referente a todo o conjunto de dados sem diferenciação.

Após a seleção dos modelos que melhor estimaram cada componente da biomassa por meio do método *stepwise*, os dados das estatísticas de ajuste independente (TABELA 3.4) mostraram que houve aumento expressivo do desempenho das equações que estimam os componentes casca, galhos e folhas, comparando os ajustes independentes das outras metodologias propostas. Contudo, observou-se pouca mudança nos valores de  $R^2_{ajustado}$  e RMSE nas equações de biomassa de lenho e total.

Ao implementar a técnica de ajuste simultâneo NSUR, os dados de  $R^2_{ajustado}$  e RMSE não apresentaram mudanças apreciáveis (TABELA 3.4), porém houve melhoria nas propriedades estatísticas do sistema de modelos de biomassa como: a homogeneidade dos resíduos dos componentes lenho, galhos, folhas e total, observada tanto no gráfico de distribuição dos resíduos (FIGURA 3.6), quanto na não significância ( $\alpha < 0,05$ ) pelo teste de White e consistência biológica, observada pela aditividade de todos os componentes à biomassa total, ou seja,  $\hat{y}_{Total} = \hat{y}_{Lenho} + \hat{y}_{Casca} + \hat{y}_{Galho} + \hat{y}_{Folha}$ .

Como a distribuição residual do componente casca não foi homogêneo, foi necessário o emprego da técnica WNSUR, aplicando pesos nas equações dos componentes lenho, casca, folhas e total, com reajuste do sistema de modelos. Conforme os resultados apresentados na TABELA 3.4 e na Figura 3.6, o desempenho estatístico se mostrou semelhante ao observado na técnica NSUR e ajuste simultâneo. Entretanto, todas as propriedades biológicas e estatísticas permaneceram asseguradas.

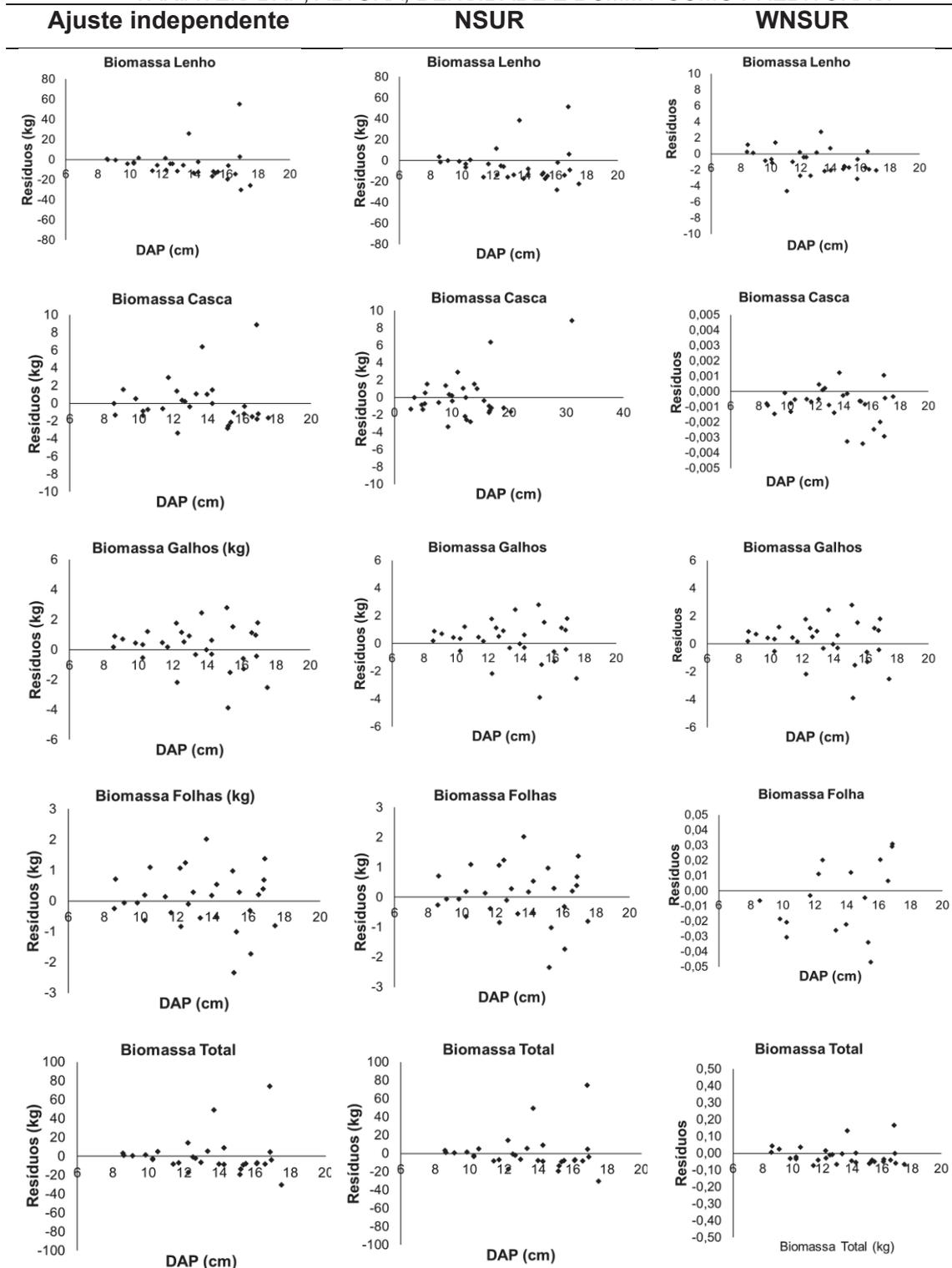
TABELA 3.4 – EQUAÇÕES AJUSTADAS UTILIZANDO VARIÁVEIS PREDITORAS DIÂMETRO, ALTURA, DENSIDADE BÁSICA E DUMMY, ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO, E TESTE DE WHITE PARA AJUSTE INDEPENDENTE E SIMULTÂNEO NSUR E WNSUR.

	Equação	R <sup>2</sup> aj	RMSE	White
<b>Independente</b>	$BL = \exp^{(-1,9585)} DAP^{(2,6003)} \rho^{(0,4998)} HT^{(0,0386X6)}$	0,88	16,275	0,2466 <sup>ns</sup>
	$BC = \exp^{(-2,88339+ 0,407722X3)} DAP^{(2,358124)} \rho^{(1,4255)}$	0,89	0,925	0,7056 <sup>ns</sup>
	$BG = \exp^{(-10,7080-2,8510X1)} DAP^{(5,6891)} \rho^{(5,2122X2+1,8466X4)}$	0,87	2,141	0,0135*
	$BF = \exp^{(-7,5285)} DAP^{(3,2004)} \rho^{(1,1267X2)}$	0,55	1,017	0,0615 <sup>ns</sup>
	$BT = \exp^{(-1,7622)} DAP^{(2,7272-0,0608X4)} \rho^{0,9431}$	0,89	18,664	0,0283*
<b>NSUR</b>	$BL = \exp^{(-2,2814)} DAP^{(2,6003)} \rho^{(0,0050)} HT^{(0,01726X6)}$	0,88	16,901	0,1672 <sup>ns</sup>
	$BC = \exp^{(-3,4773+ 0,3390X3)} DAP^{(2,3736)} \rho^{(0,5238)}$	0,87	2,186	0,0231*
	$BG = \exp^{(-10,6026-2,8701X1)} DAP^{(5,6263)} \rho^{(5,3196D2+1,3826X4)}$	0,88	0,969	0,3982 <sup>ns</sup>
	$BF = \exp^{(-9,0602)} DAP^{(3,7551)} \rho^{(1,2359X2)}$	0,56	1,003	0,0551 <sup>ns</sup>
	BT= BL+BC+BG+BF	0,85	22,366	0,4140 <sup>ns</sup>
<b>WNSUR</b>	$BL = \exp^{(-1,6854)} DAP^{(2,5961)} \rho^{(0,8599)} HT^{(0,0305X6)}$	0,88	16,289	0,3326 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{(2,8848)} \rho^{(4,4918)} HT^{(0,0631X6)}}}$		1,1547	
	$BC = \exp^{(-3,3438+ 0,2727X3)} DAP^{(2,4283)} \rho^{(0,8595)}$	0,87	2,212	0,2015 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{(6,1928)} \rho^{(-3,8008)}}}$		0,00179	
	$BG = \exp^{(-10,6045-1,7809X1)} DAP^{(5,23371)} \rho^{(3,7501X2+1,1280X4)}$	0,87	1,018	0,1683 <sup>ns</sup>
	$BF = \exp^{(-8,0456)} DAP^{(3,4027)} \rho^{(1,2014X2)}$	0,57	0,993	0,5656 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{(2,9367)} \rho^{(3,3341X2)}}}$		0,0590	
	BT= BL+BC+BG+BF	0,86	21,274	0,4140 <sup>ns</sup>
	$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sqrt{DAP^{(6,2617-1,2333X4)} \rho^{2,3479}}}$		0,0643	

FONTE: O autor (2023).

Em que: DAP é o diâmetro à altura do peito (cm), HT é a altura total (m),  $\rho$  é a densidade básica ( $g/cm^3$ ), BL é a biomassa do lenho (kg), BC é a biomassa da casca (kg), BG é a biomassa dos galhos, BF é a biomassa das folhas (BF), BT é a biomassa total (kg), R<sup>2</sup>aj é o coeficiente de determinação ajustado, RMSE é a raiz quadrada do erro médio (kg), X<sub>1</sub> é a variável *Dummy* para Região 1, X<sub>2</sub> é a variável *Dummy* para Região 2, X<sub>3</sub> é a variável *Dummy* para o clone C1, X<sub>4</sub> é a variável *Dummy* para o clone C2, X<sub>5</sub> é a variável *Dummy* para o clone C3, X<sub>6</sub> é a variável *Dummy* para o clone C4.

FIGURA 3.6 – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS EQUAÇÕES AJUSTADAS INDEPENDENTEMENTE E SIMULTANEAMENTE (NSUR E WNSUR) PARA OS COMPONENTES DE BIOMASSA E TOTAL, UTILIZANDO VARIÁVEIS DAP, ALTURA, DENSIDADE E *DUMMY* COMO PREDITORAS.



FONTE: O autor (2023).

### 3.4.5 Biomassa dos componentes e total

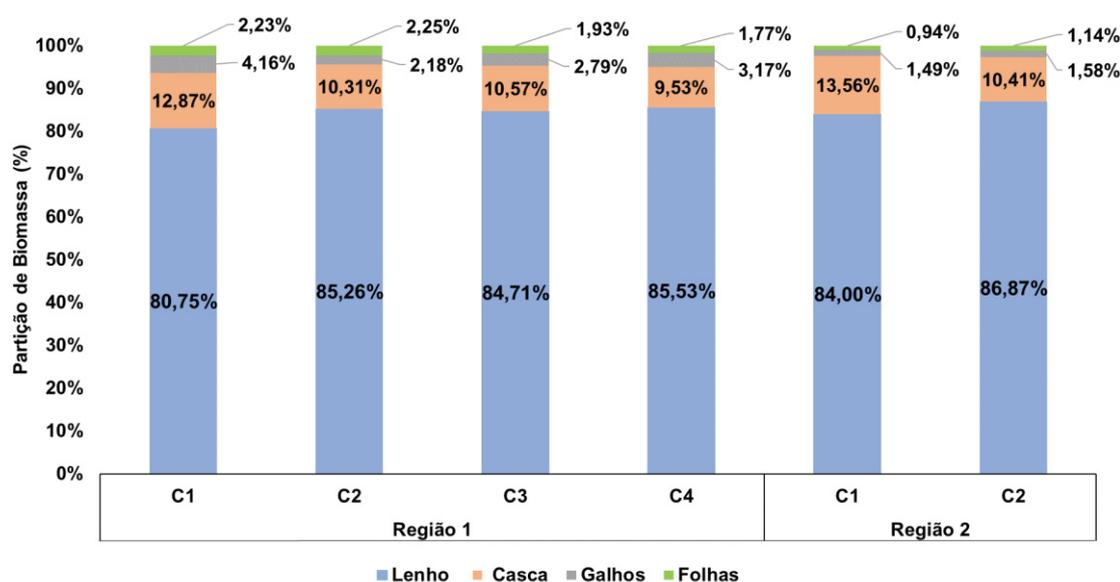
As equações de biomassa com propriedades aditivas e com melhores estatísticas foram obtidas com o emprego da técnica *stepwise*, seguidas pelo ajuste simultâneo WNSUR.

Na FIGURA 3.7 estão apresentadas as partições da biomassa aérea das árvores amostradas para cada clone e nas Regiões 1 e 2. De forma geral, o componente fuste representou mais de 80% da biomassa seca total em todos os clones, sendo o principal contribuinte para a biomassa seca arbórea. A casca representa o principal coproduto da biomassa aérea, variando entre 9,53% a 13,57% da biomassa seca total.

Os clones que alocaram o maior percentual de biomassa de lenho foram: C2 na Região 2 (86,87%), C4 (85,53%) e C2 (85,26%) na Região 1. Os clones C1 em ambas as regiões tiveram os menores percentuais de biomassa de lenho, por sua vez, a alocação percentual da biomassa de casca foi maior, correspondendo à 13,56% e 13,31% da biomassa total, respectivamente.

Quanto a biomassa de copa (galhos e folhas), observa-se que para ambos os coprodutos a alocação da biomassa foi maior para os clones na Região 1 do que na Região 2, o que evidencia o efeito de sítio na alocação da biomassa de copa.

FIGURA 3.7 – PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DOS COMPONENTES NA BIOMASSA SECA POR CLONE E REGIÃO.



FONTE: O autor (2023).

## 3.5 DISCUSSÃO

### 3.5.1 Técnicas de ajuste de equações de biomassa

Neste estudo, os estimadores dos componentes da biomassa aérea (lenho, casca, galhos e folhas) e total foram obtidos por diferentes técnicas: (i) ajuste independente, (ii) ajuste simultâneo NSUR e (iii) ajuste simultâneo com pesos WNSUR, e por diferentes metodologias relacionadas às variáveis preditoras: DAP e altura (Procedimento 1); DAP, altura e densidade básica (Procedimento 2); DAP, altura, densidade básica e variáveis *dummy* para região e clone (Procedimento 3).

Os sistemas de equações ajustados de maneira independente para estimar a biomassa de eucalipto apresentaram melhores desempenhos estatísticos, porém a aditividade dos componentes com a biomassa total não foi atendida conforme era esperada (KOZAK, 1970). Valores negativos nos coeficientes angulares associados à variável altura foram identificados em algumas equações, o que é incoerente biologicamente, pois espera-se uma relação direta e positiva na produção de biomassa com a altura do indivíduo, para os dados analisados.

A heteroscedasticidade do erro foi detectada pelo teste de White ( $\alpha < 0,05$ ) e pelos gráficos de resíduos em algumas equações para estimar os componentes lenho, casca e galhos, o que é algo comumente encontrado em dados de biomassa (PARRESOL, 1999, 2001; PÉREZ-CRUZADO; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, 2011; SANQUETTA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2021; TRAUTENMÜLLER et al., 2021), pois há um aumento da variabilidade da biomassa conforme aumenta o diâmetro das árvores (CUNIA e BRIGGS, 1984). Este fato resultou em estimadores ineficientes, pois não ocorreu variância mínima. Assim, ao utilizar essas equações na modelagem da biomassa florestal, o erro da equação será propagado juntamente com o erro das parcelas do inventário florestal, tendendo à superestimativa dos erros de amostragem da biomassa (CUNIA, 1987; BEHLING et al., 2018).

A utilização da técnica de ajuste NSUR assegurou a aditividade dos componentes da biomassa, mas não trouxe alterações numéricas expressivas nos indicadores de desempenho das equações. Esse mesmo comportamento

também foi reportado por Burkhart e Sprinz (1984), Cunia e Briggs (1984) e Reed e Green (1984). Reed e Green (1985) explicou que as técnicas de ajuste simultâneo sacrificam parte da precisão das equações de componentes individuais para melhorar o erro quadrado do sistema geral, enquanto assegura a aditividade.

Como a homogeneidade dos resíduos não foi satisfatória para todos os estimadores de biomassa, as equações foram ajustadas com aplicação dos pesos obtidos pela estrutura de variância (WNSUR) proveniente dos coeficientes das equações simultâneas de cada componente e do ajuste independente da biomassa total. O sistema de equações ponderadas modela o resíduo em função das variáveis alométricas, com o intuito de obter a estrutura de variância do resíduo em função do tamanho da árvore, pois conforme aumenta o seu tamanho, aumenta sua dispersão (PARRESOL, 2001; BEHLING et al., 2018). Após as funções de peso eliminarem a heteroscedasticidade dos resíduos, equações apropriadas e de boa qualidade foram obtidas para avaliação de biomassa.

### 3.5.2 Estimativas de cada componente da biomassa aérea

Os sistemas de equações ajustados pela técnica WNSUR atenderam os pressupostos definidos para assegurar acurácia na predição da biomassa florestal e, a partir deste ponto, foi possível analisar o efeito da inclusão da variável densidade básica, sítio e clones nas estimativas de biomassa de cada componente.

O lenho do fuste de espécies de eucalipto é o principal componente a ser estudado, pois este representa maior percentual da biomassa aérea e tem sido o foco de intensos estudos de melhoria genética para aumento da produtividade da madeira em plantios comerciais e, também, vem ganhando grande notoriedade na temática de mudanças climáticas e fixação de carbono.

As variáveis mais utilizadas em equações para estimar a biomassa do lenho são o DAP, altura ou combinação de ambas. Os estudos de António et al. (2007) e Arevalo et al. (2007) reportaram um aumento significativo na capacidade preditiva da biomassa ao incluir a altura como preditor adicional ao diâmetro. No entanto, neste estudo, observou-se que as variáveis DAP e densidade foram mais importantes para predizer a biomassa que a altura, pois

esta foi associada apenas ao clone C4 por meio da inclusão de uma variável *dummy*. Outra razão em que a variável altura não foi considerada um bom preditor neste estudo deve-se aos bancos de dados analisados serem de povoamentos com idades próximas entre si, práticas silviculturais semelhantes e estágio de desenvolvimento após a fase juvenil. Ter-mikaelian e Parker (2000) argumentam que altura pode carregar efeitos da idade, densidade do povoamento e ambiente.

O componente casca é o menos utilizado nos sistemas de equações de biomassa de eucalipto, apesar de ser o principal coproduto da biomassa aérea em espécies de eucalipto na idade de corte. A estimativa da casca vem assumindo importância ao longo dos anos não somente pela relevante participação na biomassa aérea, mas também para subsidiar estudos que envolvem ciclagem de nutrientes, já que a casca apresenta cerca de 18, 19, 21, 60 e 48% de teor de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente (PAES et al., 2013; WITSCHORECK e SCHUMACHER, 2015).

De forma semelhante ao componente lenho, as variáveis que melhor estimam a biomassa de casca são o DAP e a densidade básica e, usando-se o método de seleção *stepwise*, a variável *dummy* está expressa no coeficiente de escala para o clone C1. Nos modelos estudados por Parresol (1999), a altura foi um preditor útil para a madeira do caule, mas não para a casca.

A inclusão da variável densidade associada às variáveis *dummy* para efeito de clone e região resultou no aumento expressivo de desempenho preditivo da biomassa dos galhos ( $R^2_{aj}=0,87$ ), assemelhando-se na qualidade preditiva das equações de biomassa do lenho e casca, que comumente apresentam melhores estatísticas de ajuste. A biomassa das folhas, a qual é outro componente da copa, também resultou em aumento na qualidade do ajuste ao ser incluída densidade associada à variável *dummy* para efeito de região e, neste estudo, as estimativas dos componentes da copa apresentaram estatísticas mais confiáveis que as obtidas com as equações ajustadas por Hernández-Ramos et al. (2017) e Oliveira et al. (2021) para povoamentos de eucalipto, indicando que esta técnica é promissora.

Poorter et al. (2012) explicam que a biomassa da copa apresenta maior variabilidade que a biomassa do lenho e fuste, pois estes componentes sofrem mais influência das condições ambientais e, conseqüentemente, estas refletem

diretamente à medida que aqueles componentes crescem, bem como sua alometria. Este argumento corrobora com os resultados observados neste trabalho, em que os maiores ganhos no desempenho preditivo foram observados nos estimadores da biomassa da copa.

### 3.5.3 Efeito da densidade básica, sítio e clone na alometria de eucalipto

Com base nos resultados observados neste trabalho, a densidade básica se apresentou como uma importante variável a ser incluída nas equações de biomassa, quando há interesse em avaliar diferentes espécies, pois esta é uma variável com grande associação ao material genético. Além de possibilitar a formulação de equações genéricas de maior qualidade preditiva, expressa o efeito de clone nas equações de biomassa.

Quanto à alocação da biomassa nos povoamentos estudados, observou-se o efeito da interação sítio x clone nos percentuais de biomassa do fuste, na Região 2, sítio de melhor qualidade, em que o percentual de biomassa no lenho foi maior. Entretanto, o efeito de sítio foi maior na alometria do clone C1, na Região 2, em que o peso seco do lenho representou mais de 3,25%. Esses comportamentos se devem às baixas densidades e condições ambientais favoráveis ao crescimento, como disponibilidade e boa distribuição hídrica, temperaturas adequadas, e solos mais férteis (BAKER et al., 2004; ROQUE; TOMAZELLO FILHO, 2009). Portanto, o efeito de sítio na concentração de biomassa de lenho foi maior para o clone C1 do que para o clone C2.

A ordem de concentração da biomassa encontrada neste estudo foi madeira > casca > galhos > folhas, resultado semelhante ao encontrado por Oliveira et al. (2020), Silva et al. (2015), Viera e Rodríguez-Soalleiro (2019), e diferente aos de Souza e Fiorentin (2013) e Silva et al. (2004). Oliveira et al. (2020), descrevem que maiores percentuais de casca e de folhas podem interferir no desempenho energético destes componentes como combustíveis, uma vez que estes apresentam elevados percentuais de materiais inorgânicos em sua composição química, o que afeta negativamente na quantidade de energia a ser liberada durante o processo de combustão completa. Portanto, deve-se analisar a viabilidade desses coprodutos como combustível.

### 3.6. CONCLUSÕES

- As técnicas de ajuste simultâneo NSUR e WNSUR foram eficientes para desenvolver um sistema de equações de boa qualidade e precisão para estimativa de biomassa de eucalipto em diferentes clones e condições ambientais para fins energéticos;
- A seleção de variáveis pelo método *stepwise* melhorou a qualidade preditiva dos estimadores de biomassa de eucalipto em diferentes clones e condições ambientais para fins energéticos;
- A variável densidade melhora a qualidade preditiva em sistemas de equações genéricas de biomassa e incorpora o efeito de clone na alocação da biomassa de eucalipto em diferentes clones e condições ambientais para fins energéticos;
- O efeito de sítio na alocação de biomassa foi evidenciado, sendo de maior magnitude no clone C1;
- Os clones que alocaram o maior percentual de biomassa de lenho foram: C2 na Região 2 (86,87%), C4 (85,53%) e C2 (85,26%) na Região 1. Os clones C1 em ambas as regiões tiveram os menores percentuais de biomassa de lenho, por sua vez, a alocação percentual da biomassa de casca foi maior, correspondendo à 13,56% e 13,31% da biomassa total, respectivamente;
- Quanto à biomassa de copa (galhos e folhas), observa-se que para ambos os coprodutos a alocação da biomassa foi maior para os clones na Região 1 do que na Região 2, o que evidencia o efeito de sítio na alocação da biomassa de copa.

### 3.7 REFERÊNCIAS

- ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.; BALBOA MURIAS, M. Á.; MERINO GARCÍA, A.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R. Estimación de la biomasa arbórea de “*Eucalyptus globulus*” y “*Pinus pinaster*” en Galicia. **Recursos Rurais**, v. 1, p. 21–30, 2012.
- ANTÓNIO, N.; TOMÉ, M.; TOMÉ, J.; SOARES, P.; FONTES, L. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 5, p. 895–906, 2007.
- AREVALO, C. B. M.; VOLK, T. A.; BEVILACQUA, E.; ABRAHAMSON, L. Development, and validation of aboveground biomass estimations for four *Salix* clones in central New York. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, n. 1, p. 1–12, 2007.
- BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; et al. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 545–562, 2004.
- BASUKI, T. M.; VAN LAAKE, P. E.; SKIDMORE, A. K.; HUSSIN, Y. A. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 8, p. 1684–1694, 2009.
- BEHLING, A.; PÉLLICO NETTO, S.; SANQUETTA, C. R.; et al. Critical analyses when modeling tree biomass to ensure additivity of its components. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1759–1774, 2018a.
- BEHLING, A.; PÉLLICO NETTO, S.; SANQUETTA, C. R.; et al. Critical analyses when modeling tree biomass to ensure additivity of its components. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1759–1774, 2018b.
- BI, H.; LONG, Y.; TURNER, J.; et al. Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 12, p. 2301–2314, 2010.
- BI, H.; MURPHY, S.; VOLKOVA, L.; et al. Additive biomass equations based on complete weighing of sample trees for open eucalypt forest species in south-eastern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 349, p. 106–121, 2015. Elsevier B.V.
- BI, H.; TURNER, J.; LAMBERT, M. J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. **Trees - Structure and Function**, v. 18, n. 4, p. 467–479, 2004.
- BURKHART, H. E.; SPRINZ, P. T. Compatible Cubic Volume and Basal Area Projection Equations for Thinned Old-Field Loblolly Pine Plantations. **Forest Science**, v. 30, n. 1, p. 86–93, 1984.
- CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A.; et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.
- COUTINHO, V. M.; OLIVEIRA, T. W. G. DE; FIORENTIN, L. D.; et al. How to estimate black wattle aboveground biomass from heteroscedastic data? **Floresta**, v. 51, n. 1, p. 028–036, 2021.

- COUTINHO, V. M.; SANQUETTA, C. R.; BITTENCOURT, P. A.; et al. Simultaneous Equations to Estimate Aboveground Biomass of *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, p. 1–10, 2018.
- CUNIA, T. Error of forest inventory estimates: its main components. In: USDA (Org.); **For Serv G** ed., p.1–13, 1987. USA.
- CUNIA, T.; BRIGGS, R. D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, n. 3, p. 376–384, 1984.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied Regression Analysis**. New York, 1981.
- HARVEY, A. C. Estimating Regression Models with Multiplicative Heteroscedasticity. **The Economic Journal**, v. 44, n. 3, p. 461–465, 1976.
- HERNÁNDEZ-RAMOS, J.; DE LOS SANTOS-POSADAS, H. M.; VALDEZ-LAZALDE, J. R.; et al. Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Agrociencia**, v. 51, n. 8, p. 921–938, 2017.
- HIRIGOYEN, A.; RESQUIN, F.; NAVARRO CERRILLO, R.; FRANCO, J.; RACHID CASNATI, C. Stand biomass estimation methods for *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* in Uruguay. **Bosque (Valdivia)**, v. 42, n. 1, p. 53–66, 2021.
- HUSCH, B.; MILLER, C. I.; KERSHAW, J. **Forest mensuration**. 4 ed. New Jersey: John Willey e Sons, 2003.
- IBÁ. Anuário estatístico da IBA 2022: Ano base 2021. Brasília, Brasil., 2022.
- KOZAK, A. Methods for Ensuring Additivity of Biomass Components by Regression Analysis. **The Forestry Chronicle**, v. 46, n. 5, p. 402–405, 1970.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo: EPU, 1986.
- LIMA, R. B. DE; ALVES JÚNIOR, F. T.; DE OLIVEIRA, C. P.; SILVA, J. A. A. DA; FERREIRA, R. L. C. Predicting of biomass in Brazilian tropical dry forest: A statistical evaluation of generic equations. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 3, p. 1815–1828, 2017.
- LIMA, R. C.; SOTTA, E. D.; RAMOS, M. B. B.; et al. Equações para estimativa de volume, biomassa e carbono para três espécies nativas da Amazônia, cupiúba (*Goupiaglabra Aubl*), angelim vermelho (*Diniziaexcelsa Ducke*) e mandioqueira escamosa (*Qualeaparaenis Ducke*). **Revista Arquivos Científicos (IMMES)**, v. 2, n. 2, p. 74–82, 2019.
- OLIVEIRA, R. S.; DOLÁCIO, C. J. F.; MOSSATO, E. C.; MAYER, S. L. S.; SILVA, D. A. DA. Estoque de carbono e energia em plantios de *Eucalyptus* na região norte do Brasil. **Revista Agroecossistemas**, v. 12, n. 1, p. 67, 2020.
- PAES, F. A. S. V.; LIMA, A. M. N.; HAKAMADA, R. E.; BARROS, N. F. DE. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1081–1090, 2013.
- PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, v. 45, n. 4, p. 573–593, 1999.

- PARRESOL, BERNARD R. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 31, n. 5, p. 865–878, 2001.
- PÉREZ-CRUZADO, C.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. Improvement in accuracy of aboveground biomass estimation in *Eucalyptus nitens* plantations: Effect of bole sampling intensity and explanatory variables. *Forest Ecology and Management*, v. 261, n. 11, p. 2016–2028, 2011.
- PICARD, N.; SAINT-ANDRE, L.; HENRY, M. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. **Rome e Montpellier: FAO/CIRAD**, 2012.
- POORTER, H.; NIKLAS, K. J.; REICH, P. B.; et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, v. 193, n. 1, p. 30–50, 2012.
- REED, D. D.; GREEN, E. J. Compatible individual tree taper and volume ratio equations. *Forest Science*, v. 30, p. 977–990, 1984.
- REED, D. D.; GREEN, E. J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 15, n. 6, p. 1184–1187, 1985.
- ROQUE, R. M.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da estrutura anatômica do lenho de árvores de *Gmelina arborea* em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica. *Scientia Forestalis*, v. 37, n. 83, p. 273–285, 2009.
- RUIZ-PEINADO GERTRUDIX, R.; MONTERO, G.; DEL RIO, M. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, v. 21, n. 1, p. 42, 2012.
- SAINT-ANDRÉ, L.; M'BOU, A. T.; MABIALA, A.; et al. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a hybrid *Eucalyptus* in Congo. *Forest Ecology and Management*, v. 205, n. 1–3, p. 199–214, 2005.
- SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; et al. Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. *Annals of Forest Science*, v. 72, n. 8, p. 1099–1112, 2015.
- SANQUETTA, C. R.; PAULA, A.; CORTE, D.; et al. Australian Journal of Basic and Applied Sciences Probabilistic Modelling of Diameter Increment for Pinus sp. Stands over a Cycle of 28 years in Southern Brazil, v. 9, n. July, p. 625–632, 2015.
- SANTOS, J. dos. **Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira**. Tese. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1996.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1932.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: Parte I: modelos de regressão linear e não-linear; Parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento, e peso de matéria seca**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.

- SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; E CARVALHO, S. DE P. C.; PICCOLO, M. D. C.; RODRIGUEZ, L. C. E. Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, p. 135–146, 2015.
- SILVA, H. D. DA; FERREIRA, C. A.; CORRÊA, R. S.; BELLOTE, A. F. J.; TUSSOLINI, E. L. Alocação de Biomassa e Ajuste de Equações para Estimativa de Biomassa em Compartimentos Aéreos de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim Pesquisas Florestais**, v. 49, p. 83–95, 2004.
- SMITH, D. M. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. **USDA Forest Products Laboratory**. p. 1–8, 1954. 2014.
- SOUZA, J. T. DE; FIORENTIN, L. D. Quantificação da biomassa e do carbono em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, em Santa Maria, RS. **Unoesc & Ciência**, v. 4, n. 2, p. 253–262, 2013.
- DE SOUZA, J. T.; FIORENTIN, L. D. Quantificação da biomassa e do carbono em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, em Santa Maria, RS. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 273–279, 2013.
- SPURR, S. H. **Forest inventory**. New York: The Ronald Press Company, 1952.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM [SAS]. **SAS/STAT User's Guide**. , 2002. SAS Institute.
- TER-MIKAELIAN, M. T.; PARKER, W. C. Estimating biomass of white spruce seedlings with vertical photo imagery. **New Forests**, v. 20, n. 2, p. 145–162, 2000.
- TRAUTENMÜLLER, J. W.; PÉLLICO NETTO, S.; BALBINOT, R.; et al. Regression estimators for aboveground biomass and its constituent parts of trees in native southern Brazilian forests. **Ecological Indicators**, v. 130, p. 108, 2021.
- VEGA-NIEVA, D. J.; VALERO, E.; PICOS, J.; JIMÉNEZ, E. Modeling the above and belowground biomass of planted and coppiced *Eucalyptus globulus* stands in NW Spain. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 7, p. 967–980, 2015.
- VENTUROLI, F.; SANQUETTA, C. R. Biomass and allometric relations in a Brazilian Savanna-Park. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 47, n. 124, p. 708–713, 2019.
- VIERA, M.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. A Complete assessment of carbon stocks in above and belowground biomass components of a hybrid *Eucalyptus* Plantation in Southern Brazil. **Forests**, v. 10, n. 7, p. 536, 2019.
- WHITE, H. A Heteroskedasticity-Consistent Covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. **Econometrica**, v. 48, n. 4, p. 817, 1980.
- WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V. Alocação de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus saligna* Sm. na região de Guaíba - Rio Grande do Sul. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 625–632, 2015.
- ZHANG, Y.; WANG, X. Geographical spatial distribution, and productivity dynamic change of eucalyptus plantations in China. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 197, 2021.

ZHAO, D.; KANE, M.; MARKEWITZ, D.; TESKEY, R.; CLUTTER, M. Additive tree biomass equations for midrotation loblolly Pine plantations. **Forest Science**, v. 61, n. 4, p. 613–623, 2015.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A seleção de clones com objetivo de suprimento de matéria-prima para a indústria é uma tarefa complexa que envolve o equilíbrio entre a escolha de clones mais produtivos e de clones com atributos específicos que interferem na qualidade da madeira. O escopo do presente estudo foi contribuir para a compreensão da influência de determinados clones de eucalipto na variação da densidade básica e aparente da madeira, explorando dois distintos ambientes no estado de Minas Gerais como cenários de investigação.

Dentre os clones considerados, o nominado como C4 emergiu como a escolha mais apropriada quando se trata de florestas destinadas à produção de energia, pois este apresentou maior densidade básica. Enquanto isso, o clone C3 destacou-se pela menor variação intraespecífica na densidade básica e aparente da madeira, ressaltando sua maior homogeneidade nesse aspecto. Já o clone C2 exibiu um notável desempenho em termos de produção de biomassa, evidenciando seu potencial para fins energéticos.

Este estudo representa um dos trabalhos desenvolvidos nesta temática, reforçando sua importância para investigações futuras e que explorem uma gama mais ampla de variáveis como a idade da madeira, práticas silviculturais, variações edafoclimáticas mais acentuadas, bem como a influência de fatores bióticos e abióticos sobre a densidade básica e biomassa.

## 5 REFERÊNCIAS GERAIS

- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica, 2003. Rio de Janeiro.
- ALMEIDA, M. N. F.; VIDAURRE, G. B.; LOUZADA, J. L. P. C.; et al. Wood density variations of *E. urophylla* clone among growth sites are related to climate. **Canadian Journal of Forest Research**, 2023.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.; BALBOA MURIAS, M. Á.; MERINO GARCÍA, A.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R. Estimación de la biomasa arbórea de "*Eucalyptus globulus*" y "*Pinus pinaster*" en Galicia. **Recursos Rurais**, v. 1, p. 21–30, 2012.
- ALZATE, S. B. A.; FILHO, M. T.; PIEDADE, S. M. S. DE. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 68, p. 87–95, 2005.
- ANTÓNIO, N.; TOMÉ, M.; TOMÉ, J.; SOARES, P.; FONTES, L. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 5, p. 895–906, 2007.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; FILHO, M. T.; LIMA, J. T.; VIDAURRE, G. B. Densitometria de raios x na madeira e carvão de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake1. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 155–162, 2016. Sociedade de Investigações Florestais.
- AREVALO, C. B. M.; VOLK, T. A.; BEVILACQUA, E.; ABRAHAMSON, L. Development and validation of aboveground biomass estimations for four *Salix* clones in central New York. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, n. 1, p. 1–12, 2007.
- AUTY, D.; ACHIM, A.; MACDONALD, E.; CAMERON, A. D.; GARDINER, B. A. Models for predicting wood density variation in Scots pine. **Forestry**, v. 87, n. 3, p. 449–458, 2014. Oxford University Press.
- BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; et al. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 545–562, 2004.
- BASUKI, T. M.; VAN LAAKE, P. E.; SKIDMORE, A. K.; HUSSIN, Y. A. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 8, p. 1684–1694, 2009.
- BEHLING, A.; NETTO, S. P.; SANQUETTA, C. R.; et al. Critical analyses when modeling tree biomass to ensure additivity of its components. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1759–1774, 2018.

BI, H.; LONG, Y.; TURNER, J.; et al. Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 12, p. 2301–2314, 2010.

BI, H.; MURPHY, S.; VOLKOVA, L.; et al. Additive biomass equations based on complete weighing of sample trees for open eucalypt forest species in south-eastern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 349, p. 106–121, 2015.

BI, H.; TURNER, J.; LAMBERT, M. J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. **Trees - Structure and Function**, v. 18, n. 4, p. 467–479, 2004.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271–283, 2017.

BOSCHETTI, W. T. N. **Qualidade da madeira de árvores do híbrido clonal *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* inclinadas por ação de ventos para produção de celulose**, 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Jerônimo Monteiro: Universidade Federal do Espírito Santo.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. FAO ed. 1997.

BURKHART, H. E.; SPRINZ, P. T. Compatible Cubic Volume and Basal Area Projection Equations for Thinned Old-Field Loblolly Pine Plantations. **Forest Science**, v. 30, n. 1, p. 86–93, 1984.

BUSSAB, W.; MORETTIN, P. **Estatística Básica**. 6ª ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2010.

CALEGARIO, N.; GREGOIRE, T. G.; DA SILVA, T. A.; TOMAZELLO FILHO, M.; ALVES, J. A. Integrated system of equations for estimating stem volume, density, and biomass for Australian redcedar (*Toona ciliata*) plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 47, n. 5, p. 681–689, 2017. Canadian Science Publishing.

CÂMARA, A. P.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. C. L.; et al. Changes in rainfall patterns enhance the interrelationships between climate and wood traits of eucalyptus. **Forest Ecology and Management**, v. 485, 2021a. Elsevier B.V.

CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. 3ª ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971.

CAMPOE, O. C.; BINKLEY, D. Environmental and genetic influences on growth in *Eucalyptus* plantations: The TECHS special issue. **Forest Ecology and Management**, v. 476, p. 118464, 2020.

CARNEIRO, A. DE C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375–381, 2014.

- CASTRO, V. R.; CHAMBI-LEGOAS, R.; FILHO, M. T.; et al. The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis*. Scientific Reports, abr. 2020. **Nature Research**.
- CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A.; et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014. Blackwell Publishing Ltd.
- CHERELLI, S. G.; SARTORI, M. M. P.; PRÓSPERO, A. G.; BALLARIN, A. W. Heartwood and sapwood in eucalyptus trees: non-conventional approach to wood quality. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 1, p. 425–438, 2018. Academia Brasileira de Ciências.
- COUTINHO, V. M.; OLIVEIRA, T. W. G. DE; FIORENTIN, L. D.; et al. How to estimate black wattle aboveground biomass from heteroscedastic data? **Floresta**, v. 51, n. 1, p. 028–036, 2021.
- COUTINHO, V. M.; SANQUETTA, C. R.; BITTENCOURT, P. A.; et al. Simultaneous Equations to Estimate Aboveground Biomass of *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, p. 1–10, 2018.
- CUNIA, T. **Error of forest inventory estimates**: its main components. In: USDA (Org.); For Serv G. ed., p.1–13, 1987. USA.
- CUNIA, T.; BRIGGS, R. D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 14, n. 3, p. 376–384, 1984.
- DOWNES, G.; HARWOOD, C.; WASHUSEN, R.; et al. Wood properties of *Eucalyptus globulus* at three sites in Western Australia: effects of fertilizer and plantation stocking. **Australian Forestry**, v. 77, n. 3–4, p. 179–188, 2014.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied Regression Analysis**. New York, 1981.
- EBERHARDT, T. L.; SO, C. L.; LEDUC, D. J. Wood property maps showing wood variability in mature longleaf pine: Does getting old change juvenile tendencies? *Wood and Fiber Science*, v. 51, n. 2, p. 193–208, 2019. **Society of Wood Science and Technology**.
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2022**: Ano base 2021. Rio de Janeiro, 2022.
- EPSKAMP, S.; CRAMER, A. O. J.; WALDORP, L. J.; SCHMITTMANN, V. D.; BORSBOOM, D. qgraph: Network Visualizations of Relationships in Psychometric Data. **Journal of Statistical Software**, v. 48, n. 4, 2012.
- EVANGELISTA, W. V. Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 2007.
- FARIA, W. S.; RESENDE, D. R.; GUIMARÃES, I.; PRÓTASIO, T.; GUIMARÃES JÚNIOR, I. Avaliação das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* tratado e não tratado com preservativo. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, v. 11, n. 21, 2015.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, F. L.; CHAN, B. L. **Análise de Dados: Modelagem Multivariada para Tomada de Decisões**. 1ed ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FOELKEL, C. E.; MORA, E.; MENOCELLI, S. **Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose**. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão, p. 719–728, 1990.

GALVÃO, P.; HIRATA, R.; CONICELLI, B. Estimating groundwater recharge using GIS-based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 10, p. 398, 2018.

GOUVÊA, A. DE F. G.; GOMES, C. M.; MATOS, L. M.; et al. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose Kraft. **Ciência da Madeira** (Braz. J. Wood Sci.), v. 3, p. 102–114, 2012.

HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6 ed . Porto Alegre: Bookman, 2009.

HARVEY, A. C. **Estimating Regression Models with Multiplicative Heteroscedasticity**. *The Economic Journal*, v. 44, n. 3, p. 461–465, 1976.

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

HERNÁNDEZ-RAMOS, J.; DE LOS SANTOS-POSADAS, H. M.; VALDEZ-LAZALDE, J. R.; et al. Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Agrociencia**, v. 51, n. 8, p. 921–938, 2017.

HIRIGOYEN, A.; RESQUIN, F.; NAVARRO CERRILLO, R.; FRANCO, J.; RACHID CASNATI, C. Stand biomass estimation methods for *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* in Uruguay. *Bosque (Valdivia)*, v. 42, n. 1, p. 53–66, 2021.

HOTELLING, H. The General Welfare in Relation to Problems of Taxation and of Railway and Utility Rates. **Econometrica**, v. 6, n. 3, p. 242, 1938.

HOTELLING, H. The Impact of R. A. Fisher on Statistics. **Journal of the American Statistical Association**, v. 46, n. 253, p. 35, 1951.

HUSCH, B. ; MILLER, C. I.; KERSHAW, J. **Forest mensuration**. 4o ed. New Jersey: John Willey e Sons, 2003.

IBÁ. **Anuário estatístico da IBA 2022**: Ano base 2021. Brasília, Brasil., 2022.

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

- KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. **Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono**. In: C. R. et al. (Eds.) SANQUETA (Org.); *As florestas e o carbono*. p.251–264, 2002. Curitiba.
- KOZAK, A. Methods for Ensuring Additivity of Biomass Components by Regression Analysis. **The Forestry Chronicle**, v. 46, n. 5, p. 402–405, 1970.
- KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 3, p. 1339–1344, 2011.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo: EPU, 1986.
- LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S.; OLIVEIRA, A. D. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus camaldulensis* no sentido longitudinal dos caules. **Ciência e Prática**, p. 123–127, 1992.
- LIMA, R. B. DE; ALVES JÚNIOR, F. T.; DE OLIVEIRA, C. P.; SILVA, J. A. A. DA; FERREIRA, R. L. C. **Predicting of biomass in Brazilian tropical dry forest: A statistical evaluation of generic equations**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 89, n. 3, p. 1815–1828, 2017.
- LIMA, R. C.; SOTTA, E. D.; RAMOS, M. B. B.; et al. Equações para estimativa de volume, biomassa e carbono para três espécies nativas da Amazônia, cupiúba (*Goupia glabra* Aubl), angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e mandioqueira escamosa (*Qualea paraensis* Ducke). **Revista Arquivos Científicos (IMMES)**, v. 2, n. 2, p. 74–82, 2019.
- LONGUETAUD, F.; MOTHE, F.; FOURNIER, M.; et al. Within-stem maps of wood density and water content for characterization of species: a case study on three hardwood and two softwood species. **Annals of Forest Science**, v. 73, n. 3, p. 601–614, 2016. Springer-Verlag France.
- MENESES, V. A.; 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/Forest Sciences**, v. 43, n. 105, p. 101–116, 2015.
- MORA, C. R.; SCHIMLECK, L. R. **Determination of within-tree variation of *Pinus taeda* wood properties by near infrared spectroscopy**. Part 2: Whole tree wood property maps. *Appita Journal*, v. 62, n. 3, p. 232–239, 2009.
- MOUTINHO, V. H. P. **Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp.** na qualidade do carvão, 2013. Tese (Doutorado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- OLIVEIRA, R. S.; DOLÁCIO, C. J. F.; MOSSATO, E. C.; MAYER, S. L. S.; SILVA, D. A. DA. Estoque de carbono e energia em plantios de *Eucalyptus* na região norte do Brasil. **Revista Agroecossistemas**, v. 12, n. 1, p. 67, 2020.

OLIVEIRA, T. W. G. DE; RUBILAR, R.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BEHLING, A. Simultaneous estimation as an alternative to young eucalyptus aboveground biomass modeling in ecophysiological experiments. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, p. e52126, 2021.

PADUA, F. A. DE. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**, 2009. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Lavras.

PAES, F. A. S. V.; LIMA, A. M. N.; HAKAMADA, R. E.; BARROS, N. F. DE. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1081–1090, 2013.

PARRESOL, B. R. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. **Forest Science**, v. 45, n. 4, p. 573–593, 1999.

PARRESOL, BERNARD R. Additivity of nonlinear biomass equations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 5, p. 865–878, 2001.

PEREIRA, K. D.; CARNEIRO, A. P. S.; CARNEIRO, A. DE C. O.; SANTOS, G. R. DOS; FIALHO, L. DE F. Função discriminante de Fisher para classificação do carvão vegetal de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, 2021. University of Sao Paulo.

PÉREZ-CRUZADO, C.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. Improvement in accuracy of aboveground biomass estimation in *Eucalyptus nitens* plantations: Effect of bole sampling intensity and explanatory variables. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 11, p. 2016–2028, 2011.

PESTANA, M. H.; GAGEIRO, J. N. **Análise de dados para as Ciências Sociais**. A complementaridade do SPSS. Lisboa: Edições Sílabo, 2003.

PICARD, N.; SAINT-ANDRE, L.; HENRY, M. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction**. Rome e Montpellier: FAO/CIRAD, 2012.

PILLAI, K. C. S. **Some new test criteria in multivariate analysis**. Annals of Mathematical Statistics, v. 26, p. 117–21, 1955.

POERSCH, N. L.; FILHO, L. R. T. F.; MIGUEL, E. P.; et al. Influence of climate variables in the initial growth of *Corymbia citriodora* and different species of eucalyptus. **Bioscience Journal**, p. 1452–1464, 2017.

POORTER, H.; NIKLAS, K. J.; REICH, P. B.; et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30–50, 2012.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, 2022. Vienna, Austria.

RECORD, S. J.; HESS, R. W. **Timbers of the New Haven**. Yale University Press, 1949.

REED, D. D.; GREEN, E. J. Compatible individual tree taper and volume ratio equations. **Forest Science**, v. 30, p. 977–990, 1984.

REED, D. D.; GREEN, E. J. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 15, n. 6, p. 1184–1187, 1985.

RENCHE, A. C. **Methods of multivariate analysis**. 2<sup>th</sup> ed. Wiley-Interscience, 2002.

ROQUE, R. M.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da estrutura anatômica do lenho de árvores de *Gmelina arborea* em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 273–285, 2009.

ROY, S. N. **On a Heuristic Method of Test Construction and its use in Multivariate Analysis**. The Annals of Mathematical Statistics, v. 24, n. 2, p. 220–238, 1953.

RUIZ-PEINADO GERTRUDIX, R.; MONTERO, G.; DEL RIO, M. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. **Forest Systems**, v. 21, n. 1, p. 42, 2012.

SAINT-ANDRÉ, L.; M'BOU, A. T.; MABIALA, A.; et al. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a hybrid Eucalyptus in Congo. **Forest Ecology and Management**, v. 205, n. 1–3, p. 199–214, 2005.

SANQUETTA, C. R. **Métodos de determinação de biomassa florestal**. In: C. R. SANQUETTA; L. F. WATZLAWICK; R. BALBINOT; M. A. B. ZILLOTTO; F. dos S. GOMES (Orgs.); As florestas e o carbono. Curitiba: Ed. dos Autores. p.119–140, 2002.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; et al. Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 8, p. 1099–1112, 2015.

SANQUETTA, C. R.; PAULA, A.; CORTE, D.; et al. Australian Journal of Basic and Applied Sciences Probabilistic Modelling of Diameter Increment for *Pinus* sp. **Stands over a Cycle of 28 years in Southern Brazil**, v. 9, n. July, p. 625–632, 2015.

SANTOS, J. DOS. **Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira**, 1996. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 971–980, 2012.

SÃO TEAGO, G. B. **Qualidade das madeiras de acácia e eucalipto provenientes de cultivo misto visando a produção de celulose**, 2012.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Jerônimo Monteiro: Universidade Federal do Espírito Santo.

SCHIMLECK, L. R.; MORA, C. R.; JORDAN, L.; et al. **Determination of within-tree variation of Pinus taeda wood properties by near infrared spectroscopy**. Part 1: Development of multiple height calibrations *Appita Journal*, 2009.

SCHUMACHER, F.X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1932.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: Parte I: modelos de regressão linear e não-linear; Parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento, e peso de matéria seca. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.

SERENINI, L.; DE MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; PIMENTA, A. S. Wood quality of six *Eucalyptus* clones planted in northern Mato Grosso state, Brazil. **Wood Research**, v. 65, n. 4, p. 543–554, 2020.

SETTE JUNIOR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. S.; CHAGAS, M. P.; LACLAU, J. P. Efeito da aplicação do potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, aos 24 meses de idade. **Floresta** (Online), v. 39, p. 535–546, 2009.

SHARMA, S. **Applied Multivariate Techniques**. New York: John Wiley and Sons Inc, 1996.

SILVA, C. A.; KLAUBERG, C.; E CARVALHO, S. DE P. C.; PICCOLO, M. D. C.; RODRIGUEZ, L. C. E. Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, p. 135–146, 2015.

SILVA, H. D. DA; FERREIRA, C. A.; CORRÊA, R. S.; BELLOTE, A. F. J.; TUSSOLINI, E. L. Alocação de Biomassa e Ajuste de Equações para Estimativa de Biomassa em Compartimentos Aéreos de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim Pesquisas Florestais**, v. 49, p. 83–95, 2004.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **FLORESTA**, v. 38, n. 1, p. 185–206, 2008.

SMITH, D. M. **Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples**. USDA Forest Products Laboratory No 2014, p. 1–8, 1954.

SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, E.; MÄKIPÄÄ, R.; et al. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. **European Journal of Forest Research**, v. 126, n. 2, p. 197–207, 2007.

SOUZA, J. T. DE; FIORENTIN, L. D. Quantificação da biomassa e do carbono em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, em Santa Maria, RS. **Unoesc & Ciência**, v. 4, n. 2, p. 253–262, 2013.

DE SOUZA, J. T.; FIORENTIN, L. D. Quantificação da biomassa e do carbono em povoamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, em Santa Maria, RS. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 273–279, 2013.

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

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light, and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 2004.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM [SAS]. **SAS/STAT User's Guide**. 2002. SAS Institute.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; ALBINO, J. C.; MORITA, M. **Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de Eucalyptus plantadas em Uberaba, MG**. Boletim de Pesquisa Florestal, v. 14, p. 28–28, 1987.

TAN, B.; GRATTAPAGLIA, D.; WU, H. X.; INGVARSSON, P. K. Genomic relationships reveal significant dominance effects for growth in hybrid *Eucalyptus*. **Plant Science**, v. 267, p. 84–93, 2018.

TER-MIKAELIAN, M. T.; PARKER, W. C. Estimating biomass of white spruce seedlings with vertical photo imagery. **New Forests**, v. 20, n. 2, p. 145–162, 2000.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology**. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1), p. 104, 1955.

TOMAZELLO FILHO, M. Application of technique in nondestructive evaluation of eucalyptus wood. Maderas: **Ciencia y Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 139–150, 2008.

TRAUTENMÜLLER, J. W.; PÉLLICO NETTO, S.; BALBINOT, R.; et al. Regression estimators for aboveground biomass and its constituent parts of trees in native southern Brazilian forests. **Ecological Indicators**, v. 130, p. 108025, 2021.

TRUGILHO, P. F.; DA SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; et al. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 178–186, 2005.

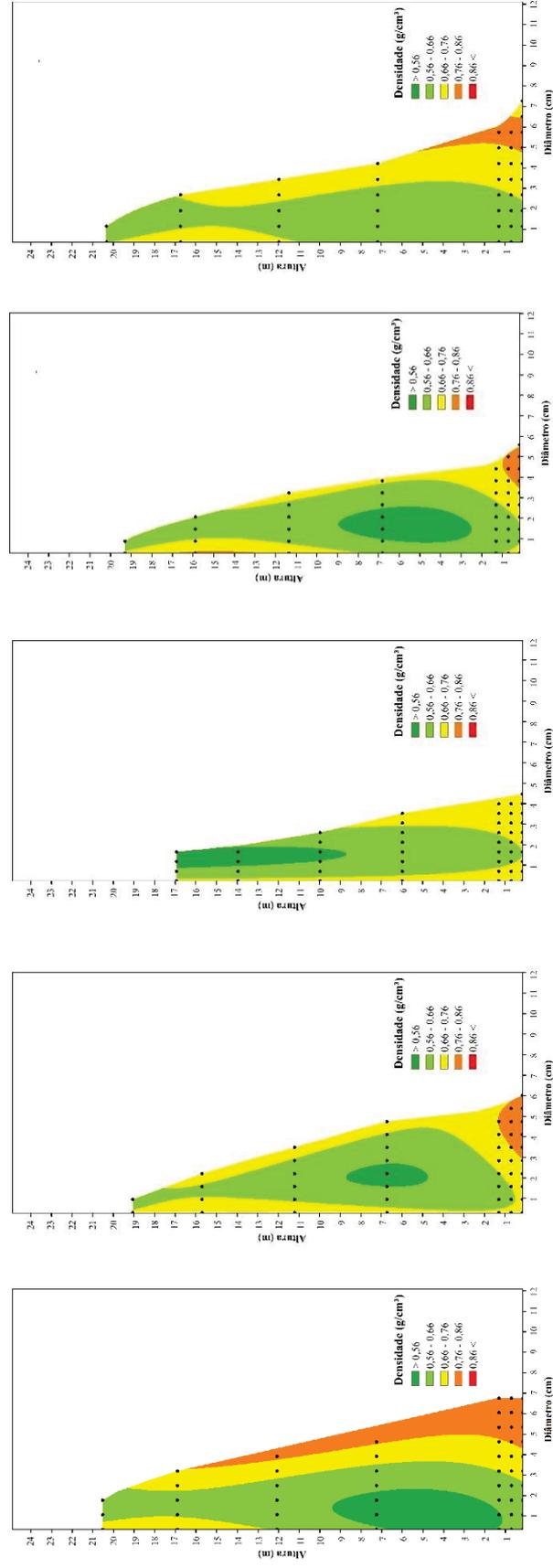
VEGA, M.; HAMILTON, M.; DOWNES, G.; HARRISON, P. A.; POTTS, B. Radial variation in modulus of elasticity, microfibril angle and wood density of veneer logs from plantation-grown *Eucalyptus nitens*. **Annals of Forest Science**, v. 77, n. 65, 2020.

VEGA-NIEVA, D. J.; VALERO, E.; PICOS, J.; JIMÉNEZ, E. Modeling the above and belowground biomass of planted and coppiced *Eucalyptus globulus* stands in NW Spain. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 7, p. 967–980, 2015.

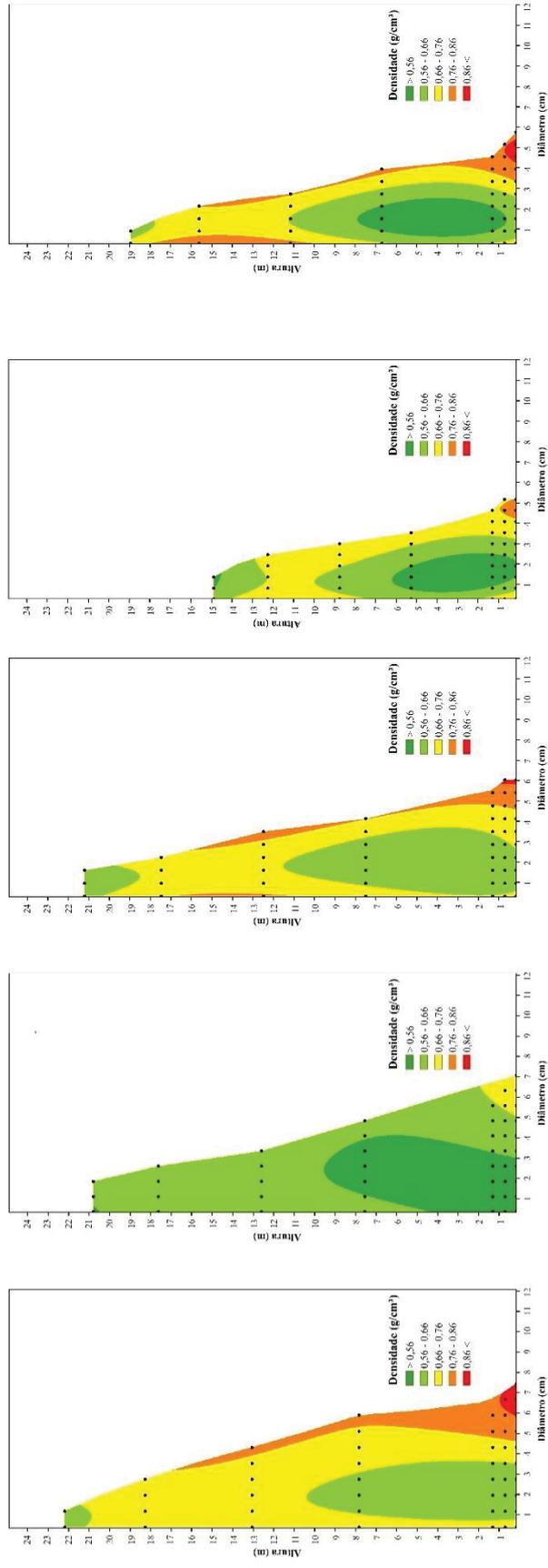
- VENTUROLI, F.; SANQUETTA, C. R. Biomass and allometric relations in a Brazilian Savanna-Park. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 47, n. 124, p. 708–713, 2019. University of São Paulo.
- VIDAURRE, GRAZIELA BAPTISTA; SILVA, J. G. M. DA; MOULIN, J. C.; CARNEIRO, A. DE C. O. **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. 2020.
- VIERA, M.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. A Complete Assessment of Carbon Stocks in Above and Belowground Biomass Components of a Hybrid Eucalyptus Plantation in Southern Brazil. **Forests**, v. 10, n. 7, p. 536, 2019.
- WHITE, H. A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. **Econometrica**, v. 48, n. 4, p. 817, 1980.
- WILKS, S. S. Certain generalizations in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 24, p. 471–494, 1932.
- WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V. Alocação de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus saligna* Sm. na região de Guaíba - Rio Grande do Sul. **CERNE**, v. 21, n. 4, p. 625–632, 2015.
- ZELLNER, A. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. **Journal of the American Statistical Association**, v. 57, n. 298, p. 348–368, 1962.
- ZHANG, Y.; WANG, X. Geographical spatial distribution, and productivity dynamic change of eucalyptus plantations in China. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 19764, 2021.
- ZHAO, D.; KANE, M.; MARKEWITZ, D.; TESKEY, R.; CLUTTER, M. Additive Tree Biomass Equations for Midrotation Loblolly Pine Plantations. **Forest Science**, v. 61, n. 4, p. 613–623, 2015.
- ZOBEL, B J; JETT, J. B. **Genetics of wood production**. Berlin, 1995.

## 6 APÊNDICE 1 – Mapas de densidade aparente

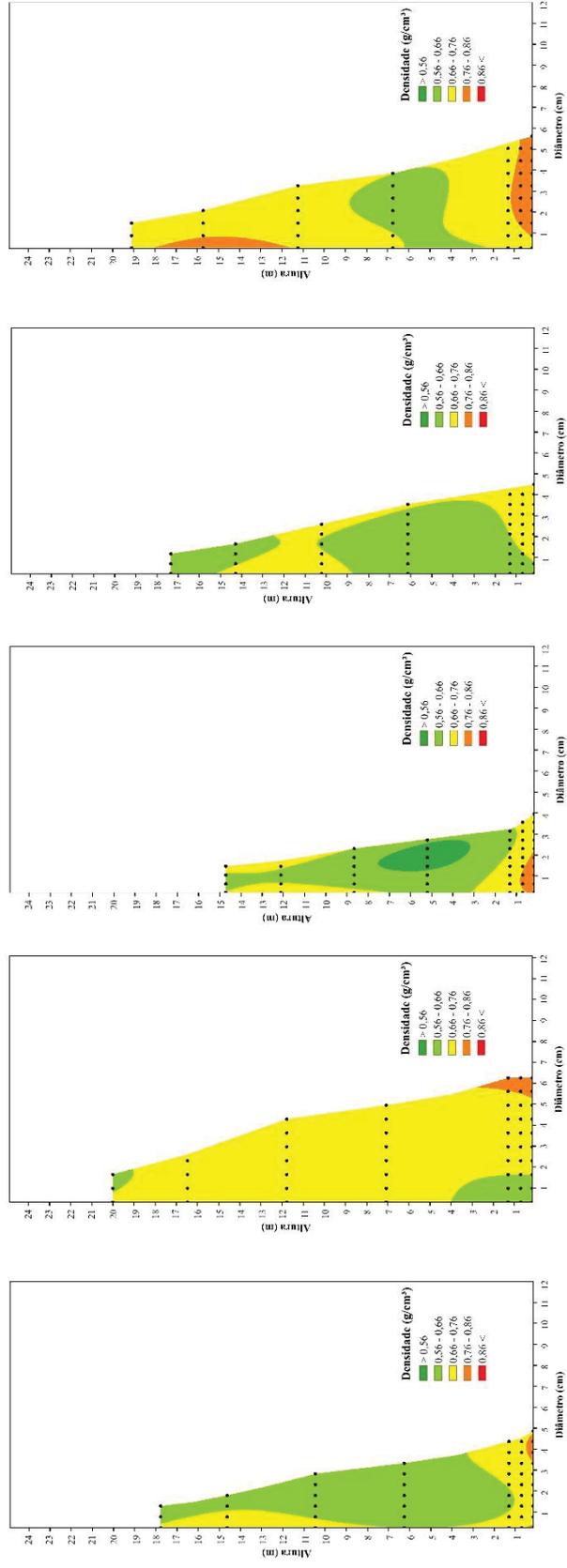
APÊNDICE 1.1 – MAPA DE DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C1 NA REGIÃO 1, MG.



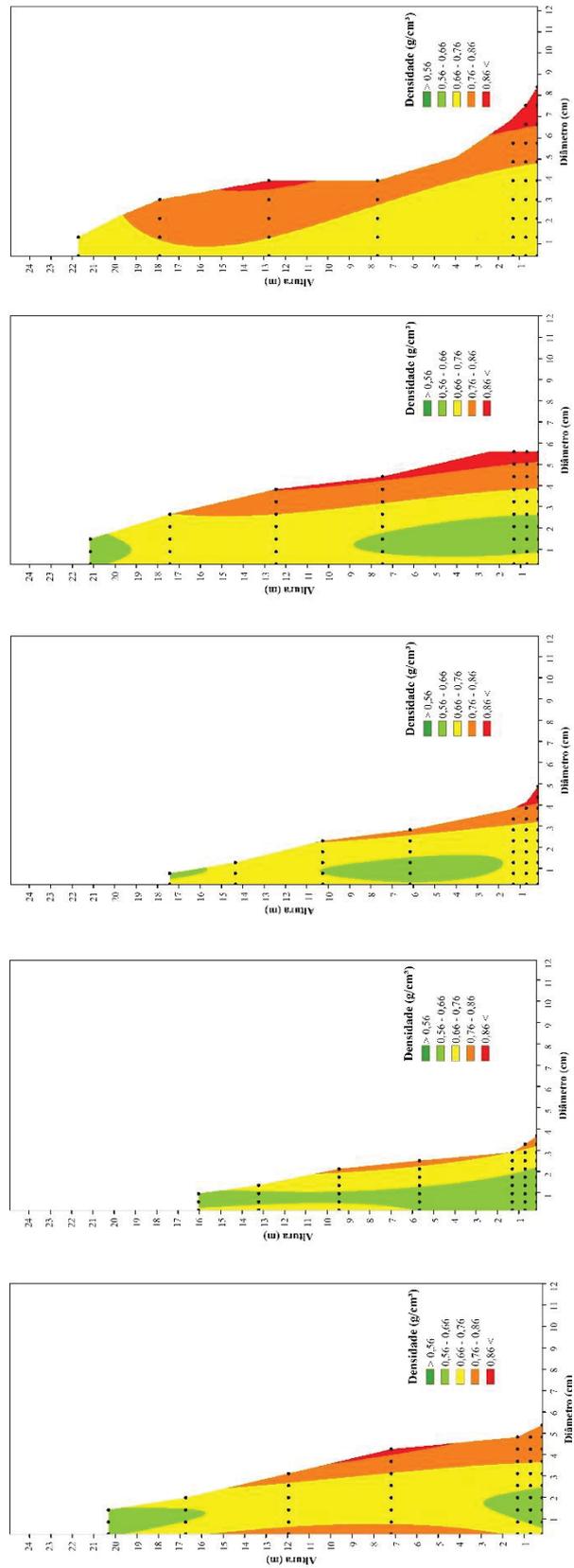
APÊNDICE 1.2 – MAPA DE DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C2 NA REGIÃO 1, MG



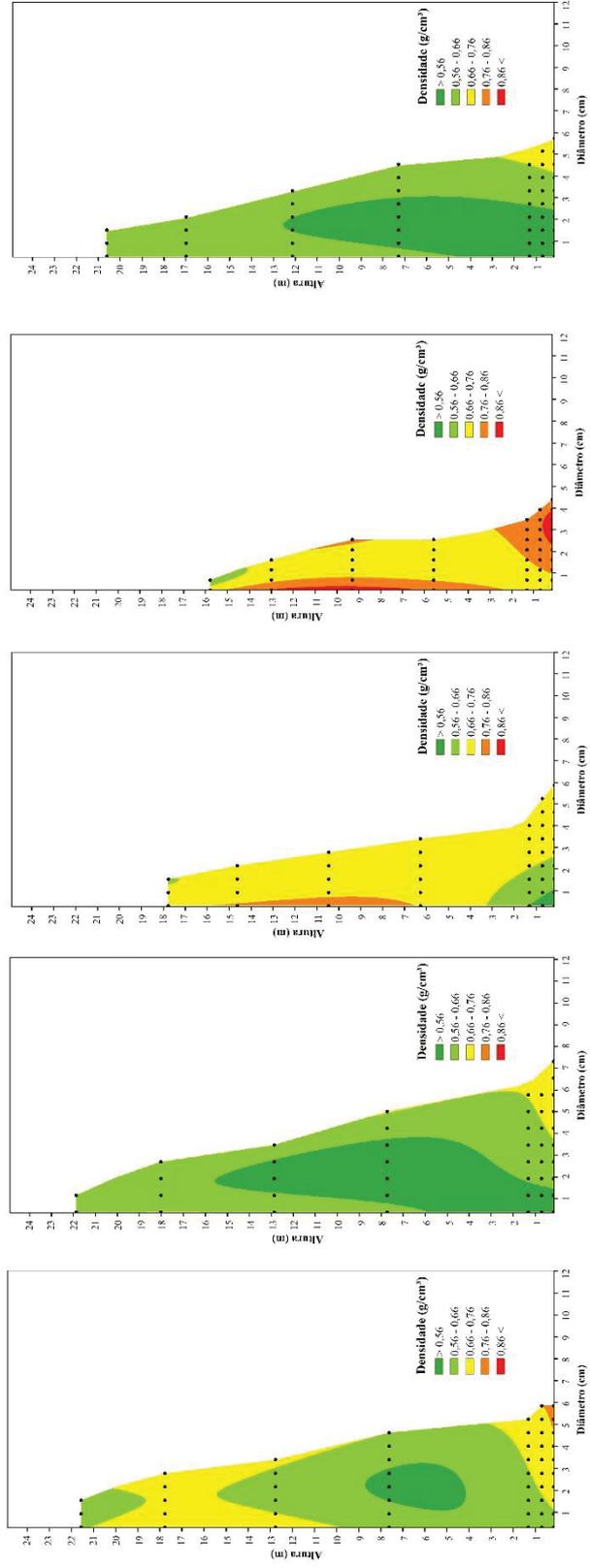
APÊNDICE 1.3 – MAPA DE DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C3 NA REGIÃO 1, MG.



APÊNDICE 1.4 – MAPA DE DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C4 NA REGIÃO 1, MG.



APÊNDICE 1.5 – MAPA DE DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C4 NA REGIÃO 2, MG.



APÊNDICE 1.6 – MAPA DE DENSIDADE DO LENHO NO SENTIDO LONGITUDINAL DO FUSTE DAS ÁRVORES DOS CLONES C2 NA REGIÃO 2, MG.

