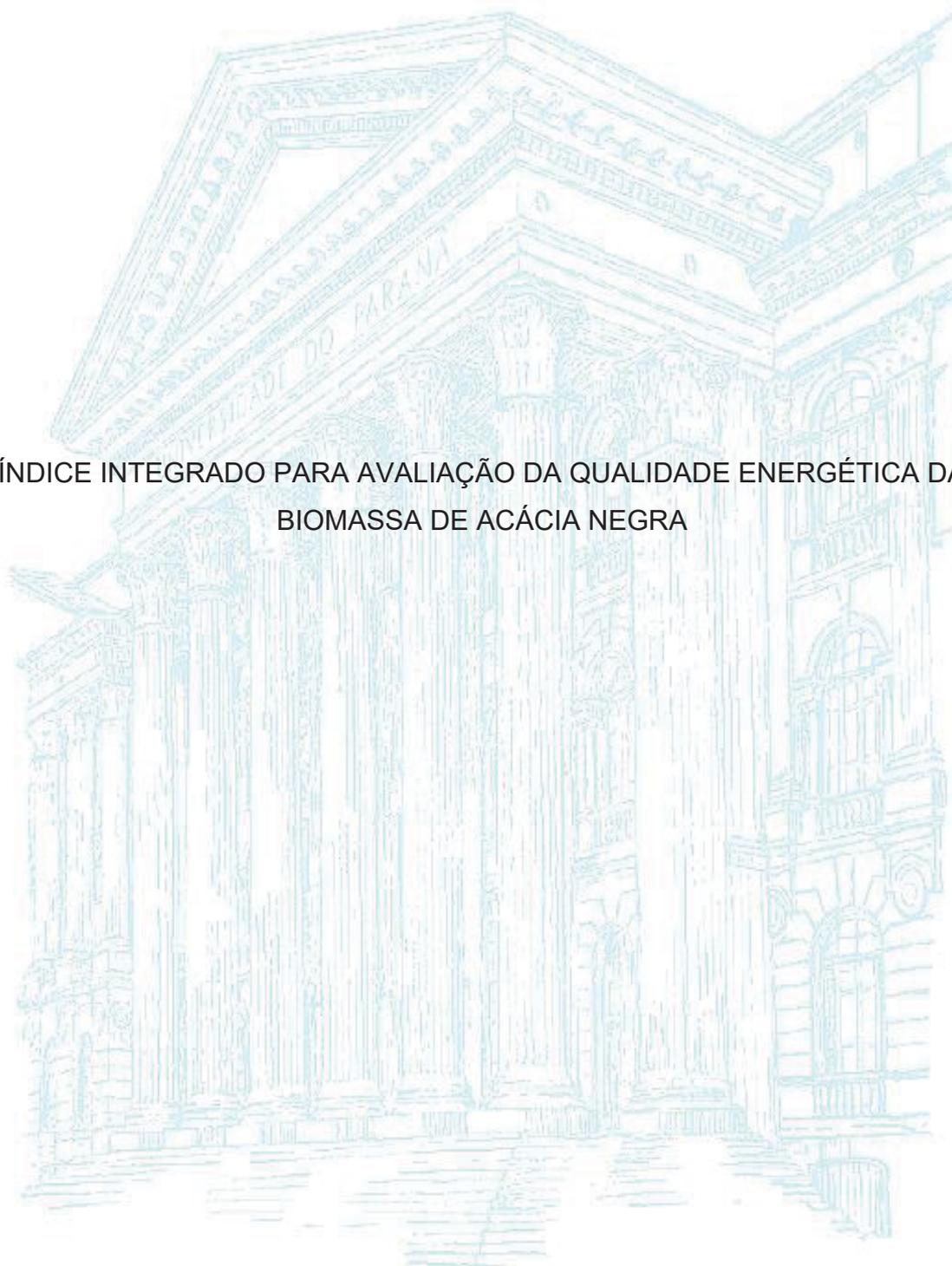


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SÉRGIO COSTA JUNIOR

ÍNDICE INTEGRADO PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ENERGÉTICA DA  
BIOMASSA DE ACÁCIA NEGRA



CURITIBA

2022

SÉRGIO COSTA JUNIOR

ÍNDICE INTEGRADO PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ENERGÉTICA DA  
BIOMASSA DE ACÁCIA NEGRA

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 Tecnologia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Behling

Co-orientador: Prof. Dr. Henrique Soares Koehler

CURITIBA  
2022

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

Costa Junior, Sérgio

Índice integrado para avaliação da qualidade energética da biomassa de  
acácia negra / Sérgio Costa Junior. - Curitiba, 2022.

126 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Coorientadores: Prof. Dr. Alexandre Behling

Prof. Dr. Henrique Soares Koehler

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências  
Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba,  
23/09//2022.

Área de concentração: Tecnologia florestal

1. Biomassa florestal. 2. Acácia. 3. Árvores - Medição. 4. Povoamento florestal -  
Amostragem. 5. Energia - Fontes alternativas. 6. Recursos energéticos. I. Silva,  
Dimas Agostinho da. II. Behling, Alexandre. III. Koehler, Henrique Soares. IV.  
Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD - 634.9

CDU - 634.0.548



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO SETOR  
DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA FLORESTAL  
- 40001016015P0

## 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 **SERGIO COSTA JUNIOR** intitulada: **ÍNDICE INTEGRADO PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DE ACÁCIA NEGRA**, sob orientação do Prof. Dr. DIMAS AGOSTINHO DA SILVA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor 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, 23 de Setembro de 2022.

Assinatura Eletrônica  
26/09/2022 14:31:28.0  
DIMAS AGOSTINHO DA SILVA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
26/09/2022 17:00:25.0  
GUILHERME DE CASTRO ANDRADE  
Avaliador Externo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA  
AGROPECUÁRIA)

Assinatura Eletrônica  
26/09/2022 14:33:27.0  
ELDER ELOY  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA -  
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN)

Assinatura Eletrônica  
26/09/2022 14:46:34.0  
THIAGO CAMPOS MONTEIRO  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
27/09/2022 16:43:15.0  
SYLVIO PÉLLICO NETTO  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

---

Avenida Lothário Meissner, 632 - CURITIBA - Paraná - Brasil CEP  
80210-170 - Tel: (41) 3360-4212 - E-mail: pgfloresta@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 225094

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 225094

*A minha esposa Débora.*

*Aos meus pais Sérgio e Andrea.*

*A minha irmã Athina.*

*Dedico*

*A experiência humana não seria tão rica  
e gratificante se não existissem obstáculos a superar.  
O cume ensolarado de uma montanha não seria tão maravilhoso  
se não existissem vales sombrios a atravessar.*

*Helen Keller*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, primeiramente, por conceder-me a vida, proteção e inúmeras bênçãos.

Ao Professor Dr. Dimas Agostinho da Silva, uma pessoa admirável, obrigado pela confiança, paciência, compreensão, orientação, apoio, amizade, ensinamentos, e por proporcionar as condições necessárias para a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Alexandre Behling, obrigado pelas suas expressivas contribuições para esse trabalho, auxílio nas análises estatísticas, confiança, paciência, orientação, conselhos, ensinamentos e amizade. Agradeço ainda, por disponibilizar dados e material para a presente pesquisa.

Ao Professor Dr. Henrique Soares Koehler, agradeço pelas valorosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha querida família, meus pais Sérgio e Andrea, e minha irmã Athina, o apoio e principalmente os valores e princípios que me ensinaram foram essenciais para chegar até aqui.

À minha amada companheira Débora, seu amor, carinho, compreensão e paciência durante esses longos anos contribuíram para o êxito deste trabalho.

Ao Professor Dr. Sylvio Péllico Netto por seus ensinamentos e suas contribuições para este trabalho.

A todos os professores do programa de pós-graduação, obrigado pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

À TANAGRO S.A. e TANAC S.A., agradeço por disponibilizar os dados e amostras utilizadas na condução desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de realizar o Doutorado.

À CAPES e ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudos, o que permitiu a realização da presente pesquisa.

Aos amigos Jonatham Trautenmüller, Antônio Woycikiewicz, Myrcia Minatti, obrigado pela parceria em tantos trabalhos e principalmente pela amizade e companheirismo.

Aos amigos e colegas dos laboratórios de Manejo Florestal, Laboratório de Energia da biomassa e dos demais laboratórios, deixo meu agradecimento.

## RESUMO

A biomassa florestal como matéria prima para a geração de energia vem sendo utilizada ao longo dos anos. Por se tratar de uma fonte de energia renovável vem ganhando destaque. Diversos estudos foram realizados tratando da biomassa florestal e suas propriedades energéticas, entretanto, ainda há dificuldades para mensurar e comparar a qualidade energética de diferentes biomassas florestais. Assim, este estudo teve como objetivo propor uma forma de avaliar e comparar a qualidade energética da biomassa de povoamentos florestais. O objeto de estudo foi *Acacia mearnsii* De Wild. (acácia negra). Para esse fim, povoamentos comerciais da espécie foram amostrados em três regiões de cultivo (Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini) no Rio Grande do Sul, com 1 a 10 anos classificados em grupos de idade denominados I, II, III e IV. Nesses povoamentos foram mensuradas 3.462 árvores para obtenção das variáveis circunferência à altura do peito e altura total, e destas, 699 árvores foram selecionadas para a avaliação da biomassa de copa, fuste e total (copa + fuste) e suas propriedades energéticas: densidade básica, teor de materiais voláteis, carbono fixo, cinzas, poder calorífico superior e a densidade energética. Considerando copa, fuste e total, a função densidade de probabilidade Normal aderiu aos dados de poder calorífico superior, densidade energética, teor de materiais voláteis e carbono fixo, Lognormal aderiu à densidade básica e teor de cinzas e Burr a aderiu aos estoques de biomassa. A amplitude das curvas ajustadas para a copa é maior do que as ajustadas para o fuste. Para a copa dois fatores explicaram 85% da variância dos dados energéticos. Para o fuste e total três fatores explicaram 94% e 96% da variância. O potencial energético médio por árvore (PEMA) foi capaz de avaliar a qualidade energética e permitiu comparar diferentes biomassas. A estrutura amostral proposta resultou em erro de amostragem relativo menor que 9.5%, podendo ser utilizada para avaliar a qualidade energética da biomassa de povoamentos florestais de acácia negra em diferentes locais de cultivo, com múltiplas idades e diferentes componentes da biomassa.

**Palavras-chave:** Propriedades energéticas; Povoamentos florestais; Biomassa; Componentes da biomassa.

## ABSTRACT

Forest biomass as a raw material for energy generation has been used over the years. As it is a renewable energy source, it has been standing out. Several studies were conducted dealing with forest biomass and its energy properties, however, there are still difficulties in measuring and comparing the energy quality of different forest biomasses. Thus, this study aimed to propose a way to evaluate and compare the energy quality of biomass from forest stands. The object of study was *Acacia mearnsii* De Wild. (black wattle). In that sense, commercial stands of the species were sampled in three growing regions (Cristal, Encruzilhada do Sul and Piratini) in Rio Grande Sul, from 1 to 10 years old classified in age groups named I, II, III and IV. In these stands, 3,462 trees were measured for chest height and total height. Six hundred and ninety-nine of those trees were selected for the evaluation of crown, stem and total (crown + stem) biomass, and energy properties: basic density, volatile materials content, fixed carbon, ash, gross calorific value, and energy density. Considering crown, stem and total, the density and Normal probability distribution describes the data of gross calorific value, energy density, volatile materials content, and fixed carbon, Lognormal describes basic density and ash content and Burr describes the biomass stocks. The amplitude of the curves adjusted for the crown is greater than those adjusted for the stem. For the crown two factors explained 85% of the variance of the energy data. For stem and total three factors explained 94% and 96% of variance. The average energy potential per tree (PEMA) was able to evaluate the energy quality and allowed to compare different biomass. The proposed sampling structure resulted in a relative sampling error lower than 9.5%, and can be used to evaluate the energy quality of the biomass of black wattle forest stands in different cultivation stands, with multiple ages and different biomass components.

**Keywords:** Energetic properties; Forest stands; Biomass; Biomass components.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	REGIÕES COM CULTIVO DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL, E DIVISÃO DESTA ÁREA EM TRÊS REGIÕES DENOMINADAS DE ENCRUZILHADA DO SUL, CRISTAL E PIRATINI. ....	33
QUADRO 1 -	VARIÁVEIS QUE FORMAM AS CLASSES DE QUALIDADE E VARIÁVEIS DISCRIMINANTES OU PREDITORAS. ....	41
FIGURA 2 -	GRÁFICOS <i>VIOLIN PLOT</i> PARA A DENSIDADE BÁSICA DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL..	43
FIGURA 3 -	DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA A DENSIDADE BÁSICA DOS COMPONENTES GALHOS E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA-NEGRA CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	44
FIGURA 4 -	GRÁFICOS <i>VIOLIN PLOTS</i> PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. ....	47
FIGURA 5 -	DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE E PROBABILIDADE PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA-NEGRA CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	48
FIGURA 6 -	GRÁFICOS <i>VIOLIN PLOTS</i> PARA A DENSIDADE ENERGÉTICA DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL..	50
FIGURA 7 -	DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA A DENSIDADE ENERGÉTICA DE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE	

	ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	52
FIGURA 8 -	GRÁFICOS VIOLIN PLOTS PARA O TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. ....	54
FIGURA 9 -	DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA O TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS DE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	55
FIGURA 10 -	GRÁFICOS VIOLIN PLOTS PARA O TEOR DE CARBONO FIXO DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL..	58
FIGURA 11 -	FUNÇÕES DENSIDADE E PROBABILIDADE PARA O TEOR DE CARBONO FIXO DE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL..	59
FIGURA 12 -	GRÁFICOS VIOLIN PLOTS PARA O TEOR DE CINZAS DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	61
FIGURA 13 -	DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA O TEOR DE CINZAS DE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL...	63
FIGURA 14 -	GRÁFICOS <i>VIOLIN PLOTS</i> PARA O ESTOQUE DE BIOMASSA DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL..	65

FIGURA 15 -	DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DO ESTOQUE DE BIOMASSA DE COPA DE ÁRVORES DE ACÁCIA-NEGRA CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL...	68
FIGURA 16 -	DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DO ESTOQUE DE BIOMASSA DE FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL..	70
FIGURA 17 -	DENDROGRAMAS DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS ( <i>CLUSTER</i> ) DOS ESTOQUES DE BIOMASSA DE COPA (A) E FUSTE (B) DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	73
FIGURA 18 -	DENDROGRAMAS DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS ( <i>CLUSTER</i> ) DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE COPA (A) E FUSTE (B) DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	73
FIGURA 19 -	DENDROGRAMAS DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS ( <i>CLUSTER</i> ) DA DENSIDADE ENERGÉTICA DE COPA (A) E FUSTE (B) DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	74
FIGURA 20 -	DENDROGRAMAS DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS ( <i>CLUSTER</i> ) DO TEOR DE CINZAS DA COPA (A) E FUSTE (B) DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	74
FIGURA 21 -	RELAÇÃO ENTRE OS FATORES EXTRAÍDOS E AS VARIÁVEIS ENERGÉTICAS PARA A BIOMASSA DA COPA DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA... ..	88
FIGURA 22 -	COMPORTAMENTO DOS FATORES DA BIOMASSA DE COPA AO LONGO DAS IDADES DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA. . .....	89

FIGURA 23 -	RELAÇÃO ENTRE OS FATORES E AS VARIÁVEIS ENERGÉTICAS PARA A BIOMASSA DE FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA.....	91
FIGURA 24 -	COMPORTAMENTO DOS FATORES DA BIOMASSA DE FUSTE AO LONGO DAS IDADES DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA.....	92
FIGURA 25 -	RELAÇÃO ENTRE OS FATORES E AS VARIÁVEIS ENERGÉTICAS PARA A BIOMASSA TOTAL DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA.	93
FIGURA 26 -	COMPORTAMENTO DOS FATORES DA BIOMASSA TOTAL AO LONGO DAS IDADES DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA.....	94
FIGURA 27 -	QUALIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DE ÁRVORES DE ACACIA NEGRA EM POVOAMENTOS COMERCIAIS AO LONGO DAS IDADES POR COMPONENTE.....	97

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	COORDENADAS CENTRAIS E ALTITUDE DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	34
TABELA 2 -	DADOS METEOROLÓGICOS REFERENTE AS REGIÕES EM QUE SE ENCONTRAM OS POVOAMENTOS DE ACACIA NEGRA E AO PERIODO AVALIADO.....	39
TABELA 3 -	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A DENSIDADE BÁSICA ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) DOS GALHOS E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	42
TABELA 4 -	COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA A DENSIDADE BÁSICA DE GALHOS E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	45
TABELA 5 -	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O PODER CALORÍFICO ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	46
TABELA 6 -	COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADES I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	49
TABELA 7 -	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A DENSIDADE ENERGÉTICA ( $\text{Gcal.m}^{-3}$ ) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	50

TABELA 8 -	COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA A DENSIDADE ENERGÉTICA DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. ....	53
TABELA 9 -	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS (%) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	53
TABELA 10 -	COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA O TEOR DE MATERIAS VOLÁTEIS DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADES I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	56
TABELA 11 -	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O TEOR DE CARBONO FIXO (%) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	57
TABELA 12 -	COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA O TEOR DE CARBONO FIXO DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. ....	60
TABELA 13 -	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O TEOR DE CINZAS (%) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	61
TABELA 14 -	COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA O TEOR DE CINZAS DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS	

	DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	64
TABELA 15 -	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O ESTOQUE DE BIOMASSA (kg) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	64
TABELA 16 -	COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA A VARIÁVEL ESTOQUE DE BIOMASSA DA COPA E FUSTE DOS POVOAMENTOS AMOSTRADOS NAS REGIÕES DE CRISTAL, ENCRUZILHADA DO SUL E PIRATINI PARA OS GRUPOS DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	71
TABELA 17 -	CORRELAÇÃO COFENÉTICA DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS ( <i>CLUSTER</i> ) COM A DISTÂNCIA EUCLIDIANA PARA AS VARIÁVEIS: ESTOQUE DE BIOMASSA (EBIO), PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), DENSIDADE ENERGÉTICA (DE), TEOR DE CINZAS (CZ) DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORE DE ACÁCIA NEGRA DE POVOAMENTOS COMERCIAIS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. ....	72
TABELA 18 -	FUNÇÕES DISCRIMINANTES PARA AS VARIÁVEIS: ESTOQUE DE BIOMASSA, PODER CALORÍFICO SUPERIOR, DENSIDADE ENERGÉTICA E TEOR DE CINZAS PARA OS COMPONENTE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA.....	75
TABELA 19 -	MATRIZES DE CONFUSÃO DA ANÁLISE DISCRIMINANTE PARA AS VARIÁVEIS ESTOQUE DE BIOMASSA, PODER CALORÍFICO SUPERIOR, DENSIDADE ENERGÉTICA E TEOR DE CINZAS PARA A COPA E FUSTE DE ÁRVORE DE ACÁCIA NEGRA.....	78

TABELA 20 -	RESUMO ANÁLISE FATORIAL DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA BIOMASSA DE COPA, FUSTE E TOTAL DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA.....	86
TABELA 21 -	VALORES MÉDIOS E VARIÂNCIA DO PEMA POR ESTRATO, CLASSE DE IDADE, LOCAL E COMPONENTES DA BIOMASSA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	109
TABELA 22 -	VALORES MÉDIOS E VARIÂNCIA DO PEMA ESTRATIFICADOS PARA OS LOCAIS E COMPONENTES DA BIOMASSA PARA POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	110
TABELA 23 -	ESTATÍSTICA DA AMOSTRAGEM ESTRATIFICADA DO PEMA PARA OS COMPONENTES DA BIOMASSA COPA, FUSTE E TOTAL PARA POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.....	110

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>ASPECTOS GERAIS</b> .....	<b>18</b>
1.1	INTRODUÇÃO .....	18
1.2	OBJETIVOS .....	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>21</b>
2.1	CULTIVO DA ACÁCIA NEGRA.....	21
2.2	PROPRIEDADES ENERGÉTICAS .....	23
2.2.1	Densidade básica .....	24
2.2.2	Poder calorífico superior .....	25
2.2.3	Teor de materiais voláteis .....	27
2.2.4	Teor de carbono fixo .....	28
2.2.5	Teor de cinzas .....	28
2.3	QUALIDADE ENERGÉTICA .....	29
2.4	ESTRUTURA AMOSTRAL.....	30
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA DE ÁRVORES DE ACACIA NEGRA PARA FINS ENERGÉTICOS</b> .....	<b>31</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	31
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	32
3.2.1	Seleção e amostragem dos povoamentos.....	33
3.2.2	Variáveis mensuradas .....	35
3.2.3	Variáveis edáficas .....	38
3.2.4	Variáveis Meteorológicas .....	39
3.2.5	Análises estatísticas .....	39
3.2.5.1	Estatísticas descritivas .....	39
3.2.5.2	Distribuições das variáveis.....	40
3.2.5.3	Classes de qualidade da biomassa para produção de energia.....	40

3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	42
3.3.1	Análise exploratória dos dados .....	42
3.3.1.1	Densidade básica .....	42
3.3.1.2	Poder calorífico superior .....	46
3.3.1.3	Densidade energética .....	49
3.3.1.4	Teores de materiais voláteis .....	53
3.3.1.5	Teores de carbono fixo.....	56
3.3.1.6	Teores de cinzas .....	60
3.3.1.7	Estoques de biomassa .....	64
3.3.2	Classes de qualidade .....	72
3.4	CONCLUSÕES .....	79
<b>4</b>	<b>ÍNDICE INTEGRADO PARA QUALIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DE ACÁCIA NEGRA .....</b>	<b>81</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	81
4.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	82
4.2.1	Seleção e amostragem dos povoamentos .....	82
4.2.2	Variáveis mensuradas .....	83
4.2.3	Análises estatísticas .....	84
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	86
4.4	CONCLUSÕES .....	99
<b>5</b>	<b>ESTRUTURA AMOSTRAL PARA AVALIAR O POTENCIAL ENERGÉTICO MÉDIO POR ÁRVORE-PEMA.....</b>	<b>100</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	100
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	101
5.2.1	Objeto de estudo .....	101
5.2.2	Variáveis mensuradas .....	102
5.2.3	Potencial energético médio por árvore – PEMA .....	103
5.2.4	Análise da estrutura de amostragem .....	104

5.2.4.1	Equações para a média e variância.....	105
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	108
5.3.1	Aplicação da estrutura amostral.....	108
5.4	CONCLUSÕES .....	112
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>113</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>115</b>

## 1 ASPECTOS GERAIS

### 1.1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, o crescimento econômico e o desenvolvimento de novas tecnologias estiveram atrelados ao aumento do consumo de energia. De acordo com Kaplan (2015) a energia é um fator importante que afeta a estrutura econômica de um país, considerada um elemento primário de desenvolvimento econômico e social no mundo. Carvalho (2014) em seu artigo “Energia e Sociedade” descreve como foram as transformações no uso da energia ocorridas ao longo dos anos.

Hoje há diversas iniciativas dedicadas a pesquisar e testar diferentes fontes energéticas que sejam sustentáveis econômica, ambiental e socialmente. Entre as fontes pesquisadas está a biomassa, em especial a de origem florestal. De acordo com Carvalho (2014) a cerca de seis mil anos a lenha já era utilizada como fonte de energia. Por se tratar de uma fonte de energia renovável é utilizada até os dias atuais, não com a mesma intensidade com a qual já foi utilizada ao longo da história, mas constitui uma importante fonte para muitas pessoas ao redor do mundo.

Diferentes processos foram desenvolvidos para converter a biomassa em energia como, processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação), processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação). Entre os processos de conversão energética da biomassa também está a combustão direta, que é o processo mais utilizado para converter a energia armazenada na biomassa florestal. Essa energia é oriunda do processo fotossintético, em que a árvore converte a energia do sol em energia química que, posteriormente, pode ser convertida em energia térmica e elétrica.

A biomassa florestal é um material heterogêneo, composto por copa (galhos, folhas, flores, frutos e sementes), fuste (madeira e casca) e raízes. Cada componente com diferentes características, logo cada um apresenta um comportamento diferente dentro do aparelho de combustão.

Nesse contexto, torna-se importante conhecer o comportamento das propriedades energéticas de cada componente que possa ser utilizado na geração de

energia, de modo a garantir a eficácia no processo de conversão da energia. As propriedades como densidade básica, poder calorífico superior, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo, teor de cinzas e densidade energética variam com a espécie, idade, local de cultivo, entre indivíduos e entre seus componentes.

Considerando o potencial da biomassa para o uso na geração de energia, e visando aperfeiçoar seu uso para fins energéticos, é importante conhecer o comportamento das variáveis energéticas de cada componente ao longo das idades e nos diferentes locais de cultivo, de modo que seja possível empregá-la de modo eficaz. Essas informações permitem escolher qual biomassa a ser utilizada como matéria prima na geração de energia, subsidiam decisões sobre o manejo florestal visando otimizar os recursos energéticos e, ainda, contribuem para o ajuste dos aparelhos de combustão visando melhorar sua eficiência.

No entanto, ainda há dificuldades quanto a comparação da qualidade entre biomassas com diferentes características. Autores como Ojelel, Otiti e Mugisha (2015), Abbot et al. (1997), Goel e Behl (1996), Bhatt e Todaria (1992) trabalham com um índice de valor combustível, uma razão entre variáveis energéticas, para comparar a qualidade de biomassas utilizadas na forma de lenha em regiões da África. Embora o trabalho dos autores citados contribua para a comparação da qualidade energética, ainda há a necessidade de um procedimento capaz de permitir a comparação de biomassa com diferentes características, como é o caso da biomassa de diferentes componentes, idades, espécies e locais.

Além de comparar a qualidade energética da biomassa dos diferentes componentes de uma floresta, deparamo-nos com a dificuldade em mensurar o seu potencial energético. Mensurar essas variáveis demanda tempo e recursos financeiros, sendo imprescindível o emprego de técnicas que minimizem o uso desses recursos, mas que também garantam a representação da variabilidade existente nos povoamentos florestais. Nesse contexto, se faz necessário o emprego de uma estrutura amostral adequada a essa finalidade.

Conhecer o comportamento das propriedades energéticas, classificá-las, comparar a qualidade de diferentes biomassas e estruturar um procedimento adequado para amostrá-la são ferramentas importantes para o planejamento das atividades florestais. Estas informações subsidiam a tomada de decisões por parte

das empresas que consomem biomassa como matéria prima para gerar energia e, também, por parte dos produtores que comercializam a biomassa.

Nesse sentido foi testada a hipótese: A avaliação da qualidade energética de povoamentos florestais poderá ser efetuada por meio de um índice integrado que incorpore em seu contexto a densidade básica da madeira, suas propriedades químicas (poder calorífico, teores de materiais voláteis, de carbono fixo e de cinzas), combinados por meio de análise fatorial, expresso por componentes das árvore e composto por uma ponderação dos fatores identificados para cada um deles pelas respectivas variâncias devidamente estimadas.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento do Índice Integrado, que pressupõe a utilização de Análise Fatorial para identificar os fatores que são significantes para integração neste novo Índice, denominado Potencial Energético Médio por Árvore – PEMA. Ele visa avaliar e comparar a qualidade energética da biomassa em povoamentos de acácia negra oriundos da empresa Tanagro, localizada no Rio Grande do Sul, Brasil. Para tanto, será imprescindível:

- i) Conhecer as principais propriedades energéticas dos componentes da biomassa de árvores de acácia negra, de modo a compreender o comportamento de tais características ao longo das idades de cultivo, incluindo entre elas a densidade básica, as suas propriedades químicas, como poder calorífico e teores de materiais voláteis, de carbono fixo e de cinzas;
- ii) Agrupar as árvores de acácia negra em classes de qualidade, expressas por suas variáveis energéticas e avaliá-las quanto sua distribuição;
- iii) Desenvolver um procedimento capaz de avaliar a qualidade energética da biomassa das árvores da acácia negra por meio de fatores para cada árvore, obtidos a partir das avaliações integradas das correlações entre as variáveis enumeradas acima e selecionados pela significância de sua melhor contribuição utilizando-se o procedimento de análise

fatorial com aplicação da técnica de componentes principais com rotação varimax;

- iv) Determinar um modelo amostral para avaliar o potencial energético das florestas de acácia negra com diferentes idades, locais de cultivo e em diferentes componentes da biomassa.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para uma melhor organização o trabalho foi estruturado em três secções. A secção 1 abrange os aspectos gerais: introdução, objetivos e a revisão de literatura. A secção 2 é composta por três estudos que foram realizados para atender os objetivos propostos. Cada estudo originou um capítulo, organizado na forma de artigo científico, composto por introdução, material e métodos, resultados e discussões e conclusões. A secção 3 é composta pelas considerações finais, nas quais estão apresentadas as conclusões gerais da pesquisa e as referências bibliográficas citadas em todas as secções.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CULTIVO DA ACÁCIA NEGRA

A espécie *Acacia mearnsii* De Wild. pertence à família Fabaceae, conhecida popularmente como acácia negra, cujo nome comum refere-se à coloração escura da casca e da folhagem. Ela é uma árvore de porte médio com casca castanha-escura rica em tanino e copa arredondada (MARCHIORI, 1997), originária da Austrália.

Em 1868 a acácia negra foi levada da Austrália para a África do Sul, onde cerca de vinte anos mais tarde sua casca começou a ser empregada como substância tanante, utilizada para o curtimento de peles e couro (MÜLLER, 2006). Alexandre Bleckmann em 1918 foi quem introduziu a espécie no Brasil em São Leopoldo no estado do Rio Grande do Sul.

O primeiro plantio comercial de acácia negra no Brasil foi no estado do Rio Grande do Sul a partir de 1940, quando se iniciou a produção comercial impulsionada pela empresa TANAC S.A. De acordo com Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2021), o gênero *Acacia* é uma das espécies mais plantas no Brasil depois dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Hoje a cultura da acácia negra desempenha um importante papel no setor florestal, principalmente do estado do Rio Grande do Sul.

O cultivo da acácia negra é uma atividade econômica interessante, devido a maior parte dos plantios ocorrerem em minifúndios, ou seja, por pequenos e médios produtores, que detém aproximadamente 60% das plantações (STEIN; TONIETTO, 1997; SIMON, 1999). Nas pequenas propriedades, a acácia negra é bem aceita devido ser cultivada em sistemas agrossilvipastoris, o que, de acordo com Schneider et al. (2001), ajudaram na sua aceitação.

A cultura da acácia negra oferece uma alternativa de uso do solo viável econômica e ecologicamente (FLEIG, 1993). Segundo Kannegiesser (1990), a espécie possui habilidades de colonizar diversos ambientes, inclusive áreas que tenham perdido quase todo o solo superficial. Contribui com a fertilização do solo devido a fixação de nitrogênio atmosférico. Embora as florestas sejam conduzidas para fornecer produtos a partir de sua biomassa, contribuem ambientalmente com a fixação de carbono.

O cultivo de acácia negra tem como objetivo principal produzir casca para a retirada de extratos vegetais e madeira para a produção de celulose e ou energia. Os extratos vegetais são ricos em tanantes, fenóis e floculantes, e são utilizados para o curtimento de peles e couros, e para o tratamento de água, filtragem de produtos farmacêuticos e químicos (TAFLICK et al. 2013). A madeira da espécie acácia-negra é utilizada como matéria prima de qualidade e superior para a fabricação de celulose e papel, e também, como lenha e carvão para a geração de energia (SIMON, 2005). Recentemente, pellets estão sendo produzidos com a madeira da acácia negra, ampliando seus usos, agregando valor ao produto e aumentando a rentabilidade da cultura. O principal destino dos pellets produzidos com acácia negra em 2020 foi o Reino Unido (IBÁ, 2021).

As áreas de plantio de acácia negra, tanto de empresas como de pequenos proprietários, atingem a maturação a partir do sétimo ano (CALDEIRA et al., 2001).

Pela demanda de madeira e casca ou pela necessidade financeira dos produtores, ocorrem cortes a partir dos 3,5 anos de idade, com perdas na produtividade, densidade da madeira e do teor de tanino na casca (SIMON, 2005). A maior renda líquida é obtida quando o plantio completa sete anos de idade (FLEIG, 1993).

Na colheita dos povoamentos de acácia, todo o fuste (madeira e casca) é exportado, porém, as copas das árvores retiradas e as ponteiros são deixadas em campo, onde são incineradas como prevê o decreto 8.304 de 29 de agosto de 2011 do estado do Rio Grande do Sul. A incineração dessa biomassa é uma medida de controle fitossanitário ao cerambicídeo *Oncideres impluviata* (Germar, 1824) conhecido como cascudo serrador. Contudo, segundo Rachwal et al. (1997), a queima dos resíduos deixados em campo nos povoamentos de acácia negra pode comprometer a fertilidade do solo e a manutenção da produtividade do sítio.

Os resíduos da colheita das florestas de acácia negra (biomassa da copa e árvores mortas) consistem em uma potencial fonte de matéria prima para a geração de energia. Isso corrobora para aumentar os produtos provenientes do cultivo da espécie e, conseqüentemente, aumentar a renda dos produtores.

## 2.2 PROPRIEDADES ENERGÉTICAS

O uso de fontes de energia renováveis vem se destacando e uma dessas fontes é a biomassa. A biomassa pode ser caracterizada por todo material vegetal e os resíduos gerados a partir da sua utilização, podendo ser de origem florestal e de resíduos agrícolas, agroindustriais e urbanos (WATZLAWICK et al. 2020).

A qualidade da biomassa em florestas de rápido crescimento vem ganhando cada vez mais importância para o uso energético (ELOY, 2015). Nesse contexto, as propriedades físicas e químicas da biomassa têm influência direta sobre a viabilidade do uso do material como combustível (BRAND, 2013).

Para Silva et al. (2017) o melhor rendimento energético da biomassa depende de sua constituição química, entre outras propriedades. Dessa forma, é indispensável avaliar as propriedades energéticas (físicas e químicas) da biomassa de modo a assegurar eficiência do processo de produção de energia.

Para avaliar a qualidade energética da biomassa, além da densidade básica da madeira, é necessário analisar suas propriedades químicas, como o poder calorífico e teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas (WATZLAWICK et al. 2020).

### 2.2.1 Densidade básica

De acordo com Eloy (2015), quando se pretende avaliar a qualidade da madeira, a densidade básica é uma das principais características a serem consideradas. A quantidade de energia produzida a partir da queima da madeira também está relacionada diretamente com a sua densidade (GOULART et al. 2003). Além da quantidade de energia, a densidade básica é um importante parâmetro físico utilizado para expressar a qualidade em vários processos industriais, em virtude de essa apresentar relação com outras propriedades (ROCHA, 2011; MATTOS et al. 2011, EISFELD et al. 2009).

De acordo com Burger e Richter (1991), a densidade básica pode variar de 0,130 a 1,400 g.m<sup>-3</sup>. Schneider et al. (2000) relataram o valor médio equivalente a 0,600 g.cm<sup>-3</sup>, para acácia negra. Carvalho (1998) encontrou valores entre 0,560 e 0,850 g.cm<sup>-3</sup>, Freddo (1997), para povoamentos com 18 anos, constatou 0,570 g.cm<sup>-3</sup>.

A densidade básica representa a concentração de massa por volume na madeira, que influencia a velocidade da queima durante a produção direta de energia, por isso, é uma biomassa com maiores valores de densidade básica são mais interessantes (Eloy et al. 2014). Costa Junior et al. (2021) constataram que a densidade básica tende a aumentar com a idade. O autor encontrou valores médios entre 0,422 e 0,449 g.cm<sup>-3</sup> para o fuste de acácia-negra em povoamentos jovens, alcançando valores entre 0,567 g.cm<sup>-3</sup> e 0,581 g.cm<sup>-3</sup> em povoamentos maduros, próximos dos 10 anos de idade.

Latorraca e Albuquerque (2000) também verificaram que a densidade básica tende a aumentar com a idade da árvore. Trugilho, Lima e Mendes (1996) constataram uma tendência de redução da taxa de incremento da densidade básica com a idade.

Segundo os autores a madeira juvenil, primeiros anéis formados, apresenta menor densidade básica e fibras mais curtas, comparada com a madeira adulta.

Trata-se de uma característica resultante da interação entre as propriedades químicas e anatômicas da madeira, em que as variações são provocadas por diferenças nas dimensões celulares, pelas interações entre esses fatores e pela quantidade de componentes químicos presentes (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980). Essas variações da densidade básica são influenciadas, principalmente, pela idade da planta, genótipo, qualidade do material, índice de sítio, clima, condições ambientais e tratos silviculturais (ALZATE et al., 2005; TREVISAN et al., 2007).

Para Eloy (2015) a estrutura da madeira compreende os diferentes tipos celulares (fibras, traqueoides, elementos vasculares e parênquima) e sua proporção no lenho, bem como suas dimensões. Em madeira da mesma espécie as variações da densidade básica são decorrentes, principalmente, de alterações nos componentes estruturais, como lenho inicial ou outonal, lenho de nó, lenho de reação e alterações químicas.

Trugilho, Lima e Mendes (1996) verificaram que a densidade básica apresentou coeficientes de correlação negativos e significantes com o teor de extrativos totais e lignina, e positivo com o teor de holocelulose, demonstrando que está intimamente relacionada com a composição química da madeira, e que os carboidratos são os principais responsáveis pela sua variação.

### 2.2.2 Poder calorífico superior

A combustão da biomassa gera energia liberada na forma de calor durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume do combustível, que pode ser definido como poder calorífico (QUIRINO et al. 2005).

O poder calorífico refere-se à quantidade de energia na forma de calor liberada durante a queima total de uma determinada quantidade de combustível (Cintra, 2009). O autor afirma que o poder calorífico pode ser expresso como superior e inferior. No poder calorífico superior a água formada durante a combustão é condensada e seu calor latente recuperado e somado à energia mensurada. No poder

calorífico inferior o calor de condensação da água não é considerado, pois ele é perdido em forma de vapor. O poder calorífico superior indica o máximo potencial de fornecimento energético, por isso é mais usado em diversos trabalhos como forma de permitir a comparação entre diferentes fontes (CINTRA, 2009).

A qualidade da biomassa para a produção de energia está relacionada a essa variável, quanto maior for o poder calorífico maior será a energia contida na biomassa (HABITZREITER et al. 2020). Protásio et al. (2011) e Eloy et al. (2014) destacam que o poder calorífico superior é uma das propriedades mais importantes da biomassa para a geração de energia. Os mesmos autores (Protásio et al., 2011) encontraram alta correlação entre o poder calorífico superior e os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio.

A umidade e a constituição química da madeira, principalmente a lignina e os extrativos, influenciam o poder calorífico superior da madeira (JARA, 1989). A contribuição energética do carbono fixo com o poder calorífico depende da composição química, como as quantidades de lignina e  $\alpha$ -celulose presentes, que varia entre as fontes vegetais e de acordo com a idade e tecido do material lignocelulósico submetido a combustão (SANTOS 2012). Os extrativos presentes no material lignocelulósico também colaboram com o poder calorífico da biomassa, uma vez que possuem conteúdo energético em suas moléculas liberados durante a combustão (QUIRINO et al. 2005).

Para Quirino et al. (2005) o rendimento energético da madeira (processo de combustão) depende de sua constituição química, em que os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais variam com a espécie. Para Teixeira et al. (2016) o percentual de lignina presente no material está relacionado ao seu poder calorífico, sendo o grande contribuinte do potencial energético da biomassa quando submetida a combustão.

ELOY (2015) encontrou diferenças significativas para o poder calorífico superior de quatro espécies entre três idades, com os maiores valores para a menor idade. O mesmo autor encontrou os menores valores médios de poder calorífico superior em torno de 4.337 a 4.443 kcal.kg<sup>-1</sup> para madeira de *Acacia mearnsii* com 5 anos de idade.

### 2.2.3 Teor de materiais voláteis

Os materiais voláteis podem ser definidos como as substâncias que são desprendidas da madeira, como gases, durante a queima ou carbonização (REIS et al., 2012). De acordo com Brito e Barrichelo (1979), quando a madeira atinge aproximadamente 260°C, começa a ser degradada quimicamente e os materiais voláteis começam a ser vaporizados. Os materiais voláteis, durante a queima da biomassa, volatilizam rapidamente, diminuindo o tempo em que o combustível permanece dentro do aparelho de combustão, podendo contribuir para uma baixa eficiência energética (CHAVES et al. 2013).

De acordo com Orellana (2015), a biomassa é um combustível rico em materiais voláteis, que constituem cerca de  $\frac{3}{4}$  de sua massa. De acordo com Nogueira e Lora (2003), o processo de combustão transcorre em seis etapas consecutivas sendo: secagem, emissão, ignição, queima dos voláteis em chama, extinção da chama e combustão do resíduo de carbono.

Aproximadamente de 50 a 60% do calor aproveitável pela queima da madeira está nos gases voláteis (BRITO; BARRICHELO, 1979). Madeiras com altos teores de materiais voláteis geralmente queimam mais rapidamente (PEREIRA et al. 2000). Quanto maior for o seu teor maior será a reatividade e, conseqüentemente, a ignição do combustível (KLAUTAU, 2008). Para Scremin (2012) um alto teor de materiais voláteis pode afetar o processo de combustão em geral.

Soares et al. (2014) identificaram correlações positivas entre o teor de materiais voláteis e os teores de oxigênio e hidrogênio (0,89 e 0,74, respectivamente) em um estudo com híbridos de eucalipto. Para Soares et al. (2014) o teor de materiais voláteis resulta de componentes oriundos dos extrativos. Castro (2011) afirma que as hemiceluloses contribuem para a queima direta da madeira, pois liberam materiais voláteis durante sua degradação térmica.

#### 2.2.4 Teor de carbono fixo

De acordo com Mckendry (2002) o teor de carbono fixo é a massa restante após a libertação dos materiais voláteis, sem considerar as cinzas e teores de umidade. Para Eloy (2015) o teor de carbono fixo depende principalmente do teor de material volátil, uma vez que os teores de cinzas para madeira são baixos. De acordo com Brand (2010) os teores de materiais voláteis e carbono fixo são inversamente proporcionais.

O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira, sendo inversamente proporcional ao teor de holocelulose (OLIVEIRA, 1988; ELOY, 2015).

A lignina é mais resistente à degradação térmica do que a celulose (BRITO; BARRICHELO, 1979). Um maior teor de carbono fixo é responsável por um maior tempo de residência do combustível dentro do aparelho de queima, o que é preferível, devido a uma queima mais lenta (PEREIRA et al. 2000).

Trugilho e Silva (2001) identificaram que a presença de substâncias, como alguns extrativos e lignina, geram, como consequência, um carvão com maior densidade e maior resistência em termos de propriedades físico-mecânicas. Dessa forma, as madeiras com maiores teores de carbono fixo permanecem mais tempo no aparelho de combustão. O carbono fixo é o maior contribuinte de fonte energética quando a biomassa é aplicada como combustível, pois aumenta a produção de energia durante a combustão e o rendimento energético do combustível nos fornos (SANTOS, 2015).

#### 2.2.5 Teor de cinzas

Para Andrade (2006) as cinzas (material inorgânico) da madeira correspondem aos componentes minerais presentes nos vegetais, que variam entre espécies e indivíduos de uma mesma espécie. Conforme o desenvolvimento fisiológico da árvore cada componente demanda por diferentes elementos minerais.

Apesar das concentrações desses elementos variarem em função da espécie, idade, local e época do ano, há uma tendência de determinados componentes apresentarem maiores demandas (FOEKEL, 2005; ROCHA, 2011).

As cinzas correspondem às substâncias compostas de material inorgânico que não entram em combustão, com relação inversa ao poder calorífico (CHAVES et al. 2013; ELOY, 2015). As cinzas resultam da combustão da biomassa, sendo constituídas, na maioria das vezes, de compostos de silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe). Quando presentes em alta concentração reduzem o poder calorífico e, também, afetam a transferência de calor (KLAUTAU, 2008).

Um alto teor de cinzas contribui para a redução da eficiência da conversão energética, devido ao aumento do consumo de oxigênio para derreter as cinzas e pela perda de calor com a saída das cinzas do reator (VIERA et al. 2013). O ponto de amolecimento e fusão das cinzas também é importante, pois na combustão com temperaturas maiores para o seu amolecimento podem propiciar a aglomeração denominada fusão da cinza, que reduz a eficiência da troca de calor no equipamento (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008). Dessa forma, o teor de cinzas é uma variável fundamental na avaliação de combustíveis de biomassa (PROTÁSIO et al. 2011).

### 2.3 QUALIDADE ENERGÉTICA

De acordo com Carneiro et al. (2014) a densidade básica está fortemente relacionada com a produção energética, quanto maior a densidade básica, maior será a quantidade de energia estocada por metro cúbico. Segundo Watzlawick et al. (2020) para a finalidade energética, além da densidade básica da madeira, é necessário analisar suas propriedades químicas, como o poder calorífico e teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, ou seja, ao optar por uma biomassa para ser utilizada como matéria prima para a geração de energia, diferentes características devem ser avaliadas. Entre elas a disponibilidade de matéria prima, dado geralmente pelo estoque de biomassa, a qualidade, que geralmente é avaliada por meio das propriedades energéticas.

Algumas pesquisas abordam formas de comparar a qualidade da biomassa para fins energéticos. Quirino e Brito (1991) propuseram um índice de combustão (ICOM) para avaliar a qualidade de briquetes produzidos a partir de carvão vegetal. Brand et al (2014) compararam a qualidade da biomassa de árvores de *Pinus* com diferentes idades e componentes por meio das variáveis teor de umidade e poder calorífico líquido.

Ojelel, Otit e Mugisha (2015) propuseram um índice de valor combustível baseado nas variáveis teor de umidade, densidade básica e poder calorífico superior para comparar a qualidade de biomassa utilizada em forma de lenha em Uganda. Abbot et al. (1997) analisaram as características da biomassa em forma de lenha de 16 espécies dominantes no centro sul da África e as compararam utilizando um índice de valor combustível baseado na densidade básica, umidade e teor de cinzas. Autores como Goel e Behl (1996), Bhatt e Todaria (1992) também relatam que o índice de valor combustível depende do poder calorífico, densidade, umidade e teor de cinzas da madeira como importantes parâmetros para a seleção de espécies desejáveis para lenha.

Ao comparar a qualidade de duas ou mais biomassas geralmente são consideradas algumas propriedades energéticas isoladas. Quando se considera mais do que uma propriedade energética começa a dificuldade para apontar a melhor biomassa, uma vez que as propriedades energéticas são físicas e químicas, e por consequência, possuem unidades de medida diferentes. Os índices de valor combustível, citados anteriormente, contribuem para facilitar essas comparações.

## 2.4 ESTRUTURA AMOSTRAL

Uma estrutura amostral adaptada permite que o inventário florestal qualitativo atenda às premissas de representatividade amostral e validade estatística com um menor dispêndio de recursos Para Bolfarine e Bussab (2005) em uma população heterogênea as razões de custos limitam o aumento da amostra, tornando difícil manter uma precisão razoável.

Considerando a variabilidade das propriedades energéticas dos povoamentos de acácia negra de acordo com o local de cultivo, idade e componentes da biomassa, é necessária uma estrutura amostral para avaliar tais propriedades, uma vez que, estas podem ser utilizadas para calcular o índice integrado.

A estratificação facilita a coleta de dados e o processamento desses, tornando-se mais conveniente para o planejamento e a condução do trabalho em campo (SANQUETTA et al. 2014). Uma alternativa apontada para tal situação é a estratificação pela variável de interesse, visando sua homogeneização dentro dos estratos (PÉLLICO NETTO E BRENA, 1997).

### **3 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA DE ÁRVORES DE ACACIA NEGRA PARA FINS ENERGÉTICOS**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

O crescimento e o desenvolvimento da sociedade demandam cada vez mais tecnologias que estão diretamente ligadas ao consumo de energia, principalmente a elétrica (MIRANDA, MARTINS, LOPES, 2019). Com a necessidade de conciliar o âmbito econômico e socioambiental surgem as energias renováveis que, aos poucos, tem conquistado cada vez mais espaço (NUNES, 2015). Entre as fontes de energia renováveis se destaca a biomassa, em especial a florestal. A energia armazenada na biomassa lenhosa é oriunda do processo fotossintético, em que a árvore converte a energia do sol em energia química (TAIZ e ZEIGER, 2004), que posteriormente pode ser convertida em energia térmica e elétrica.

A biomassa florestal é um material heterogêneo, ou seja, suas características variam. Dessa forma, é necessário compreender o comportamento das propriedades energéticas da biomassa a exemplo: quais os fatores a influenciam, em que idade e local de cultivo há os maiores e menores valores. Essas informações são indispensáveis para garantir a eficácia no processo de conversão da energia dessas biomassas.

Nesse contexto encontram-se os povoamentos de acácia negra, em que parte de sua biomassa já vem sendo destinada ao uso energético, principalmente na forma de pellets. No entanto, para aumentar a participação da biomassa de árvores de acácia negra como matéria prima para a geração de energia, ainda são necessários estudos sobre suas propriedades energéticas e seu comportamento ao longo das idades.

A maior parte dos plantios, no estado do Rio Grande do Sul, são realizados em pequenas propriedades rurais com cerca de 30 mil famílias envolvidas nessa atividade, que ocupam aproximadamente 90 mil hectares (TANAC, 2021). Devido a isso, a biomassa dos povoamentos pode ser comercializada com diferentes idades, de acordo com a necessidade de cada produtor. Isso implica em biomassas ainda mais heterogêneas com diferentes características e qualidade distintas.

Tendo em vista a necessidade de se conhecer as características da biomassa dos povoamentos de acácia negra e qualificá-las, foram estabelecidos os objetivos deste estudo, quais sejam: i) estudar as principais características da acácia negra, do ponto de vista energético; ii) compreender o comportamento dessas características ao longo das idades de cultivo; iii) propor a classificação dos povoamentos em três classes de qualidade.

### 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O objeto de estudo foram árvores de acácia negra cultivadas em povoamentos comerciais no estado do Rio Grande do Sul. Para atender os objetivos propostos foram mensuradas variáveis de categorias biométrica, energética, meteorológica e edáficas.

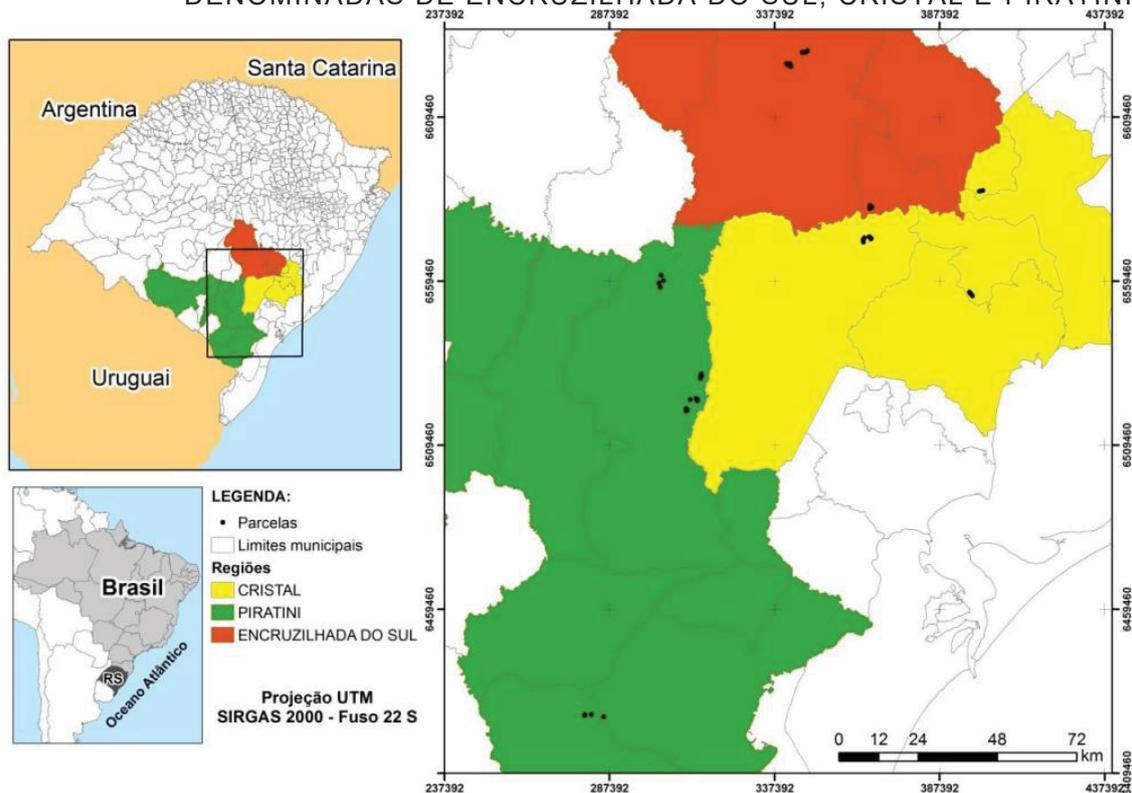
As variáveis qualificadas como biométricas foram: diâmetro a 1,3 m do solo, altura total, comprimento de copa e estoque de biomassa acima do solo. As energéticas foram: densidade básica, poder calorífico superior, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo, teor de cinzas e densidade energética. As variáveis meteorológicas foram: precipitação acumulada, precipitação média anual, temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima, umidade relativa e insolação. Quanto às variáveis edáficas foram avaliados: teores de cálcio, magnésio e alumínio, pH, acidez potencial, capacidade de troca catiônica, saturação por

alumínio, saturação por bases, matéria orgânica, teor de argila, teor de matéria orgânica, teor de potássio e as relações entre cálcio magnésio e potássio e fósforo.

### 3.2.1 Seleção e amostragem dos povoadamentos

A amostragem foi realizada nas regiões que concentram os povoadamentos da espécie no país, que se encontram no estado do Rio Grande do Sul. Os locais foram divididos em três regiões denominadas: município de Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini (FIGURA 1).

FIGURA 1 - REGIÕES COM CULTIVO DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL, E DIVISÃO DESTA ÁREA EM TRÊS REGIÕES DENOMINADAS DE ENCRUZILHADA DO SUL, CRISTAL E PIRATINI.



FONTE: Behling 2016.

Essas regiões estão caracterizadas em relação clima e ao tipo de relevo e solo em Mochiutti (2007). Foram selecionados 12 povoadamentos comerciais, sendo 4 em cada região e cada um em uma idade diferente. Em Cristal foram amostrados povoadamentos com: 1,75; 2,75; 5,00 e 10,08 anos. Em Encruzilhada do Sul com: 1,83;

3,08; 5,75 e 10,75 anos e, em Piratini com: 1,00; 2,33; 5,25 e 9,83 anos. Em cada povoamento foram tomadas quatro unidades amostrais aleatoriamente, totalizando 48 unidades amostrais, compostas por uma parcela circular com área de 78,54m<sup>2</sup>. Todas as árvores encontradas nas parcelas foram medidas. Ao todo 670 árvores vivas foram derrubadas e mensuradas as variáveis descritas na sequência.

Os 12 povoamentos amostrados foram classificados em grupos de acordo com a faixa de idade em que se encontram. O grupo I compreende povoamentos com idade até dois anos, grupo II povoamentos com idade entre dois e quatro anos, o grupo III entre quatro e seis anos e o grupo IV povoamentos com idades acima de seis anos (TABELA 1).

Todos os povoamentos amostrados foram implantados utilizando-se práticas de cultivo mínimo com uma subsolagem a 40 centímetros de profundidade e duas gradagens na linha de plantio. As mudas utilizadas foram produzidas a partir de sementes oriundas das áreas de produção de sementes da empresa TANAGRO S.A. Cerca de 75 gramas de adubo organo-mineral 4-12-8 foi colocado em cada muda. Todos os povoamentos foram implantados com espaçamento de 3 m entre linha e 1,75 entre plantas na linha. As mesmas condições de manejo foram adotadas em todos os povoamentos.

TABELA 1 - COORDENADAS CENTRAIS E ALTITUDE DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Local	Idade (anos)	Grupos	S	W	Altitude (m)	N. de árvores	Falhas Mortas	H <sub>dom</sub> (m)
Cristal	1,75	I	30°58'23,8"	52°23'46,7"	198	59	12%	8,91
	2,75	II	30°58'26,7"	52°25'14,1"	170	47	8%	12,86
	5	III	30°50'49,1"	52°03'06,8"	91	43	17%	16,11
	10,08	IV	31°07'26,1"	52°05'10,8"	121	57	31%	18,73
Encruzilhada do Sul	1,83	I	30°29'54,6"	52°38'33,5"	304	56	5%	8,49
	3,08	II	30°53'16,1"	52°23'33,7"	101	68	9%	12,20
	5,75	III	31°05'23,7"	53°04'05,7"	207	50	23%	17,44
	10,75	IV	30°27'35,8"	52°36'23,7"	294	62	28%	19,43
Piratini	1	I	32°16'09,6"	53°18'59,3"	101	73	7%	3,84
	2,33	II	31°26'25,1"	52°59'35,9"	288	48	17%	14,65
	5,25	III	31°21'05,4"	52°56'45,3"	442	60	11%	15,41
	9,83	IV	31°24'46,5"	52°57'26,7"	235	51	42%	17,51

FONTE: Adaptado de Behling (2016).

EM QUE: S é coordenada a Sul; W é a coordenada a Oeste. H<sub>dom</sub> é a altura dominante.

### 3.2.2 Variáveis mensuradas

As 670 árvores derrubadas foram mensuradas em sua circunferência à altura de 1,3 metros (CAP) e a altura total (H). Ao avaliar a biomassa optou-se por separar as árvores em dois componentes, o fuste (madeira do fuste e casca) e a copa (galhos vivos e mortos, folhas, flores e frutos), conforme definidas por Picard et al. (2012). A biomassa verde de cada componente foi pesada em campo imediatamente após o corte da árvore com o auxílio de uma balança digital (Portable Eletronic Scale) com precisão de 5 g.

Para cada árvore amostrada foram tomadas amostras da copa e do fuste com finalidade de determinar o teor de umidade. Para a copa a amostra tomada foi composta por aproximadamente 1.500 g e retirada ao longo do comprimento total da copa nas posições de 0% (base da copa), 25%, 50%, 75% e 95%. Para o fuste foram retirados cinco discos, de aproximadamente 2 cm de espessura, nas posições 0% (nível do solo), 25%, 50%, 75% e 95% em relação à altura total. Ao todo, 1340 amostras foram coletadas.

A massa das amostras foi determinada utilizando uma balança digital (Hoyle) com precisão de 1 g. As amostras foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 100°C e após a verificação de massa constante, por meio de sucessivas tomadas de massas, o material foi pesado com uma balança digital de precisão de 1 g. O estoque de biomassa seca dos componentes de cada indivíduo foi obtido conforme [1].

$$EB_{ij} = \frac{MFT_{ij} \cdot MS_{ij}}{MF_{ij}} \quad (1)$$

Em que:

$EB_{ij}$  é o estoque de biomassa seca do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (kg).

$MFT_{ij}$  é a massa fresca total do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (kg).

$MS_{ij}$  é a massa seca da amostra do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (kg).

$MF_{ij}$  é a massa fresca da amostra do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (kg).

Para a determinação da densidade básica procedeu-se de acordo com a norma técnica D2395 (ASTM, 2014). Os corpos de prova, utilizados para a

determinação dessa variável, foram oriundos de uma amostragem adicional, realizada nas mesmas posições descritas anteriormente.

Os corpos de prova foram submersos em água, onde permaneceram até atingirem massa constante, para então proceder a mensuração do volume saturado, por meio do método da balança hidrostática. Em seguida, os corpos de prova foram secos em estufa de circulação e renovação de ar a 103°C +/- 2°C até atingirem massa constante e, em seguida, pesados para a determinação da massa seca. A densidade básica foi calculada conforme [2].

$$\rho b_{ij} = \frac{m_{0ij}}{V_{maxij}} \quad (2)$$

Em que:

$\rho b_{ij}$  é a densidade básica do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g cm<sup>-3</sup>).

$m_{0ij}$  é a massa da amostra do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$V_{maxij}$  é o volume da amostra saturada em água, do  $i$ -ésimo componente para a  $j$ -ésima árvore (cm<sup>3</sup>).

Para as demais análises as amostras foram processadas em moinho de facas Willey, e em seguida foram secas em estufa de circulação e renovação do ar a 103°C +/- 2°C até atingirem massa constante, avaliadas por meio de sucessivas pesagens.

A determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foi realizada por meio de análises químicas de acordo com a norma técnica D1762-84 (ASTM, 2013) adaptada.

Amostras de aproximadamente três gramas foram acondicionadas em cadinhos de porcelana, com tara conhecida. Cada cadinho com a amostra, após tampado, foi colocado em um forno mufla com temperatura de 900 °C durante dez minutos. Em seguida, o cadinho foi colocado em um dessecador até atingir temperatura ambiente. Após ser pesado, esse foi colocado novamente no forno mufla, sem tampa, para a combustão completa em temperatura de 700 °C durante seis horas. Ao final do processo, o cadinho foi novamente colocado em dessecador até atingir temperatura ambiente e, então, pesado. Esse procedimento foi realizado para todas as amostras coletadas. O teor de materiais voláteis, em percentual, foi calculado conforme [3].

$$MV_{ij} = \frac{m_{1ij} - m_{2ij}}{m_{1ij} - m_{0ij}} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que:

$MV_{ij}$  é o teor de materiais voláteis do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (%).

$m_{0ij}$  é a massa do cadinho do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{1ij}$  é a massa do cadinho e da amostra do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{2ij}$  é a massa do cadinho e do carbono fixo e cinza do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

O teor de carbono fixo, em percentual, foi calculado de acordo com a equação [4].

$$CF_{ij} = \frac{m_{2ij} - m_{3ij}}{m_{1ij} - m_{0ij}} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que:

$CF_{ij}$  é o teor de carbono fixo do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (%).

$m_{0ij}$  é a massa do cadinho do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{1ij}$  é a massa do cadinho e da amostra do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{2ij}$  é a massa do cadinho e do carbono fixo e cinza do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{3ij}$  é a massa do cadinho e da cinza do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

O teor de cinzas, em percentual, foi calculado de acordo com a equação [5].

$$CZ_{ij} = \frac{m_{3ij} - m_{0ij}}{m_{1ij} - m_{0ij}} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:

$CZ_{ij}$  é o teor de cinzas do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (%).

$m_{0ij}$  é a massa do cadinho, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{1ij}$  é a massa do cadinho e da amostra, do  $i$ -ésimo componente para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{3ij}$  é a massa do cadinho e da cinza, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

Para a determinação do poder calorífico superior utilizou-se uma bomba calorimétrica digital modelo C5000 *Cooling System* IKA WORKS com o princípio de

funcionamento adiabático, seguindo os procedimentos estabelecidos na norma técnica ASTM D5865 (2013) adaptada.

Os valores de poder calorífico superior foram obtidos em amostras de aproximadamente 0,5 grama cada, colocadas em um cadinho de metal. Esse foi então colocado em uma cápsula preenchida com oxigênio e inserido dentro da bomba calorimétrica, que deu ignição e gerando a combustão da amostra. O calor liberado pela combustão desta amostra foi mensurado pelo equipamento. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Energia de Biomassa Florestal da Universidade Federal do Paraná.

A densidade energética foi calculada como o produto entre a densidade energética e o poder calorífico superior conforme [6].

$$DE_{ij} = \frac{\rho b_{ij} \cdot PCS_{ij}}{1.000} \quad (6)$$

Em que:

$DE_{ij}$  é a densidade energética do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore ( $\text{Gcal m}^{-3}$ ).

$\rho b_{ij}$  é a densidade básica do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

$PCS_{ij}$  é o poder calorífico do  $i$ -ésimo componente para a  $j$ -ésima árvore ( $\text{kcal kg}^{-1}$ ).

### 3.2.3 Variáveis edáficas

Em cada parcela foram coletadas amostras de solo em três profundidades: 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Nas parcelas, amostras foram coletadas em três locais, com o auxílio de um trado, sendo, posteriormente, misturadas para obtenção de uma amostra composta para cada profundidade e para cada parcela. Ao todo foram coletadas 144 amostras, sendo 48 para cada profundidade. Essas amostras compostas foram encaminhadas para análises no laboratório de solos da Universidade Federal de Santa Maria, para a determinação das propriedades químicas (resultados não apresentados neste trabalho).

### 3.2.4 Variáveis Meteorológicas

Os valores referentes às variáveis meteorológicas: precipitação (PP), temperatura máxima (T<sub>máx</sub>), temperatura média (T<sub>méd</sub>), temperatura mínima (T<sub>mín</sub>) e umidade relativa do ar (UR), para o período de crescimento de cada povoamento foram obtidos das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Pelotas e Encruzilhada do Sul. Os dados meteorológicos contemplam os anos de 2003 a 2014 e estão apresentados na tabela 2.

TABELA 2 - DADOS METEOROLÓGICOS REFERENTE AS REGIÕES EM QUE SE ENCONTRAM OS POVOAMENTOS DE ACACIA NEGRA E AO PERÍODO AVALIADO.

Local	Grupos	PPac. (mm)	PPméd. (mm)	T <sub>máx</sub> . (°C)	T <sub>méd</sub> . (°C)	T <sub>mín</sub> . (°C)	UR (%)	IS (h)
Cristal	I	2683	1448	23,80	18,37	14,28	82,11	6,88
	II	3648	1271	23,87	18,23	14,00	81,69	7,01
	III	6834	1326	23,32	17,88	13,76	82,10	6,72
	IV	12891	1251	23,39	17,93	13,82	81,80	6,72
Encruzilhada do Sul	I	1991	1028	23,00	17,17	13,08	75,60	6,06
	II	3572	1113	22,78	16,84	12,73	74,81	6,30
	III	8001	1354	23,41	17,45	13,41	75,66	5,72
	IV	15427	1415	23,38	17,48	13,45	75,44	5,78
Piratini	I	1712	1697	23,43	18,19	14,33	83,37	6,59
	II	5119	1237	23,33	17,77	13,59	81,79	6,87
	III	7005	1316	23,21	17,74	13,62	82,18	6,70
	IV	12616	1266	23,49	18,03	13,91	81,76	6,74

FONTE: Adaptado do INMET.

EM QUE: PPac é a precipitação acumulada, PPméd. é a precipitação média anual, T<sub>máx</sub>. é a temperatura máxima, T<sub>méd</sub>. é a temperatura média, T<sub>mín</sub>. é a temperatura mínima, UR é a umidade relativa, IS é a insolação.

### 3.2.5 Análises estatísticas

#### 3.2.5.1 Estatísticas descritivas

Para o conjunto geral dos dados foram calculadas as estatísticas descritivas e os valores foram plotados em gráficos do tipo *violin plot*. Sabendo que a idade influencia significativamente as propriedades energéticas, como já constatado nos

trabalhos de Costa Junior et al. (2021) e Eloy (2015), os dados agrupados em classes de idade também foram plotados em gráficos do tipo *violin plot*.

### 3.2.5.2 Distribuições das variáveis

Distribuições probabilísticas foram ajustadas considerando todo o conjunto de dados e, também, por grupo de idade. Para o ajuste das funções de densidade de probabilidade foi utilizado o software *EasyFit 5.3*, que permitiu ajustar cerca de 65 distribuições. A distribuição que apresentou aderência aos dados de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 95% de probabilidade foi selecionada, para o geral e para os grupos de idade.

Todas as variáveis avaliadas contribuem com informações importantes acerca da quantidade e qualidade da biomassa para fins energéticos. Entretanto, os estoques de biomassa possuem maior peso em decisões sobre a utilização da biomassa para fins energéticos. Dessa forma, optou-se em ajustar as distribuições probabilísticas somente para essas variáveis, separando-as por classe de idade e local de cultivo. As funções de densidade de probabilidade foram avaliadas de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 95% de probabilidade. As funções selecionadas estão descritas nos trabalhos de Téo et al. (2011) e Minatti et al. (2019).

### 3.2.5.3 Classes de qualidade da biomassa para produção de energia

Ao escolher uma biomassa para ser utilizada como combustível, diferentes características devem ser avaliadas a fim de garantir o seu melhor aproveitamento e a eficiência do processo de conversão. Dessa maneira, é importante conhecer as principais características da biomassa a ser utilizada. As variáveis energéticas mencionadas são apropriadas para fornecer tais informações.

No entanto, ainda existe dificuldade em classificar a biomassa quanto a sua qualidade. Nesse contexto foi proposto realizar uma classificação da biomassa dos povoamentos de acácia negra e, para tanto, as propriedades energéticas selecionadas foram: poder calorífico superior, teor de cinzas, densidade energética e estoque de biomassa. As demais variáveis foram divididas em categorias: variáveis

biométricas, energéticas, meteorológicas e edáficas, que foram utilizadas como preditoras de uma árvore nos grupos de qualidade sugeridos.

Para tanto, as variáveis poder calorífico superior, teor de cinzas, densidade energética, estoque de biomassa, estoque energético e estoque de cinzas foram submetidas à análise de agrupamento (cluster). Antes da definição dos grupos, foram testadas diferentes distâncias e funções de ligação para a separação do conjunto de dados com expectativa de três grupos. A correlação cofenética entre as respostas geradas pela função de ligação e os dados originais de distância foi calculada, sendo que a maior correlação indicou a distância e a ligação a ser utilizada. As distâncias: euclidianas, quadrado da distância euclidiana, City-Block (Manhattan), Mahalanobis e métrica de Minkowski, foram testadas. Quanto aos algoritmos de agrupamento, foram testados métodos hierárquicos, como: vizinho mais próximo, vizinho mais distante, valor médio, centroide e Ward.

Em seguida procedeu-se uma análise discriminante com o objetivo de gerar funções capazes de discriminar novas árvores em classes de qualidade. Quatro grupos de variáveis foram testados a fim de melhorar os resultados das classificações. No primeiro grupo foram incluídas somente as variáveis biométricas, no segundo grupo além das variáveis biométricas foram incluídas as variáveis energéticas, no terceiro grupo acrescentou-se as variáveis meteorológicas e no quarto grupo as variáveis edáficas. A qualidade das funções discriminantes foi avaliada por meio das matrizes de confusão, e as funções que possibilitaram classificar corretamente um maior número de indivíduos foram selecionadas (QUADRO 1).

QUADRO 1 - VARIÁVEIS QUE FORMAM AS CLASSES DE QUALIDADE E VARIÁVEIS DISCRIMINANTES OU PREDITORAS.

Classes de qualidade	
poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas, estoque de biomassa, estoque energético, estoque de cinzas.	
Preditoras	
Biométricas	idade, diâmetro à altura do peito, altura total e comprimento de copa
Energéticas	densidade básica, poder calorífico superior, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo, teor de cinzas
Meteorológicas	Precipitação acumulada, precipitação média anual, temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima, umidade relativa e insolação.
Edáficas	ph (água), Calcio, Magnésio, Alumínio, Hidróxido de Alumínio, Capacidade de troca catiônica efetiva, Saturação de Alumínio, Saturação por bases, Índice SMP, % Matéria orgânica, % Argila, Textura, Fosforo (Mehlich), Potássio, Capacidade de troca catiônica em pH7, Ca/Mg, (Ca+Mg)/K, K/(Ca+Mg) <sup>1/2</sup>

FONTE: O autor (2022).

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.3.1 Análise exploratória dos dados

A fim de facilitar a discussão, os resultados das estatísticas descritivas e das distribuições estão organizados de acordo com cada variável.

##### 3.3.1.1 Densidade básica

As estatísticas descritivas para densidade básica dos galhos e fuste estão apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A DENSIDADE BÁSICA ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) DOS GALHOS E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

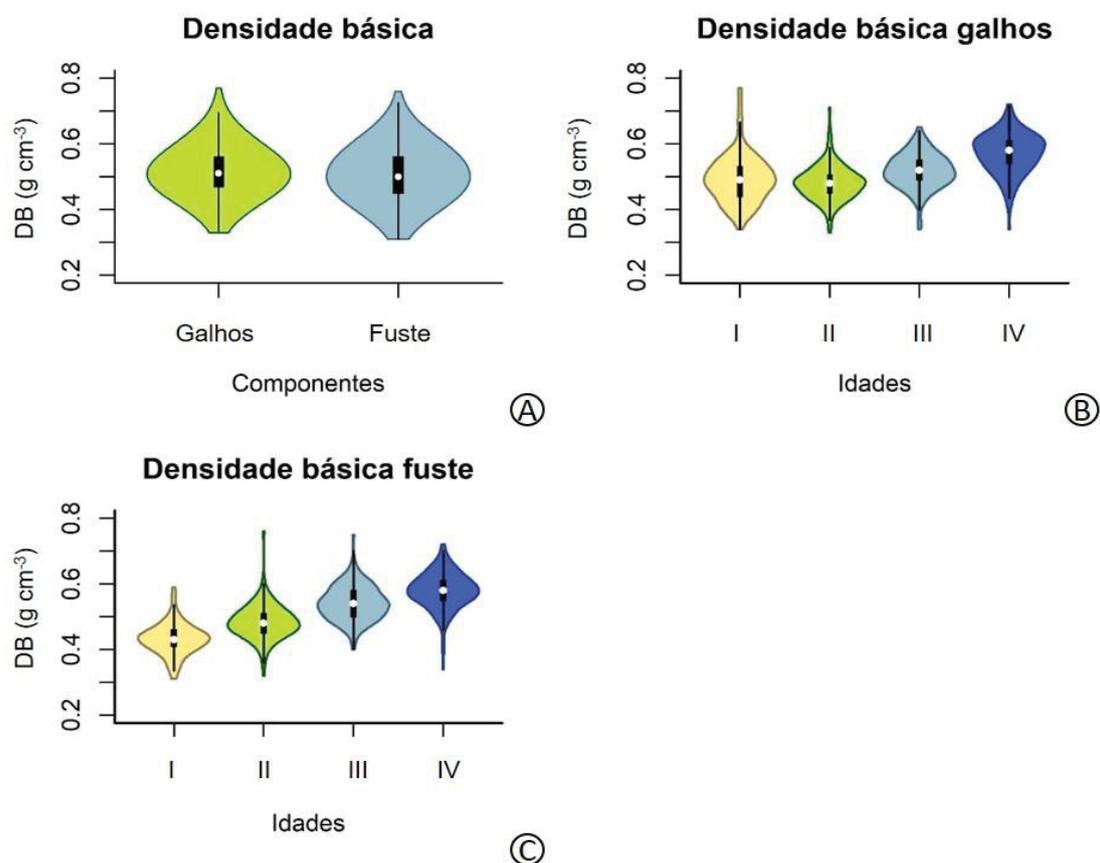
Componente	Galhos					Fuste				
	Total	I	II	III	IV	Total	I	II	III	IV
Média	0,516	0,494	0,481	0,517	0,571	0,507	0,432	0,483	0,542	0,580
Desvio padrão	0,07	0,073	0,052	0,052	0,061	0,077	0,048	0,051	0,052	0,055
Coef. de Variação	13,573	14,833	10,721	10,138	10,695	15,267	11,050	10,589	9,674	9,494
Erro padrão	0,003	0,005	0,004	0,004	0,005	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
Mínimo	0,333	0,340	0,330	0,340	0,340	0,305	0,310	0,320	0,400	0,340
Máximo	0,771	0,770	0,710	0,650	0,720	0,763	0,590	0,760	0,750	0,720
Intervalo de	0,51	0,483	0,473	0,509	0,562	0,501	0,425	0,475	0,533	0,571
Confiança ( $\alpha=5\%$ )	$\leq \mu \leq$									
	0,521	0,504	0,489	0,526	0,581	0,513	0,438	0,491	0,550	0,588
N. amostras	670	185	163	153	169	670	185	163	153	169

FONTE: O autor (2022).

EM QUE: Total é o conjunto de todas as idades, I, II, III e IV são os grupos de idade.

O valor médio da densidade básica dos galhos foi de  $0,520 \text{ g.cm}^{-3}$  e do fuste  $0,510 \text{ g.cm}^{-3}$  (TABELA 2). Os valores estão próximos dos obtidos por Eloy et al. (2015), Sanquetta et al. (2013) e Schneider et al. (2005). Os valores de densidade básica dos galhos e fuste foram similares (FIGURA 2A). Para os galhos há uma variação entre  $0,333$  e  $0,770 \text{ g.cm}^{-3}$ , enquanto para o fuste a variação está entre  $0,305$  e  $0,763 \text{ g.cm}^{-3}$  (TABELA 2). De acordo com Trevisan et al. (2007), Alzate et al. (2005) e Silva (2002) variações na densidade básica são resultado de diferentes fatores como idade, variações ambientais, edáficas, tratos silviculturais e variabilidade genética.

FIGURA 2 - GRÁFICOS *VIOLIN PLOT* PARA A DENSIDADE BÁSICA DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: DB é a densidade básica, I, II, III e IV são os grupos de idade.

Como esperado, a densidade básica dos galhos tende a aumentar com a idade da árvore e o mesmo ocorre para o fuste (FIGURA 2B E 2C). Sanquetta et al. (2013) concluíram, para a espécie acácia negra, que os maiores valores de densidade básica são encontrados em povoamentos com as maiores idades.

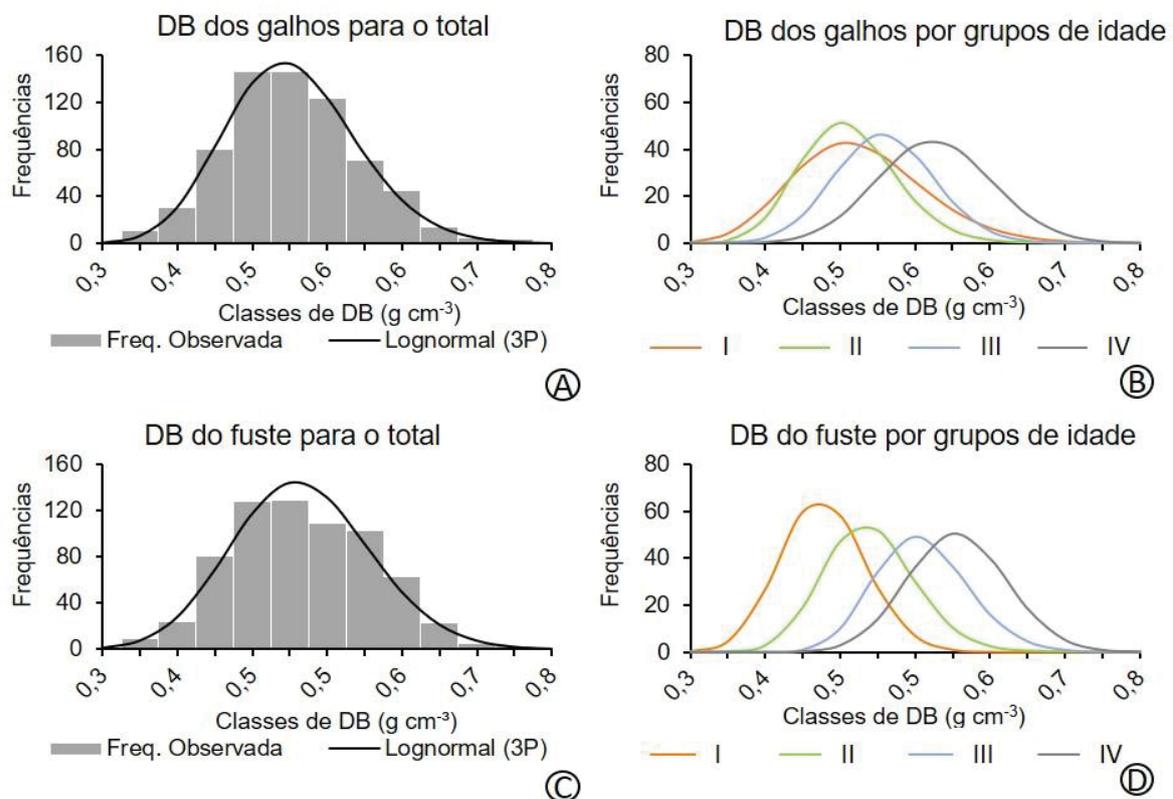
Considerando o grupo I, os galhos possuem densidade básica média maior que o fuste. Isso evidencia que o aumento da densidade básica ao longo da idade ocorre de forma diferente nos galhos e no fuste (FIGURA 2B E 2C). Os galhos demandam células mais longas com paredes mais espessas capazes de sustentar o peso das folhas. Lima (1994), trabalhando com *Eucalyptus*, evidenciou que a densidade básica aumenta devido à presença de células relativamente mais longas com paredes mais espessas. Segundo Sette Junior et al. (2012), alterações do meristema cambial e exigências mecânico-fisiológicas, resultantes do processo de desenvolvimento das árvores, representadas pelo aumento da espessura da parede

das fibras e pela redução da frequência e do número de vasos são os responsáveis pelo aumento da densidade.

A partir do grupo II, galhos e fuste possuem valores médios de densidade mais próximos. Sanquetta et al. (2013) observaram para árvores de acácia negra, que a densidade básica varia também ao longo do fuste, com os maiores valores na base da árvore e decresce com o aumento da altura. Assim, as variações da densidade básica se devem, principalmente, às necessidades mecânico-fisiológicas das árvores que, por sua vez, mudam com a idade, local de cultivo, condições ambientais, tratos silviculturais e material genético.

Ao avaliar a distribuição dos dados de densidade básica de galhos e fuste, para o conjunto total de dados e agrupados por idade, a função de densidade de probabilidade Lognormal ajustou-se aos dados, de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov, para um nível de 95% de probabilidade (FIGURA 3).

FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA A DENSIDADE BÁSICA DOS COMPONENTES GALHOS E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA-NEGRA CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: DB é a densidade básica, I, II, III e IV são os grupos de idade.

A densidade básica de galhos e fuste seguem uma distribuição probabilística Lognormal, seja considerando o conjunto total ou separado em grupos de idade. Para os grupos de idade as curvas apresentam um deslocamento à direita. Para os galhos o deslocamento fica mais evidente a partir do grupo II, enquanto para o fuste o deslocamento das curvas é evidente a partir da do grupo I (FIGURA 3B E 3D).

As árvores presentes no grupo I e II possuem uma grande quantidade de folhas, logo demandam por galhos que suportem o seu peso e, dessa forma, os galhos possuem células com características diferenciadas da madeira do fuste, visto sua função de sustentação da copa. Logo, a curva de densidade dos galhos em árvores do grupo I é mais deslocada à direita quando comparada com a do fuste. Isso evidencia que os componentes galhos e fuste possuem desenvolvimento diferenciado na árvore ao longo das idades, corroborando com os resultados apresentados na Figura 2.

Com a idade há a formação de lenho adulto conseqüentemente a elevação de valores de densidade básica e o deslocamento das curvas para a direita, tanto para os galhos como para o fuste. Para as árvores do grupo IV os valores de densidade básica dos galhos e fuste são similares. Os coeficientes das funções de densidade de probabilidade para densidade básica dos galhos e fuste estão apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 - COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA A DENSIDADE BÁSICA DE GALHOS E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA-NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Grupo	FDP	Coeficientes ajustados			KS calc	KS tab.
			$\sigma$	$\mu$	$\gamma$		
Galhos	Todos	Lognormal(3P)	0,100128	-0,36674	-0,18095	0,046 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Lognormal	0,142566	-0,71657		0,069 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Lognormal	0,105968	-0,73806		0,084 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Lognormal (3P)	0,031607	0,50981	-1,14696	0,060 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Lognormal (3P)	0,027049	0,823416	-1,70654	0,080 <sup>ns</sup>	0,105
Fuste	Todos	Lognormal(3P)	0,058783	0,272807	-0,80932	0,052 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Lognormal (3P)	0,051599	-0,0847	-0,48845	0,091 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Lognormal (3P)	0,089866	-0,58325	-0,0771	0,079 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Lognormal (3P)	0,09662	-0,62428	0,003479	0,712 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Lognormal (3P)	0,026577	0,73414	-1,503560	0,091 <sup>ns</sup>	0,105

FONTE: O autor (2021).

EM QUE: KS é o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, <sup>ns</sup> não significativo a 5% de significância.

### 3.3.1.2 Poder calorífico superior

As estatísticas descritivas para o poder calorífico superior da copa e fuste estão apresentadas na Tabela 5.

TABELA 5 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O PODER CALORÍFICO ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente Estatísticas	Copa					Fuste				
	Total	I	II	III	IV	Total	I	II	III	IV
Média	4884	5045	4854	4800	4815	4548	4565	4539	4559	4529
Desvio padrão	186	136	185	121	175	68	66	60	45	86
Coef. de Variação	3,80	2,69	3,80	2,53	3,63	1,50	1,46	1,32	0,99	1,90
Erro padrão	7,00	9,99	14,46	9,80	13,43	3,00	4,88	4,71	3,64	6,63
Mínimo	4364	4544	4364	4541	4442	4270	4270	4382	4429	4315
Máximo	5433	5433	5329	5179	5412	4949	4926	4691	4689	4949
Intervalo de Confiança ( $\alpha=5\%$ )	4870 $\leq \mu \leq$ 4899	5025 $\leq \mu \leq$ 5065	4825 $\leq \mu \leq$ 4882	4781 $\leq \mu \leq$ 4820	4788 $\leq \mu \leq$ 4841	4543 $\leq \mu \leq$ 4553	4555 $\leq \mu \leq$ 4574	4530 $\leq \mu \leq$ 4548	4552 $\leq \mu \leq$ 4566	4515 $\leq \mu \leq$ 4542
N. amostras	670	185	163	153	169	670	185	163	153	169

FONTE: O autor (2022).

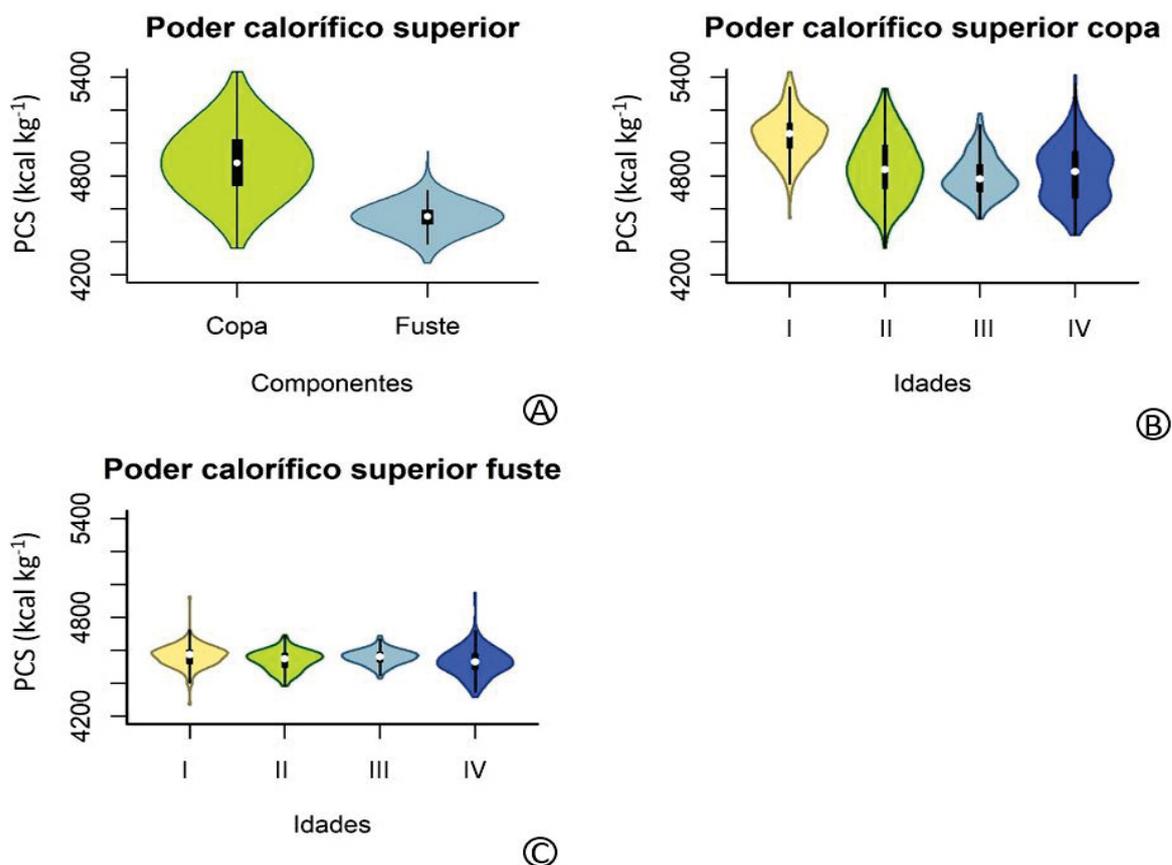
EM QUE: Total é o conjunto de todas as idades, I, II, III e IV são os grupos de idade.

A média do poder calorífico superior da copa foi de  $4884 \text{ kcal.kg}^{-1}$  e para o fuste foi de  $4548 \text{ kcal.kg}^{-1}$  (TABELA 5). Os maiores valores de poder calorífico constatados na copa se devem, principalmente, às folhas. Silva et al. (2017) observaram que as folhas de árvores de acácia negra possuem valores mais elevados de poder calorífico superior quando comparado aos demais componentes da biomassa.

O poder calorífico da copa variou de  $4364$  a  $5433 \text{ kcal.kg}^{-1}$ , enquanto o fuste variou de  $4270$  a  $4949 \text{ kcal.kg}^{-1}$  (TABELA 4). A copa possui os maiores valores de poder calorífico superior, assim como uma maior dispersão dos dados em torno da média, quando comparada aos resultados obtidos para o fuste (FIGURA 4A). Isso se deve às variações nas proporções de folhas e galhos que compõem a copa de cada árvore, proporção que pode ser alterada por inúmeros fatores, como: maior ou menor exposição a luz, disponibilidade de água, nutrientes, pragas, idade, entre outras. Reis et al. (1985) observaram que a dinâmica da biomassa foliar tem relação com a disponibilidade de nutrientes e Behling (2014) também evidenciou que os atributos

químicos do solo e as condições meteorológicas influenciam a dinâmica da biomassa foliar.

FIGURA 4 - GRÁFICOS VIOLIN PLOTS PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



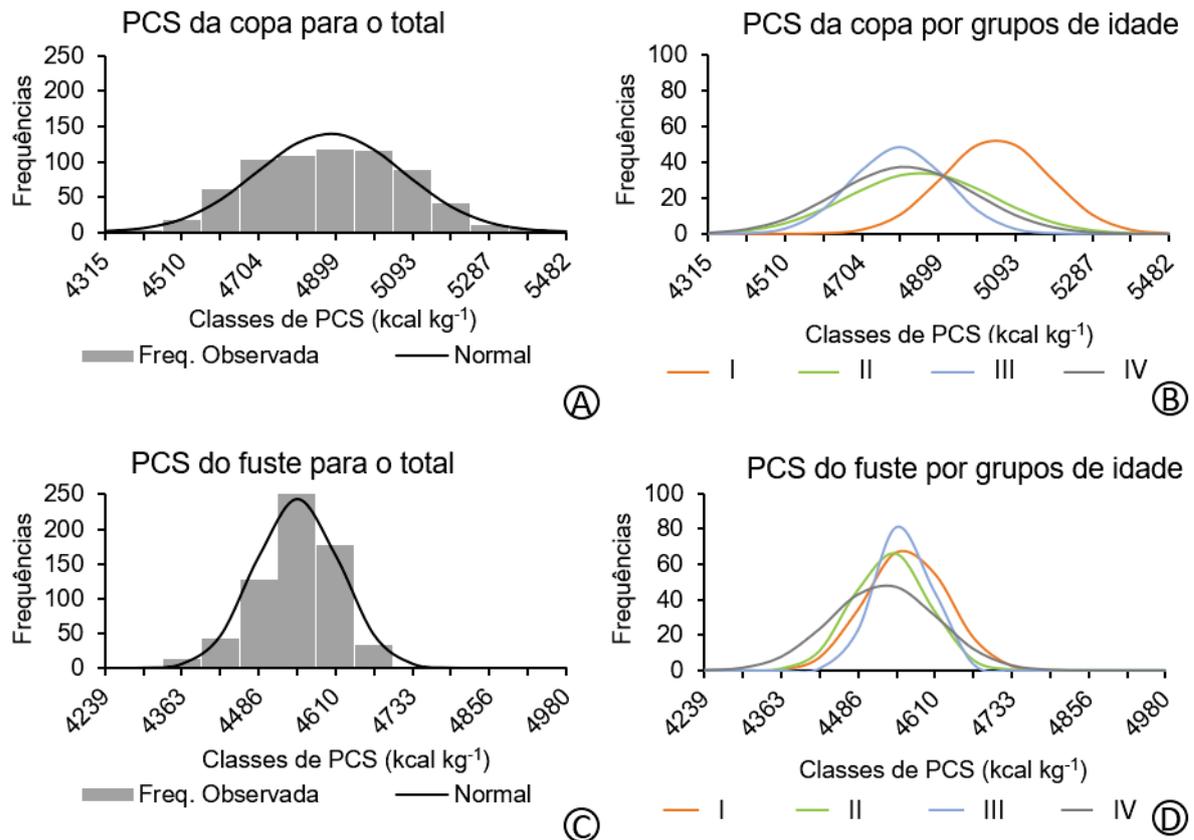
FONTE: O autor (2022).

EM QUE: PCS é o poder calorífico superior, I, II, III e IV são os grupos de idade.

O poder calorífico superior da copa apresenta tendência de redução com a idade (FIGURA 4B). A proporção de folhas na biomassa de copa diminui com a idade e a de galhos aumenta, uma vez que as folhas possuem um maior poder calorífico superior, o que refletirá no aumento dos valores dessa variável para copa das árvores presentes no grupo I. Já o poder calorífico superior do fuste não apresenta tendência de aumento ou redução com a idade (FIGURA 4C). Santana (2009), estudando espécies do gênero *Eucalyptus*, também relatou que o PCS foi pouco influenciado pela idade, não sendo possível constatar uma tendência definida.

O poder calorífico superior de copa e fuste se aproxima de uma distribuição Normal (FIGURA 5), tanto para o conjunto de dados total, como separados por grupos de idade.

FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE E PROBABILIDADE PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA-NEGRA CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: PCS é o poder calorífico superior, I, II, III e IV são os grupos de idade.

As árvores no grupo I apresentam os maiores valores médios de poder calorífico superior para a copa (FIGURA 5B), que pode ser confirmado pelo maior coeficiente de ajuste  $\mu$  da distribuição normal (TABELA 6). Nos primeiros anos de vida, as árvores investem sua energia para a produção de copa, que por sua vez é composta principalmente por folhas, a fim de maximizar o uso da luz e proporcionar o crescimento da planta. As folhas apresentam valores de poder calorífico superior mais elevadas que os dos galhos. Logo, com a idade as árvores começam a competir por espaço, luz, nutrientes e água, e a biomassa de galhos passa a ser maior que a de folhas, e, conseqüentemente, os valores de poder calorífico superior reduzem. Assim, a partir do grupo II os valores médios diminuem e pouco mudam nos demais grupos.

O poder calorífico superior do fuste também se aproxima de uma distribuição normal (FIGURA 5C E 5D). As curvas da distribuição são muito semelhantes entre si, com exceção do grupo de idade IV, no qual a distribuição apresenta maior amplitude. Isso pode ser atribuído à maior variabilidade entre as árvores nas florestas maduras.

Os coeficientes das funções de densidade de probabilidade para o poder calorífico superior estão apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 - COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADES I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Grupo	FDP	Coeficientes ajustados		KS cal.	KS tab.
			$\sigma$	$\mu$		
Copa	Todos	Normal	185,784	4884,47	0,04484 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Normal	135,943	5044,8	0,05451 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Normal	184,615	4853,83	0,05133 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Normal	121,273	4800,24	0,10553 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Normal	174,551	4814,78	0,08099 <sup>ns</sup>	0,105
Fuste	Todos	Normal	68,079	4548,01	0,04867 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Normal	66,4307	4564,7	0,06574 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Normal	60,0993	4538,96	0,07647 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Normal	44,9999	4558,98	0,05062 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Normal	86,203	4528,55	0,06227 <sup>ns</sup>	0,105

FONTE: O autor (2021).

EM QUE: KS é o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, <sup>ns</sup> não significativo a 5% de significância.

### 3.3.1.3 Densidade energética

As estatísticas descritivas para densidade energética da copa e fuste estão apresentadas na Tabela 7.

A densidade energética possui tendência de distribuição dos valores semelhante à da densidade básica, para a copa e para o fuste (FIGURA 6A). A copa apresenta os maiores valores e, conseqüentemente, uma maior média, sendo 2,52 Gcal.m<sup>-3</sup>. A média para o fuste é de 2,30 Gcal.m<sup>-3</sup>. Eloy (2015) encontrou valores de densidade energética entre 2,22 a 2,49 Gcal.m<sup>-3</sup>, para árvores de acácia negra em povoamentos com 5 anos.

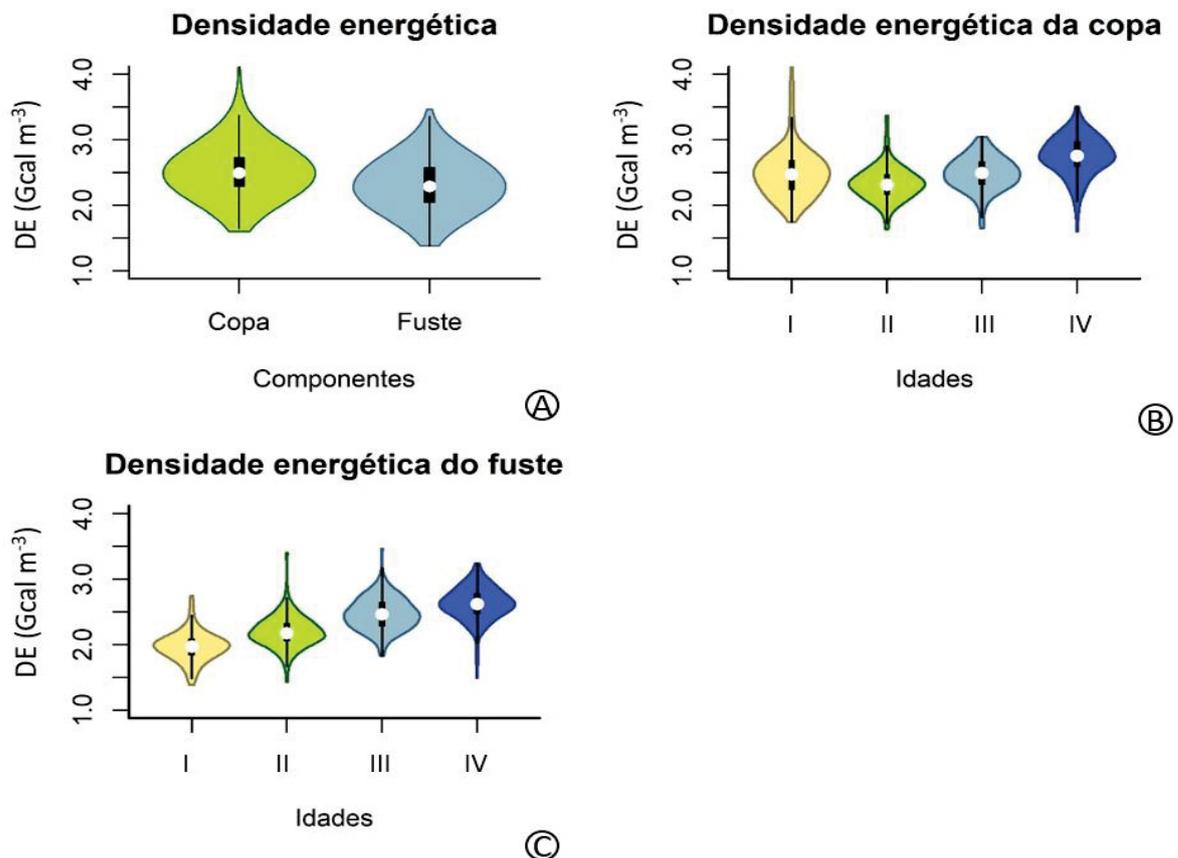
TABELA 7- ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA A DENSIDADE ENERGÉTICA ( $\text{Gcal.m}^{-3}$ ) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Copa					Fuste				
	Total	I	II	III	IV	Total	I	II	III	IV
Média	2,52	2,49	2,33	2,48	2,75	2,30	1,97	2,19	2,47	2,63
Desvio padrão	0,34	0,38	0,26	0,26	0,31	0,35	0,23	0,24	0,25	0,26
Coef. de Variação	13,55	15,19	10,95	10,35	11,10	15,30	11,45	10,80	10,05	9,77
Erro padrão	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Mínimo	1,6	1,75	1,63	1,65	1,60	1,38	1,38	1,43	1,83	1,49
Máximo	4,11	4,11	3,37	3,04	3,51	3,46	2,75	3,40	3,46	3,24
Intervalo de Confiança ( $\alpha=5\%$ )	2,49	2,44	2,29	2,44	2,71	2,28	1,94	2,16	2,43	2,59
	$\leq \mu \leq$									
N. amostras	670	185	163	153	169	670	185	163	153	169

FONTE: O autor (2022).

EM QUE: Total é o conjunto de todas as idades, I, II, III e IV são os grupos de idade.

FIGURA 6 - GRÁFICOS VIOLIN PLOTS PARA A DENSIDADE ENERGÉTICA DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: DE é a densidade energética, I, II, III e IV são os grupos de idade.

A dispersão dos valores em torno da média também foi maior na copa, variando de 1,60 a 4,11 Gcal.m<sup>-3</sup>, quando comparado aos resultados observados para o fuste, que foi de 1,38 a 3,46 Gcal.m<sup>-3</sup> (TABELA 7). Os maiores valores de densidade energéticas na copa podem ser explicados, pois consiste em uma variável resultante do produto entre a densidade básica e o poder calorífico superior. Moreira et al. (2012) constataram que a densidade básica e o poder calorífico superior variam entre indivíduos da mesma espécie de acordo com a sua idade. Os maiores valores na copa podem ser explicados pelos maiores valores de poder calorífico superior nesse componente (FIGURA 4).

De modo geral, o efeito da densidade básica sobre a densidade energética é maior que o efeito do poder calorífico superior. Isso pode ser verificado pelo comportamento similar entre os gráficos de densidade básica e densidade energéticas (FIGURA 2 E 6). Eloy (2015) também constatou que a densidade energética foi mais influenciada pela densidade básica do que pelo poder calorífico superior, que variou menos.

Os menores valores de densidade energética da copa foram verificados no grupo II. Há uma tendência de aumento da densidade energética da copa a partir do grupo II até o IV. O valor mais elevado no grupo I quando comparado ao grupo II, pode ser explicado pela tendência decrescente do poder calorífico da copa. Nos grupos I e II há maior influência do poder calorífico, já nos grupos III e IV há maior efeito da densidade básica (FIGURA 6B). Eloy (2015) constatou a mesma situação em povoamentos de *Eucalyptus grandis*, avaliado com 1; 3 e 5 anos.

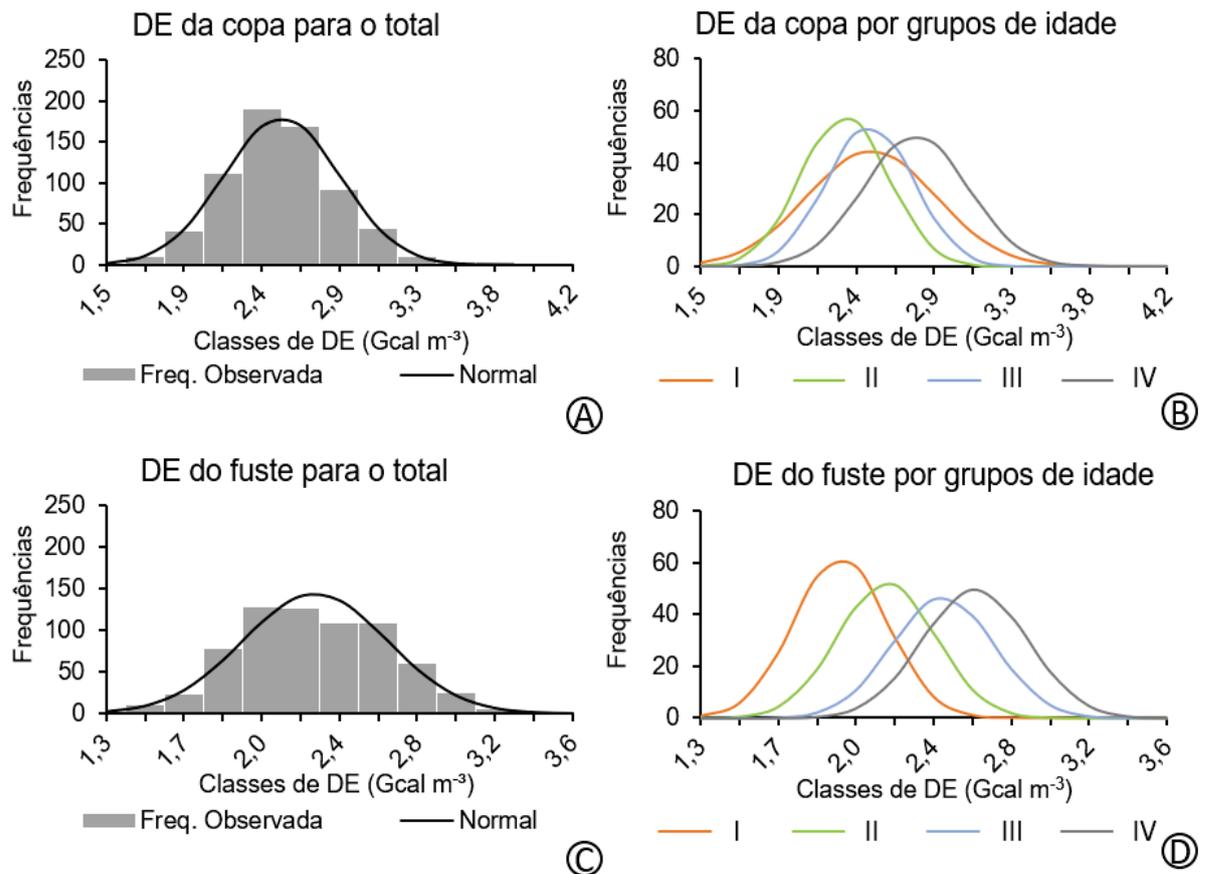
Para o fuste, a densidade energética tende a aumentar com a idade. Como o poder calorífico médio para o fuste varia pouco, a densidade energética segue a mesma tendência da densidade básica, ou seja, aumenta com a idade (FIGURA 6C).

A curva de distribuição normal aderiu aos dados de densidade energética de copa e fuste, para o conjunto total e para os dados agrupados em idades, de acordo com o teste de KS, ao nível de 95 % de probabilidade (FIGURA 7).

Para o total, a média dos valores de densidade energética da copa é maior que a média dos valores da distribuição do fuste (FIGURA 7A E 7B). A variância nas distribuições de copa e fuste são similares (TABELA 7).

As curvas de distribuições da densidade energética da copa tendem a se deslocar para a direita com o aumento da idade, e isso fica evidenciado a partir do grupo II (FIGURA 7B). Os maiores valores médios foram verificados no grupo IV, já a maior variância no grupo I.

FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA A DENSIDADE ENERGÉTICA DE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: DE é a densidade energética, I, II, III e IV são os grupos de idade.

Para o fuste houve um deslocamento para a direita das curvas, por grupos de idades, à medida que os grupos reúnem povoamentos mais velhos (FIGURA 7D). No grupo IV foram constatados os maiores valores médios de densidade energética e as maiores variâncias, o que é corroborado pelos coeficientes de ajuste  $\mu$  e  $\sigma$  da distribuição normal (TABELA 8).

TABELA 8 - COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA A DENSIDADE ENERGÉTICA DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Grupo	FDP	Coeficientes ajustados		KS cal.	KS tab.
			$\sigma$	$\mu$		
Copa	Todos	Normal	0,341066	2,51659	0,03557 <sup>ns</sup>	0,052
	I.	Normal	0,378483	2,4911	0,06891 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Normal	0,255397	2,33259	0,07113 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Normal	0,256908	2,48327	0,04499 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Normal	0,305512	2,75213	0,07398 <sup>ns</sup>	0,105
Fuste	Todos	Normal	0,352533	2,30402	0,04219 <sup>ns</sup>	0,052
	I.	Normal	0,22556	1,96979	0,0766 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Normal	0,236928	2,19467	0,06439 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Normal	0,248248	2,46956	0,04898 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Normal	0,25643	2,62550	0,07009 <sup>ns</sup>	0,105

FONTE: O autor (2021).

EM QUE: KS é o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, <sup>ns</sup> não significativo a 5% de significância.

### 3.3.1.4 Teores de materiais voláteis

As estatísticas descritivas para o teor de materiais voláteis da copa e fuste estão apresentadas na Tabela 9.

TABELA 9 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS (%) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Copa					Fuste				
	Total	I	II	III	IV	Total	I	II	III	IV
Média	71,54	69,91	72,03	72,95	71,59	76,82	75,66	76,78	78,17	76,93
Desvio padrão	2,19	1,48	2,32	1,57	2,06	1,66	1,31	1,43	1,12	1,68
Coef. de Variação	3,06	2,11	3,22	2,15	2,88	2,16	1,74	1,86	1,44	2,18
Erro padrão	0,08	0,11	0,18	0,13	0,16	0,06	0,10	0,11	0,09	0,13
Mínimo	66,44	66,44	68,14	68,27	67,42	69,22	69,22	72,62	74,81	72,11
Máximo	81,18	73,77	81,18	76,82	78,01	82,25	79,27	81,25	82,25	80,28
Intervalo de Confiança ( $\alpha=5\%$ )	71,37	69,69	71,67	72,70	71,27	76,70	75,47	76,56	77,99	76,67
	$\leq \mu \leq$									
N. amostras	670	185	163	153	169	670	185	163	153	169

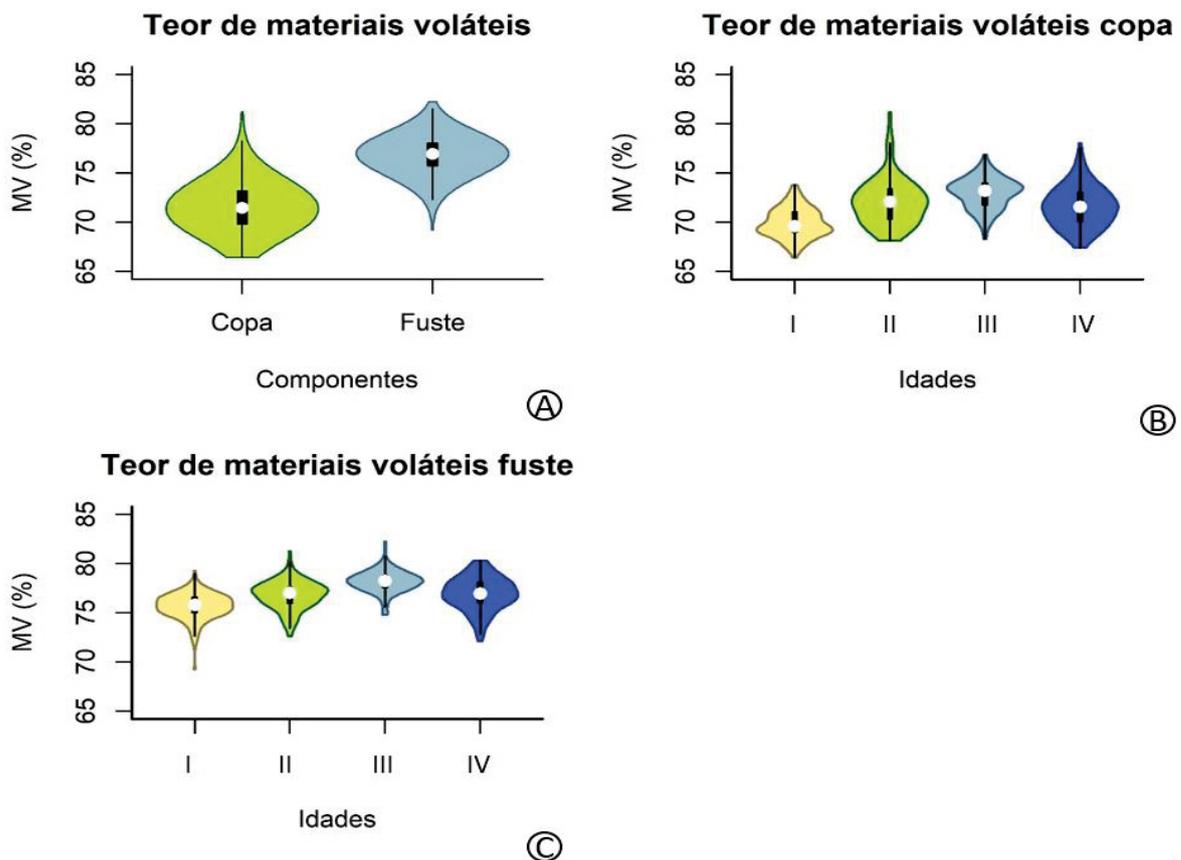
FONTE: O autor (2022).

EM QUE: Total é o conjunto de todas as idades, I, II, III e IV são os grupos de idade.

Os maiores valores do teor de materiais voláteis foram observados na biomassa de fuste (FIGURA 8A). A média do fuste foi de 76,82%, variando de 69,22 a 82,25%. Na copa foi constatada uma média de 71,54 %, variando entre 66,44 a

81,18% (TABELA 9). Os valores encontrados estão próximos dos apresentados por Brito e Barrichello (1982), que variam de 75% a 85%. Eloy (2015) observou teores de materiais voláteis entre 74,12% a 81,67% para os componentes da biomassa de árvores de acácia-negra de um a cinco anos.

FIGURA 8 - GRÁFICOS VIOLIN PLOTS PARA O TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: MV é o teor de materiais voláteis, I, II, III e IV são os grupos de idade.

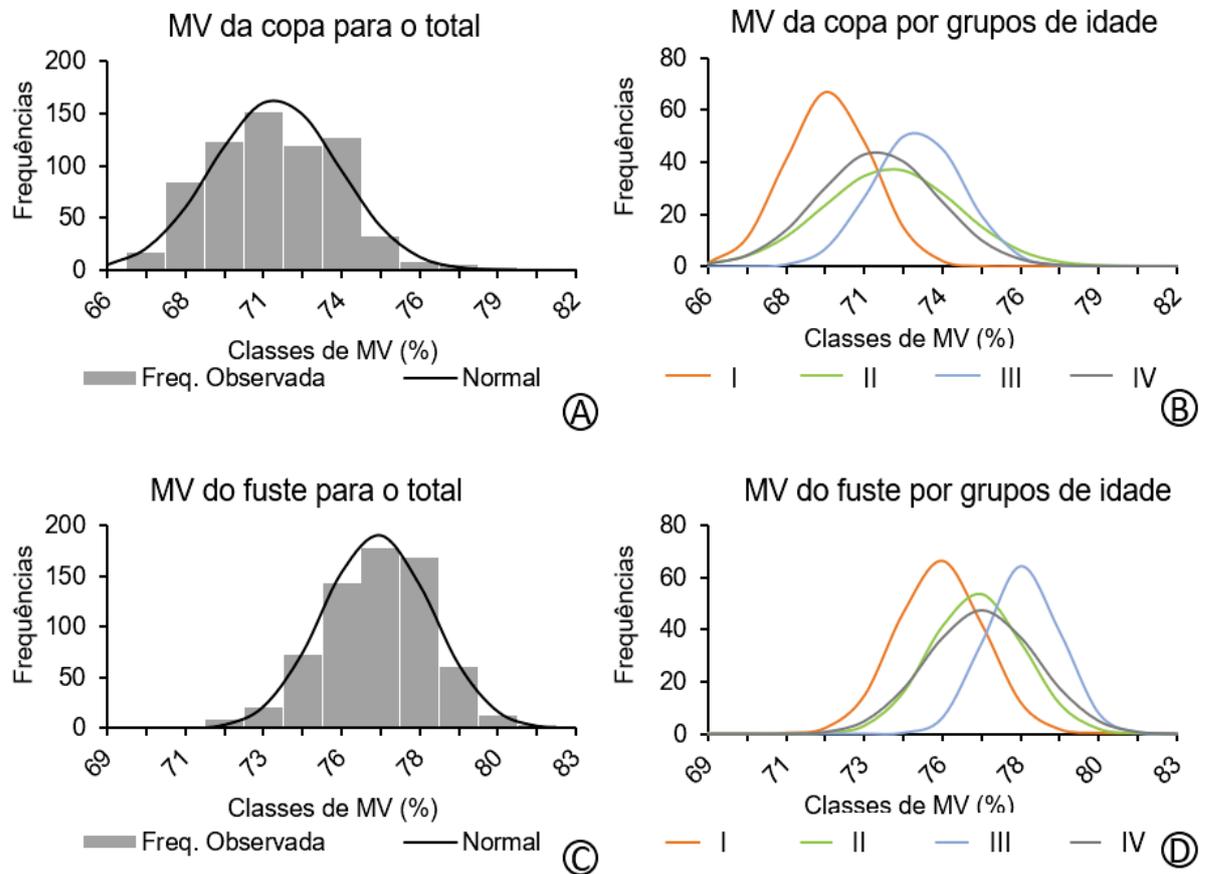
Os menores teores de materiais voláteis na copa foram constatados no grupo de idade I, enquanto os maiores valores no grupo III (FIGURA 8B). Possivelmente, isso está relacionado à maior proporção de folhas na copa quando comparados aos obtidos para os povoamentos com maior idade. Para a mesma espécie, Eloy (2015) constatou que as folhas possuem menores teores de materiais voláteis quando comparados aos obtidos para os galhos.

Para o fuste foi constatado tendência de aumento dos teores de materiais voláteis ao longo da idade (FIGURA 8C). De acordo com Castro (2011), os materiais

voláteis são liberados com a degradação térmica das hemiceluloses e para Soares et al. (2014), de componentes oriundos dos extrativos. Dessa forma, os maiores valores observados no grupo III podem ser explicados pela constatação de Neves et al. (2013), em que verificaram uma tendência de aumento dos extrativos com a idade.

As curvas dos teores de materiais voláteis da copa e fuste, ajustados para os dados totais e por grupos de idade (FIGURA 9), aderiram a curva da distribuição normal pelo critério de Komogorov-Smirnov ao nível de 95% de probabilidade.

FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA O TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS DE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: MV é o teor de materiais voláteis, I, II, III e IV são os grupos de idade.

No grupo de idade I os teores de materiais voláteis da copa e fuste apresentaram curvas deslocadas à esquerda, com os menores valores em relação aos demais grupos de idades. No grupo III a curva está deslocada à direita, compreendendo os maiores valores médios (FIGURA 9). Para os grupos II e IV as curvas são similares. Trugilho, Lima e Mendes (1996), estudando *Eucalyptus saligna*

concluíram que existe tendência de estabilização nos valores de extrativos totais, lignina e holocelulose com a idade. Silva et al. (2005) também observaram a estabilização para *Eucalyptus grandis*. Para Sevéro, Calonego e Sansígolo (2006), isso revela que as características químicas estão sujeitas a grandes variações iniciais na madeira juvenil, tendendo a valores estáveis na madeira adulta. De modo geral, a copa apresenta menores valores do teor de materiais voláteis, enquanto o fuste os maiores valores.

Coefficiente do ajuste das curvas de distribuição normal aos teores de materiais voláteis da copa e fuste, ajustados para os dados totais e por grupos de idade (TABELA 10).

TABELA 10 - COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA O TEOR DE MATERIAS VOLÁTEIS DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADES I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Grupo	FDP	Coeficientes ajustados		KS cal.	KS tab.
			$\sigma$	$\mu$		
Copa	Todos	Normal	2,18527	71,5414	0,04594 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Normal	1,47527	69,9083	0,09363 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Normal	2,31905	72,0298	0,08228 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Normal	1,56642	72,9476	0,09154 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Normal	2,06291	71,5852	0,04330 <sup>ns</sup>	0,105
Fuste	Todos	Normal	1,65926	76,8247	0,03069 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Normal	1,31476	75,6622	0,06740 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Normal	1,42941	76,7787	0,08084 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Normal	1,12308	78,1678	0,06409 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Normal	1,67798	76,9256	0,05781 <sup>ns</sup>	0,105

FONTE: O autor (2021).

EM QUE: KS é o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, <sup>ns</sup> não significativo a 5% de significância.

### 3.3.1.5 Teores de carbono fixo

A copa apresentou maiores teores de carbono fixo quando comparado aos obtidos para o fuste. A média para o teor de carbono fixo da copa foi de 25,59% e para o fuste de 22,17% (TABELA 11). A dispersão dos valores em torno da média foi similar para a copa e fuste. O teor de carbono fixo variou de 17,63% a 29,75% para a copa e de 17,22% a 29,19% para o fuste. Eloy et al. (2015) constataram médias para o teor

de carbono fixo em torno de 16,9% para madeira e médias entre 27,28% e 30,46% para casca de árvores de acácia negra com 3 anos.

As estatísticas descritivas para o teor de carbono fixo da copa e fuste estão apresentadas na Tabela 11.

TABELA 11 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O TEOR DE CARBONO FIXO (%) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente Estatísticas	Copa					Fuste				
	Total	I	II	III	IV	Total	I	II	III	IV
Média	25,59	26,84	25,02	24,39	25,86	22,17	23,02	22,18	21,03	22,25
Desvio Padrão	1,72	1,27	1,69	1,17	1,59	1,47	1,17	1,33	1,06	1,54
Coef. de Variação	6,71	4,74	6,76	4,81	6,16	6,62	5,07	5,98	5,04	6,91
Erro Padrão	0,07	0,09	0,13	0,09	0,12	0,06	0,09	0,10	0,09	0,12
Mínimo	17,63	23,52	17,63	21,43	21,28	17,22	20,00	17,85	17,22	19,24
Máximo	29,75	29,75	27,78	28,07	29,06	29,19	29,19	26,01	24,25	26,87
Intervalo de Confiança ( $\alpha=5\%$ )	25,46	26,66	24,76	24,20	25,62	22,06	22,86	21,98	20,86	22,01
	$\leq \mu \leq$									
	25,72	27,03	25,28	24,57	26,10	22,28	23,19	22,39	21,20	22,48
N. amostras	670	185	163	153	169	670	185	163	153	169

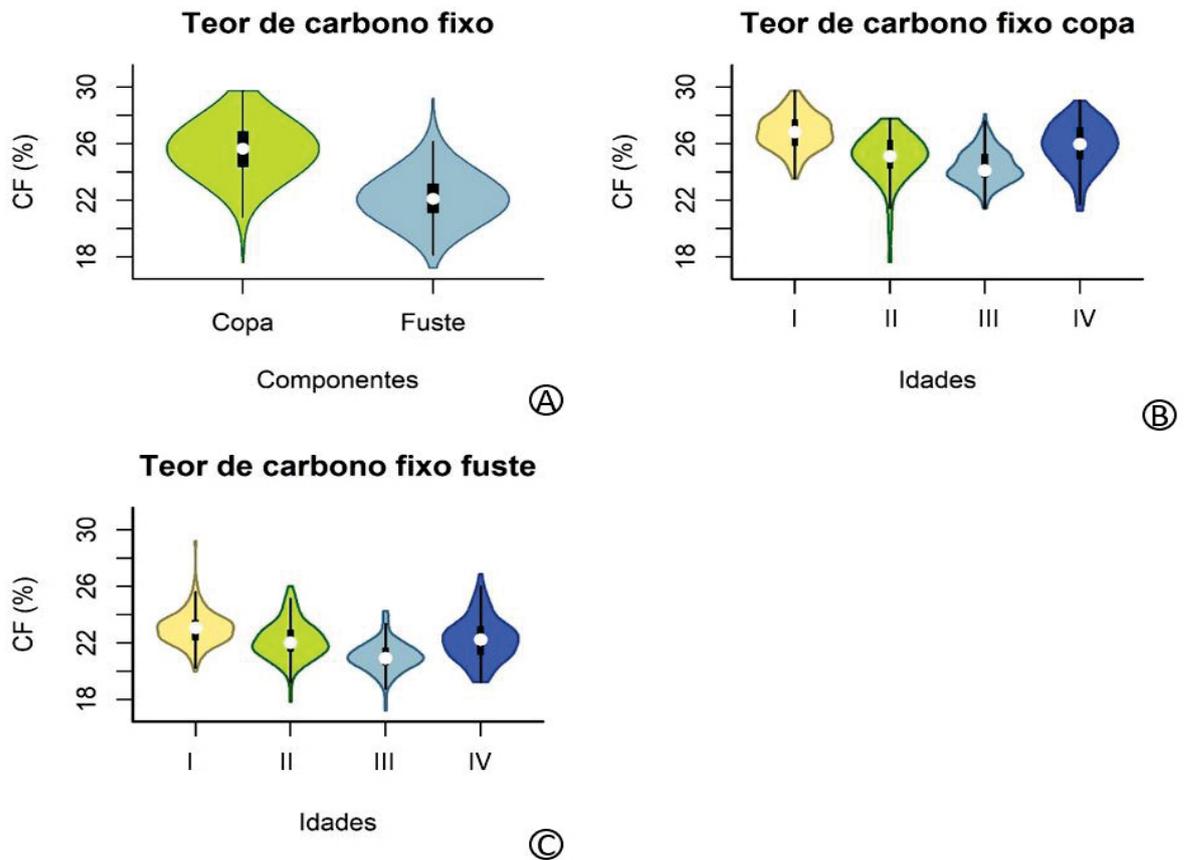
FONTE: O autor (2022).

EM QUE: Total é o conjunto de todas as idades, I, II, III e IV são os grupos de idade.

Há uma relação inversa entre copa e fuste para as variáveis teor de materiais voláteis e carbono fixo. A copa apresenta os maiores teores de carbono fixo e menores teores de materiais voláteis, enquanto para o fuste é o inverso. Para que cada componente desenvolva sua função na planta, diferentes estruturas celulares são necessárias, logo, cada estrutura possui diferentes quantidades de polissacarídeos, lignina, extrativos e constituintes inorgânicos. Na degradação térmica da biomassa cada um dos constituintes degrada de forma diferente, o que justifica a diferença nos teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas de copa e fuste.

Os maiores teores de carbono fixo de copa e fuste foram constatados no grupo I, diminuindo até o grupo III (FIGURA 10B E 10C). Quando comparado o comportamento entre os grupos, o teor de carbono fixo apresenta correlação inversa com o teor de matérias voláteis, para ambos os componentes. Brand (2010) também constatou que os teores de materiais voláteis e carbono fixo são inversamente proporcionais.

FIGURA 10 - GRÁFICOS VIOLIN PLOTS PARA O TEOR DE CARBONO FIXO DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



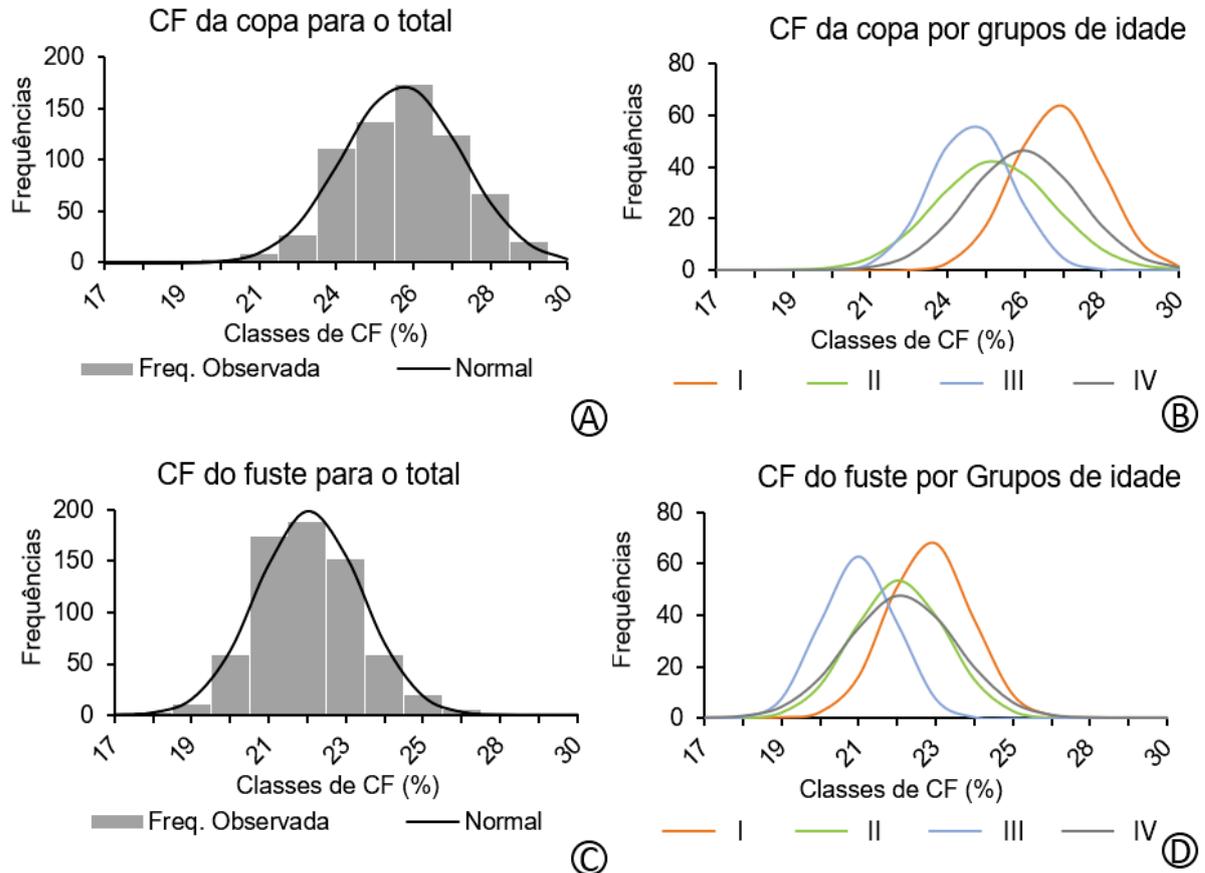
FONTE: O autor (2022).

EM QUE: CF é o teor de carbono fixo, I, II, III e IV são os grupos de idade.

O teor de carbono fixo e o teor de lignina apresentam correlações significativas e positivas, conforme relatado por Brito e Barrichelo (1977). As tendências observadas para o teor de carbono fixo podem ser explicadas devido a madeira juvenil apresentar maiores teores de lignina quando comparada com a do lenho adulto (SEVERO; CALONEGO; SANSÍGOLO, 2006).

As curvas dos teores de carbono fixo estão apresentadas na Figura 11. A distribuição normal aderiu aos dados de teores de carbono fixo da copa e fuste para o total e por grupos de idade de acordo com o teste de KS ao nível de 95% de probabilidade (FIGURA 11).

FIGURA 11 - FUNÇÕES DENSIDADE E PROBABILIDADE PARA O TEOR DE CARBONO FIXO DE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: CF é o teor de carbono fixo, I, II, III e IV são os grupos de idade.

Considerando o conjunto total de dados, a curva de distribuição dos teores de carbono fixo da copa revela maiores valores médios e maior amplitude quando comparadas aos resultados obtidos para o fuste (FIGURAS 11A E 11C). O valor das estatísticas média e de desvio padrão corroboram com essa constatação (TABELA 11).

No grupo I, a curva de distribuição dos teores de carbono fixo de copa e fuste apresentaram as maiores médias. No grupo II e IV para copa e fuste as distribuições são semelhantes, assim como os valores das médias. Os maiores desvios padrões foram constatados no grupo II e IV para copa e fuste (TABELA 11). As curvas de distribuição de copa e fuste do grupo III são aquelas com os menores valores médios e menores desvios padrões (FIGURA 11B E 11D).

Os coeficientes do ajuste da distribuição normal aos dados de teores de carbono fixo da copa e fuste para o total e por grupos de idade estão apresentados na Tabela 12.

TABELA 12 - COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA O TEOR DE CARBONO FIXO DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Grupo	FDP	Coeficientes ajustados		KS cal.	KS tab.
			$\sigma$	$\mu$		
Copa	Todos	Normal	1,71627	25,5899	0,03061 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Normal	1,27102	26,8411	0,05923 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Normal	1,69038	25,0221	0,10497 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Normal	1,17215	24,3861	0,10946 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Normal	1,59174	25,8575	0,05252 <sup>ns</sup>	0,105
Fuste	Todos	Normal	1,46681	22,1680	0,02641 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Normal	1,16767	23,0249	0,07367 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Normal	1,32648	22,1842	0,06403 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Normal	1,05955	21,0287	0,06098 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Normal	1,53781	22,2458	0,05659 <sup>ns</sup>	0,105

FONTE: O autor (2021).

EM QUE: KS é o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, <sup>ns</sup> não significativo a 5% de significância.

Considerando o teor de carbono fixo, a copa possui biomassa de qualidade para ser utilizada na geração de energia. Apesar de o fuste possuir menores teores de carbono fixo em relação à copa, ele representa de 60% a 80% da biomassa da árvore acima do solo (Costa Junior 2018). Dessa forma, a biomassa de ambos os componentes apresenta potencial para serem utilizadas na geração de energia.

### 3.3.1.6 Teores de cinzas

As estatísticas descritivas para o teor de cinza da copa e fuste estão apresentadas na Tabela 13.

Os maiores valores foram obtidos para biomassa de copa, assim como a maior dispersão dos valores (FIGURA 12A). Para a copa foi verificada uma média de 2,87%, variando de 0,72 a 5,22%. Para o fuste a média foi de 1,01% com variações de 0,27 a 2,68 % (TABELA 13). As cinzas correspondem aos minerais presentes nos vegetais e varia entre espécies e indivíduos de uma mesma espécie (ANDRADE, 2006).

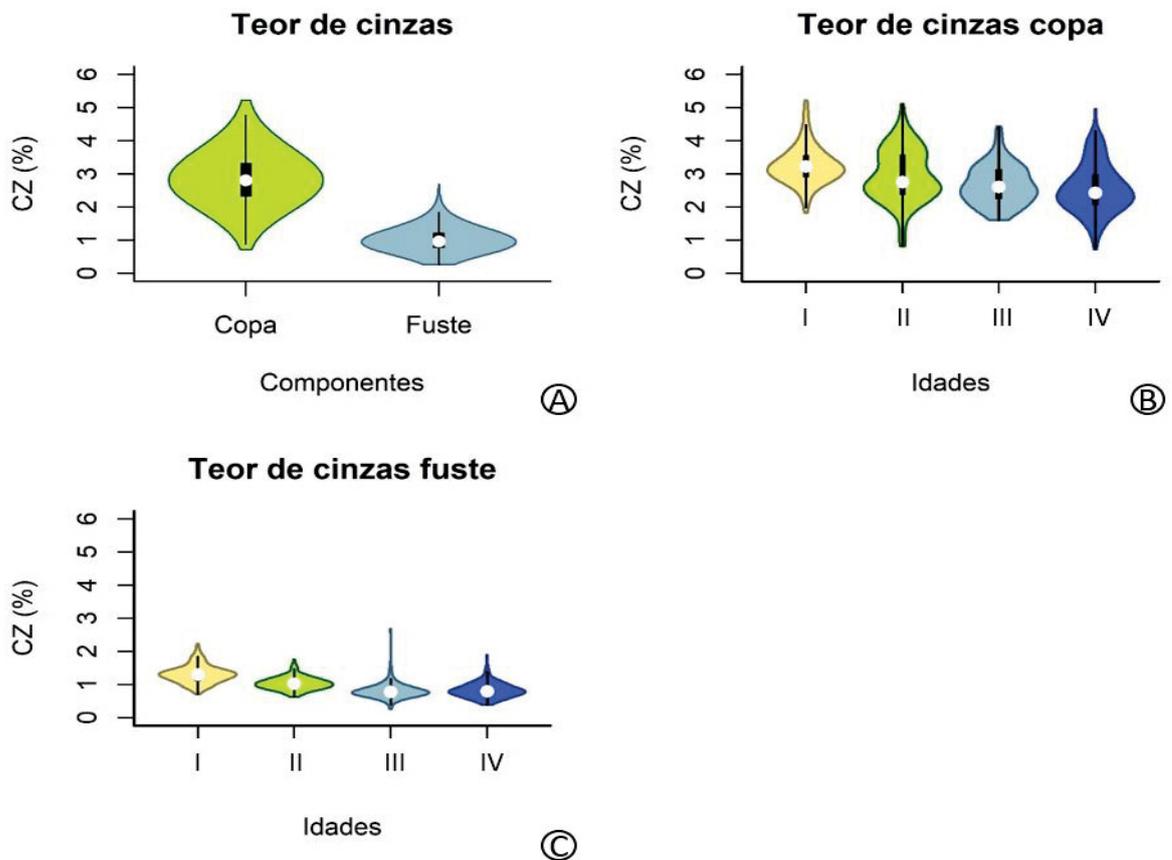
TABELA 13 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O TEOR DE CINZAS (%) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Copa					Fuste				
	Total	I	II	III	IV	Total	I	II	III	IV
Média	2,87	3,25	2,95	2,67	2,56	1,01	1,31	1,04	0,81	0,83
Desvio padrão	0,73	0,56	0,79	0,59	0,73	0,31	0,27	0,19	0,24	0,23
Coef. de Variação	25,28	17,27	26,68	22,10	28,64	31,06	20,44	18,49	29,85	27,53
Erro padrão	0,03	0,04	0,06	0,05	0,06	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Mínimo	0,72	1,83	0,82	1,60	0,72	0,27	0,72	0,63	0,27	0,39
Máximo	5,22	5,22	5,10	4,43	4,96	2,68	2,23	1,75	2,68	1,89
Intervalo de Confiança ( $\alpha=5\%$ )	$2,81 \leq \mu \leq 2,92$	$3,17 \leq \mu \leq 3,33$	$2,83 \leq \mu \leq 3,07$	$2,57 \leq \mu \leq 2,76$	$2,45 \leq \mu \leq 2,67$	$0,98 \leq \mu \leq 1,03$	$1,27 \leq \mu \leq 1,35$	$1,01 \leq \mu \leq 1,07$	$0,77 \leq \mu \leq 0,85$	$0,79 \leq \mu \leq 0,86$
N. amostras	670	185	163	153	169	670	185	163	153	169

FONTE: O autor (2022).

EM QUE: Total é o conjunto de todas as idades, I, II, III e IV são os grupos de idade.

FIGURA 12 - GRÁFICOS VIOLIN PLOTS PARA O TEOR DE CINZAS DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: CZ é o teor de cinzas, I, II, III e IV são os grupos de idade.

O teor de cinzas da copa e do fuste tendem a reduzir em florestas mais velhas (FIGURA 12B E 12C). A copa possui os maiores valores médios dos teores de cinzas em todos os grupos quando comparada aos obtidos para o fuste. Entre os grupos, os maiores valores foram constatados nos povoamentos do grupo I, e os menores valores no grupo IV, tanto para a copa como para o fuste.

Em um experimento com a acácia negra Eloy (2015) verificou uma maior participação de folhas do que de galhos na biomassa de copa em plantios com um ano e que essa relação é inversa para plantios em idades superiores. O mesmo autor também constatou que as folhas e a casca de acácia-negra apresentaram os maiores teores de cinza quando comparado aos obtidos para os demais componentes. Assim, os maiores valores dos teores de cinzas no grupo I são ocasionados pela maior participação de folhas na biomassa de copa e da casca na composição da biomassa do fuste.

Outros autores também constataram a mesma tendência decrescente do teor de cinzas com o aumento da idade. Moulin *et al.* (2015) em dois clones de *E. grandis* x *E. urophylla* com 6 e 12 meses, por Santana *et al.* (2012) em clone do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* aos 34; 48; 61; 74 e 86 meses, por Morais (2006) no clone de *E. grandis* e um híbrido de *grandis* x *urophylla* com 1; 3; 5; 6; 7 e 8 anos.

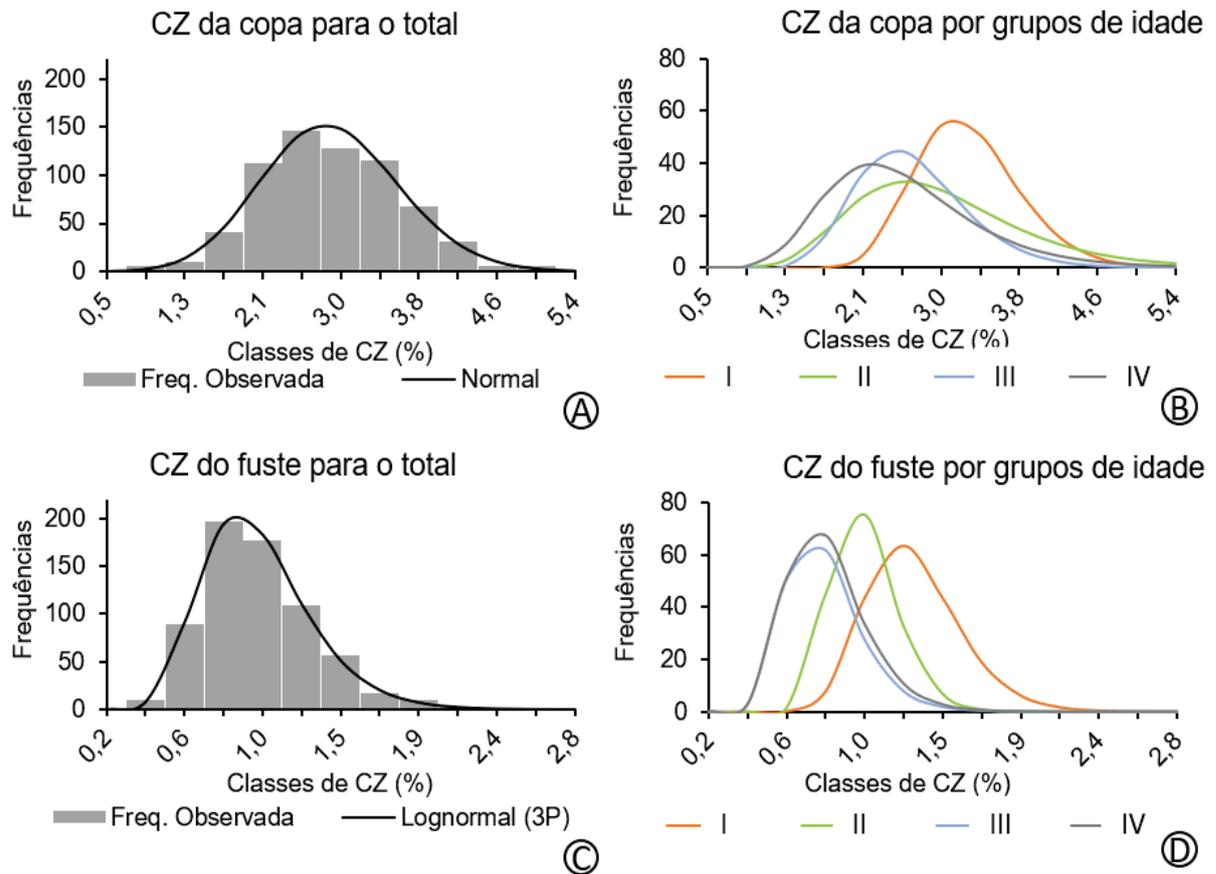
Os dados do teor de cinzas da copa e fuste para o conjunto total de dados e por grupos seguem uma distribuição unimodal assimétrica (FIGURA 13). A distribuição Lognormal (3P) aderiu ao conjunto de dados total, e a Lognormal aos dados separados por grupos de idade, ambas de acordo com o teste de KS ao nível de 95% de probabilidade.

As distribuições dos teores de cinzas da copa apresentam maior amplitude quando comparadas as curvas obtidas para o fuste (FIGURA 13A E 13C). Como mencionado, folhas e cascas influenciam consideravelmente o teor de cinzas, entretanto a variação da quantidade de folhas na copa é maior que a variação de casca no fuste, contribuindo, assim, para maior amplitude da distribuição do teor de cinzas em biomassa de copa.

No grupo I as distribuições apresentaram valores altos para as médias e valores baixos para o desvio padrão, para a copa e fuste. Para a copa as curvas tenderam a se estabilizar a partir do grupo II, com os valores das estatísticas variando

pouco nos grupos III e IV (FIGURA 13B). Para o fuste o grupo II resultou em média e desvio padrão menores que nos demais grupos, ocorrendo a estabilização dos valores a partir do grupo III (FIGURA 13D).

FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA O TEOR DE CINZAS DE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: CZ é o teor de cinzas, I, II, III e IV são os grupos de idade.

Os valores dos coeficientes da distribuição Lognormal (3P) separados por grupos de idade e para o total estão apresentados na Tabela 14.

As cinzas são compostas de material inorgânico que não entram em combustão e, quando em alta concentração, reduzem o poder calorífico e afetam a transferência de calor (CHAVES et al. 2013; KLAUTAU, 2008). Dessa forma, quanto menor for o teor de cinzas melhor será o combustível para a geração de energia.

Considerando os teores de cinza, a biomassa do fuste é a porção mais indicada para ser utilizada na geração de energia, em especial a de povoamentos que compõem o grupo III e IV.

TABELA 14 - COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA O TEOR DE CINZAS DE COPA E FUSTE PARA TOTAL E PARA OS GRUPOS DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Grupo	FDP	Coeficientes ajustados			KS cal.	KS tab.
			$\sigma$	$\mu$	$\gamma$		
Copa	Todos	Lognormal (3P)	0,063871	2,425510	-8,46222	0,02573 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Lognormal	0,169245	1,164640		0,08323 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Lognormal	0,300049	1,040560		0,09595 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Lognormal	0,218941	0,956799		0,06617 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Lognormal	0,299336	0,896374		0,06719 <sup>ns</sup>	0,105
Fuste	Todos	Lognormal (3P)	0,252900	0,159953	-0,20367	0,03230 <sup>ns</sup>	0,052
	I	Lognormal	0,202056	0,251583		0,06330 <sup>ns</sup>	0,100
	II	Lognormal	0,181598	0,019842		0,04854 <sup>ns</sup>	0,107
	III	Lognormal	0,260830	-0,248810		0,09890 <sup>ns</sup>	0,110
	IV	Lognormal	0,268121	-0,224620		0,05351 <sup>ns</sup>	0,105

FONTE: O autor (2022).

EM QUE: KS é o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, <sup>ns</sup> não significativo a 5% de significância.

### 3.3.1.7 Estoques de biomassa

As estatísticas descritivas para o estoque de biomassa da copa e fuste estão apresentadas na Tabela 15.

TABELA 15 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA O ESTOQUE DE BIOMASSA (kg) DA COPA E FUSTE, PARA O TOTAL E POR GRUPOS DE IDADE, DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componente	Copa					Fuste				
	Total	I	II	III	IV	Total	I	II	III	IV
Média	8,97	3,19	6,81	11,48	15,13	36,56	5,22	21,86	48,45	74,29
Desvio padrão	9,64	2,77	5,30	7,73	13,97	39,33	4,63	13,42	29,56	48,15
Coef. de Variação	107,39	86,75	77,85	67,34	92,33	107,57	88,64	61,39	61,01	64,82
Erro padrão	0,37	0,20	0,42	0,62	1,07	1,52	0,34	1,05	2,39	3,70
Mínimo	0,16	0,19	0,16	0,29	0,59	0,04	0,10	1,15	0,70	0,04
Máximo	94,71	11,54	26,33	32,82	94,71	266,36	20,09	71,12	140,43	266,36
Intervalo de Confiança ( $\alpha=5\%$ )	8,24	2,79	5,99	10,24	13,01	33,58	4,55	19,78	43,73	66,98
	$\leq \mu \leq$									
	9,70	3,59	7,63	12,71	17,25	39,54	5,89	23,93	53,17	81,60
N. amostras	670	185	163	153	169	670	185	163	153	169

FONTE: O autor (2022).

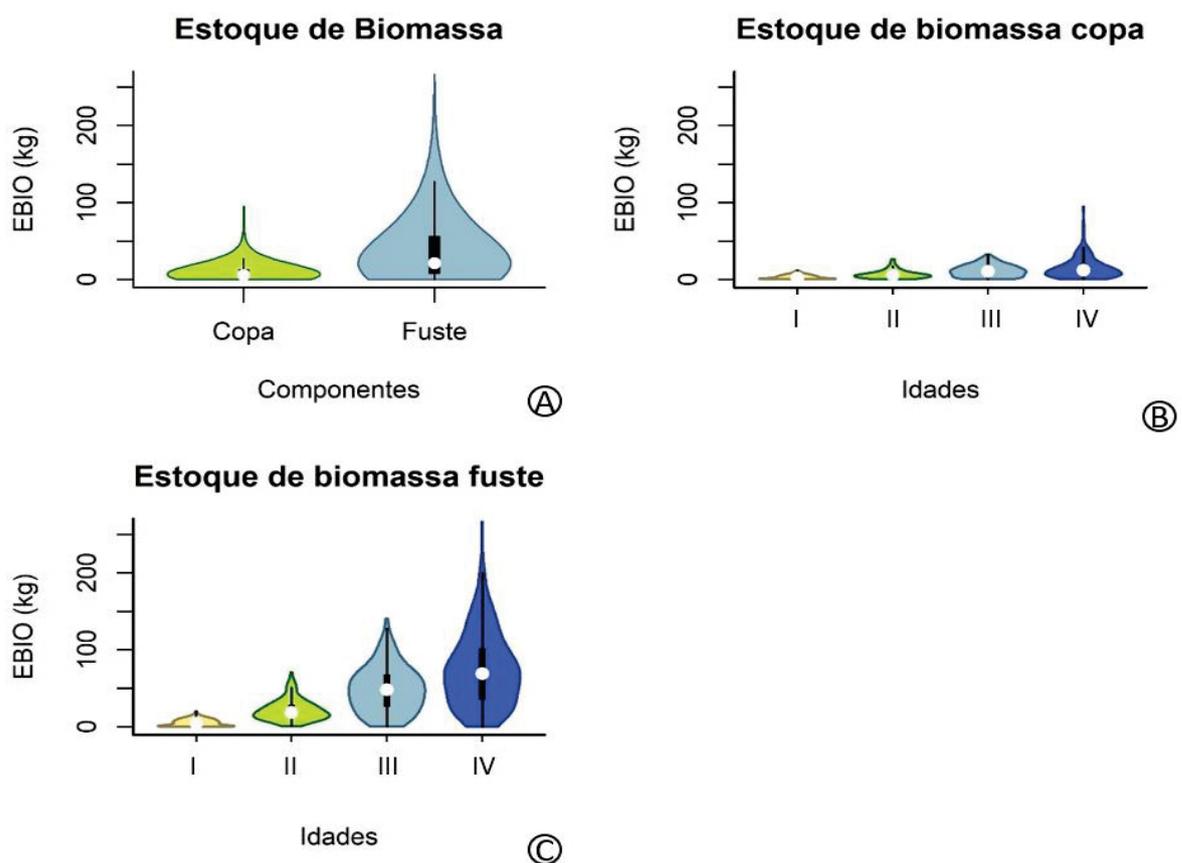
EM QUE: Total é o conjunto de todas as idades, I, II, III e IV são os grupos de idade.

O fuste é o componente com o maior estoque de biomassa, com média geral de 36,56 kg por indivíduo e com valores que alcançam 266,36 kg. A copa das árvores possui em média 8,97 kg, com valor máximo de 94,71 kg (TABELA 15). No grupo IV

foram encontradas as maiores médias com 15,13 kg para copa e 74,29 kg para o fuste.

Os estoques de biomassa de copa e fuste tendem a aumentar com a idade (FIGURA 14). A mesma tendência foi constatada por Sanquetta et al. (2014). No entanto, o incremento desses componentes ao longo do tempo ocorre de forma diferente. De acordo com Momolli e Schumacher (2019) à medida que o povoamento de acácia negra envelhece ocorre incremento em diâmetro e altura, resultando em produção de madeira e casca e diminuição da copa (principalmente folhas e galhos vivos).

FIGURA 14 - GRÁFICOS *VIOLIN PLOTS* PARA O ESTOQUE DE BIOMASSA DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

EM QUE: EBIO é o estoque de biomassa, I, II, III e IV são os grupos de idade.

Na pesquisa realizada por Sanquetta et al. (2014), povoamento com 1 ano que corresponde ao grupo I, a biomassa é composta principalmente pela copa (folhas

e galhos) e, no ano 7, que corresponde ao grupo IV, o fuste é o componente que reúne mais biomassa, concentradas principalmente na madeira e casca.

A dinâmica que envolve o crescimento dos estoques de biomassa de copa e fuste é diferente. A biomassa de copa aumenta com o surgimento de novas folhas e galhos principalmente, no entanto, a biomassa também se reduz com a queda de folhas e galhos. Behling (2014), estudando povoamentos de acácia negra, constatou que a idade do povoamento é um dos fatores que influenciam a massa de folhas. Para a mesma espécie Costa Junior et al. (2018) constataram que o crescimento em biomassa de copa se mostra mais heterogêneo frente aos efeitos do fator idade, comparado ao fuste.

Para espécies do gênero *Eucalyptus*, Santana et al. (2008) observaram uma forte queda na percentagem de copa entre seis meses e três anos e seis meses de idade, e uma redução mais lenta até aos cinco anos, tornando-se ainda mais estável a partir do sexto ano.

O fuste, diferente do que ocorre com a copa, somente acumula biomassa ao longo da idade. O fuste (madeira e casca) cresce em altura e em diâmetro acumulando biomassa no decorrer das idades. Dessa maneira, o maior estoque de biomassa é encontrado no fuste e tende a aumentar com a idade.

Para a mesma base de dados utilizada na presente pesquisa, Costa Junior et al. (2018) observaram que em idades entre 0 e 2 anos a copa e o fuste representaram em torno de 40% e 60% da biomassa total respectivamente. Em povoamento com idade superior a 6 anos a copa responde por aproximadamente 20% e o fuste a 80% da biomassa total acima do solo. Vieira e Schumacher (2011), em pesquisas com eucaliptos e acácia negra, constataram que aos 6 meses de idade a copa era responsável por mais de 50% da biomassa total. Aos 18 meses o fuste já respondia por mais de 50% da biomassa total.

Os dados dos estoques de biomassa de copa para cada povoamento avaliado seguem uma distribuição assimétrica positiva (FIGURA 15). A distribuição de Burr aderiu aos dados dos estoques de biomassa da copa de cada povoamento, de acordo com o teste de KS ao nível de 95% de probabilidade. A distribuição foi flexível para explicar a dispersão dos dados de estoque de biomassa em povoamentos com diferentes idades e locais de cultivos.

A biomassa de copa do grupo I, na região de Piratini, ajustou-se à distribuição de Burr, que se aproxima de uma curva simétrica, enquanto, em Cristal e Encruzilhada do Sul a curva apresentou assimetria positiva (FIGURA 15A, 15B E 15C). Em Piratini o povoamento tem 1 ano e a distribuição se aproxima de uma distribuição normal.

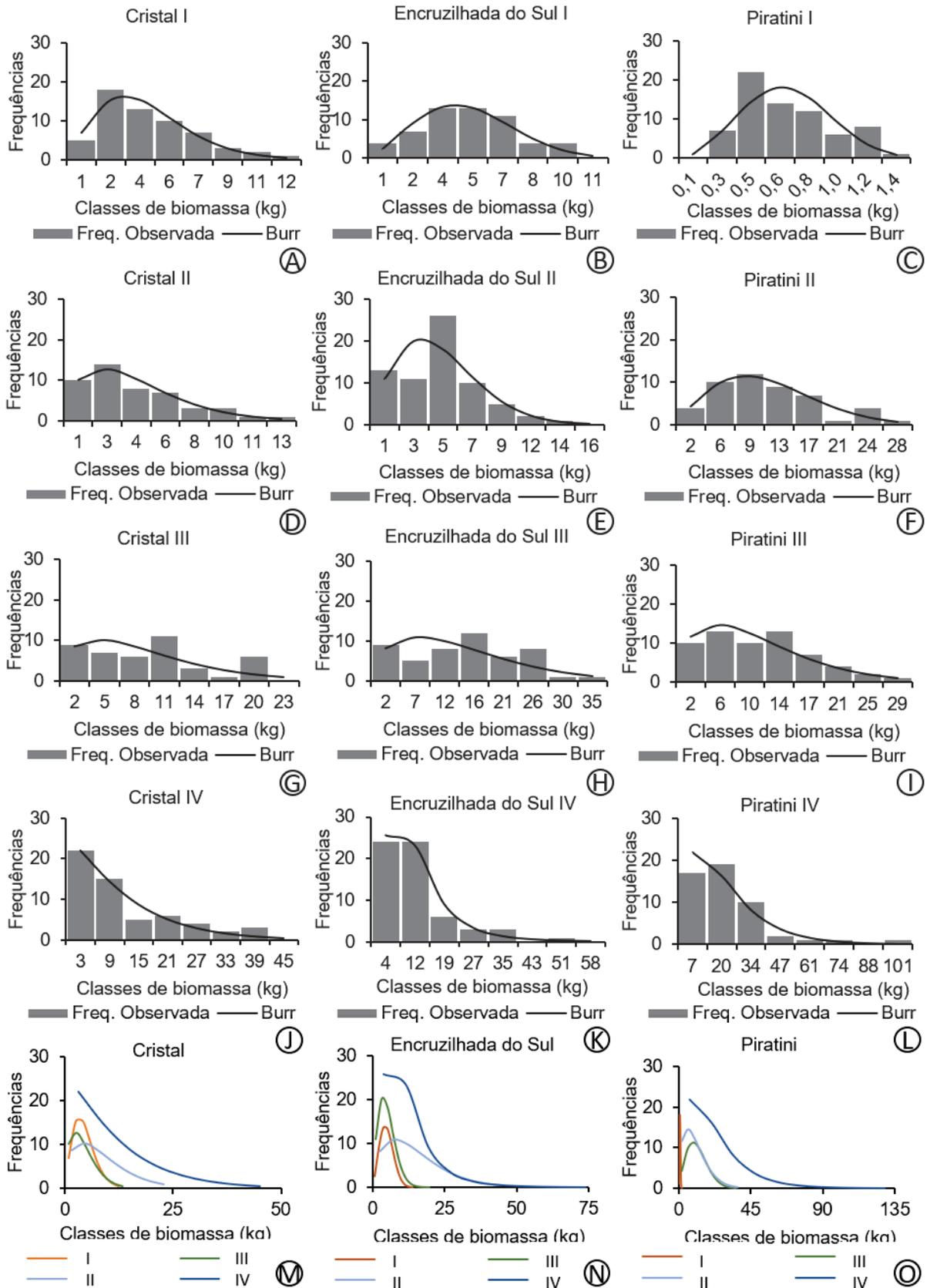
No grupo II a curva da biomassa de copa das três regiões apresentou assimetria positiva (FIGURA 15D, 15E E 15F). No grupo III essa característica também foi observada (FIGURA 15G, 15H E 15I). No grupo IV a curva tende a forma de uma distribuição exponencial negativa, característica comum em florestas em que há elevado processo de competição por recursos e espaço (FIGURA 15J, 15K E 15L).

Quando os povoamentos são implantados não há competição, ou seja, os estoques de biomassa tendem a uma distribuição simétrica. À medida que os povoamentos crescem as copas das árvores entram em competição, principalmente por luz e espaço. Aliado ao solo, o fator genético faz com que algumas poucas árvores se tornem dominantes, suprimindo parte das demais que está ao seu entorno. Cerca de 68% das árvores avaliadas possuem um estoque de biomassa de copa com menos de 10 kg, 22% estão entre 10 e 20 kg e 10% tem mais de 20 kg. Assim, com a idade há uma redução no número de árvores que possuem grande estoque de biomassa de copa e um aumento daquelas que possuem pequeno estoque.

Desse modo, a distribuição dos dados em povoamentos do grupo I tende à forma simétrica, do grupo II e III tende à forma assimétrica positiva e no grupo IV à uma distribuição exponencial, evidenciando o efeito dos fatores de competição.

Em Cristal e Encruzilhada do Sul as curvas de biomassa de copa do grupo I e II apresentam amplitude semelhante, passando a aumentar nos grupos III e IV. Já em Piratini as curvas do grupo II e III apresentam amplitude semelhante. Tais diferenças entre os locais de cultivo ao longo das idades expressa o efeito do material genético e do sítio. Sanquetta et al. (2014) constataram que elementos meteorológicos influenciam no tamanho da copa de árvores de acácia negra, e enfatizam que há uma interação complexa entre o sistema solo-água-planta.

FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DO ESTOQUE DE BIOMASSA DE COPA DE ÁRVORES DE ACÁCIA-NEGRA CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).  
EM QUE: I, II, III e IV são os grupos de idade.

As distribuições dos estoques de biomassa do fuste são unimodais nas idades iniciais e se aproximam de uma curva simétrica, enquanto em povoamentos mais velhos são assimétricas (FIGURA 16). A distribuição de Burr aderiu aos dados de acordo com o teste de KS ao nível de 95% de probabilidade.

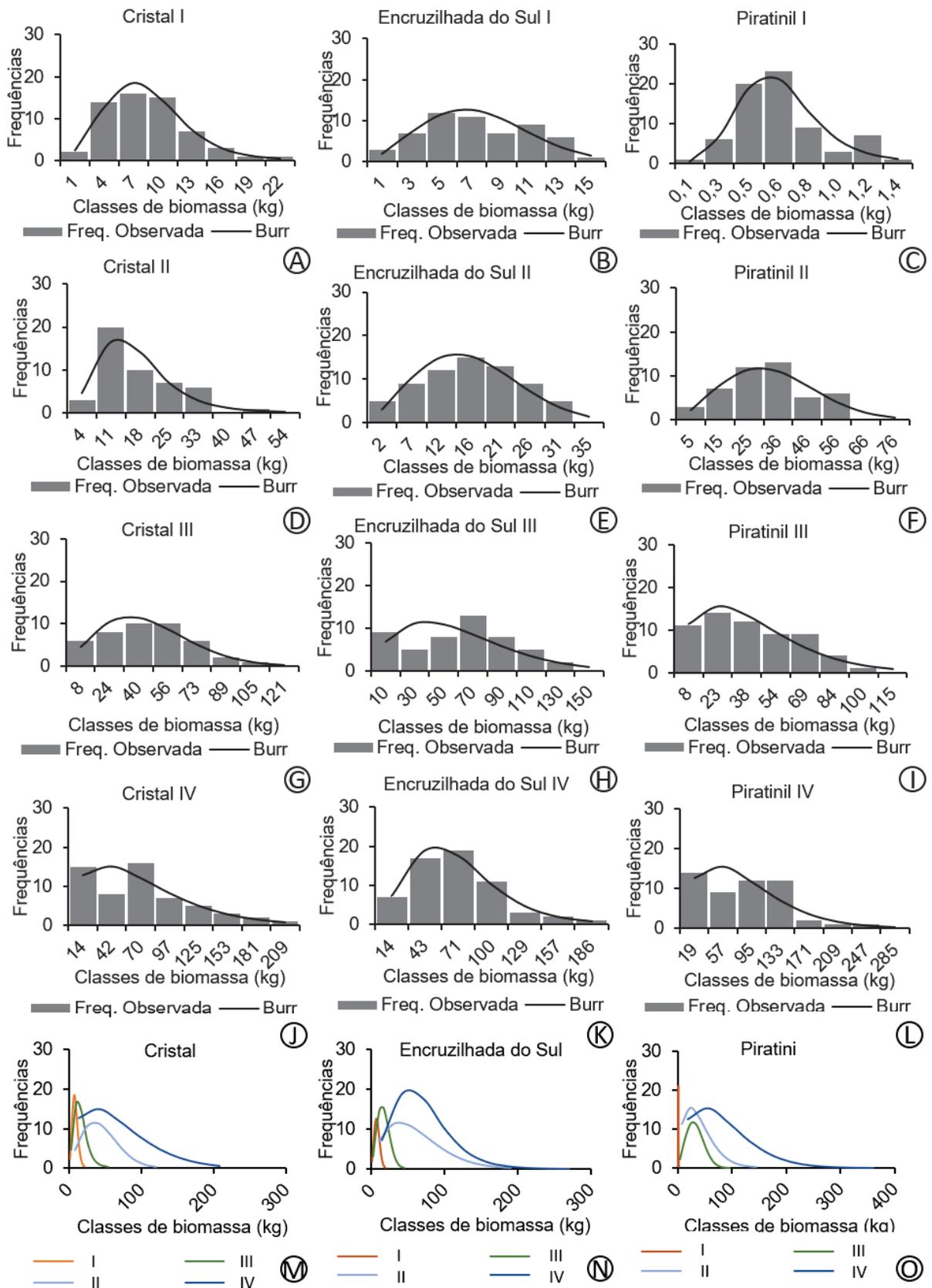
Para o estoque de biomassa do fuste foi constatada tendência semelhante ao da observada para o estoque de biomassa da copa. Nas idades iniciais a distribuição tende a formas simétricas, e à medida que os povoamentos envelhecem a forma torna-se assimétrica, tendendo a exponencial.

No grupo I a forma da distribuição de Burr se aproxima da distribuição Normal nas três regiões (FIGURA 16A, 16B E 16C). No grupo II a forma do povoamento da região de Cristal apresenta assimetria positiva, enquanto nas regiões de Encruzilhada do Sul e Piratini a forma da distribuição se aproxima da distribuição Normal. (FIGURA 16D, 16E E 16F). Nos grupos III e IV a curva dos povoamentos das três regiões mudam de forma e apresentam assimetria positiva (FIGURAS 16G, 16H, 16I, 16J, 16K E 16L).

No fuste, a transição da forma da distribuição de simétrica para assimétrica positiva ocorre entre os grupos de idade II e III, e na copa essa transição ocorre entre os grupos I e II.

Nos povoamentos de acácia negra a copa das árvores se encosta umas nas outras com um ano e meio na linha, e aos três anos na entrelinha. Com isso, a copa é o primeiro componente da árvore que tem espaço e recursos limitados, ocasionando um maior número de árvores com menor estoque de biomassa de copa, logo a mudança de forma da curva ocorre cedo. Como a dinâmica no crescimento do estoque de biomassa de copa e fuste são diferentes, o fuste é cumulativo, não perde biomassa como acontece com a copa e, devido a isto, a transição na forma da curva dos estoques de biomassa do fuste ocorre mais tarde.

FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DO ESTOQUE DE BIOMASSA DE FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).  
 EM QUE: I, II, III e IV são os grupos de idade.

A produção de biomassa de uma planta depende da eficiência com que a planta converte os recursos disponíveis em fotoassimilados, que ocorre nas folhas. Logo, a quantidade de biomassa de copa influencia na produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, no estoque de biomassa do fuste. Aproximadamente 72% das árvores apresentam biomassa de fuste abaixo de 50kg, 20% entre 50 e 100kg e 8% acima de 100kg. As curvas de biomassa do fuste apresentam amplitude diferente entre todas as idades (FIGURA 16M, 16N E 16O).

TABELA 16 - COEFICIENTES AJUSTADOS PARA AS FUNÇÕES DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP) PARA A VARIÁVEL ESTOQUE DE BIOMASSA DA COPA E FUSTE DOS POVOAMENTOS AMOSTRADOS NAS REGIÕES DE CRISTAL, ENCRUZILHADA DO SUL E PIRATINI PARA OS GRUPOS DE IDADE I, II, III E IV DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Copa							
Local	Idade	FDP	Coeficientes de ajuste			KS cal.	KS tab.
			K	$\alpha$	$\beta$		
Cristal	I	Burr	7,82745	1,95932	13,8523	0,07726 <sup>ns</sup>	0,17706
	II	Burr	961,52	1,50322	466,958	0,07093 <sup>ns</sup>	0,19838
	III	Burr	3474,02	1,41101	3049,29	0,12397 <sup>ns</sup>	0,20740
	IV	Burr	3650,16	1,08006	23889,00	0,07983 <sup>ns</sup>	0,18014
Encruzilhada do Sul	I	Burr	964,797	2,27973	113,068	0,05959 <sup>ns</sup>	0,18174
	II	Burr	1146,99	1,82341	268,905	0,10642 <sup>ns</sup>	0,16492
	III	Burr	3411,21	1,47559	3983,28	0,14931 <sup>ns</sup>	0,19233
	IV	Burr	1,95437	1,94612	15,6133	0,08097 <sup>ns</sup>	0,17413
Piratini	I	Burr	124,924	2,76912	4,42454	0,09289 <sup>ns</sup>	0,16255
	II	Burr	898,147	1,90805	466,787	0,06355 <sup>ns</sup>	0,19630
	III	Burr	4649,56	1,46328	3785,39	0,10688 <sup>ns</sup>	0,17558
	IV	Burr	6,34434	1,40938	81,8276	0,09124 <sup>ns</sup>	0,19044
Fuste							
Cristal	I	Burr	3,69813	2,69785	14,423	0,05873 <sup>ns</sup>	0,17706
	II	Burr	2,07798	2,53919	22,6872	0,08447 <sup>ns</sup>	0,19838
	III	Burr	1429,53	1,94885	2113,87	0,09775 <sup>ns</sup>	0,20740
	IV	Burr	1897,5	1,4457	14288,3	0,08241 <sup>ns</sup>	0,18014
Encruzilhada do Sul	I	Burr	692,11	2,33384	138,831	0,07108 <sup>ns</sup>	0,18174
	II	Burr	1395,77	2,22151	488,118	0,0793 <sup>ns</sup>	0,16492
	III	Burr	1097,77	1,64228	4766,75	0,13256 <sup>ns</sup>	0,19233
	IV	Burr	4,25439	2,18631	142,152	0,05307 <sup>ns</sup>	0,17413
Piratini	I	Burr	1,74959	3,65059	0,766282	0,05912 <sup>ns</sup>	0,16255
	II	Burr	575,971	2,28278	610,075	0,07124 <sup>ns</sup>	0,19630
	III	Burr	2214,21	1,55112	6411,25	0,07813 <sup>ns</sup>	0,17558
	IV	Burr	361,516	1,53523	4321,33	0,1056 <sup>ns</sup>	0,19044

FONTE: O autor (2022).

EM QUE: KS é o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, <sup>ns</sup> não significativo a 5% de significância.

### 3.3.2 Classes de qualidade

As classes de qualidade de cada variável energética foram estabelecidas com base na análise de agrupamento (*cluster*). Várias distâncias e ligações foram testadas. O coeficiente de correlação cofenética revelou que a distância Euclidiana e ligação de Ward foi o melhor resultado para agrupamento das árvores em função das variáveis poder calorífico superior, teor de cinzas, densidade energética e estoque de biomassa. A análise de cluster agrupou os indivíduos em três classes de qualidade, denominadas de baixa, média e alta.

Os métodos do vizinho mais próximo, vizinho mais distante, valor médio e centroide apresentaram correlações cofenéticas mais fortes quando comparado ao método de Ward, no entanto a divisão de grupo não foi satisfatória (TABELA 17).

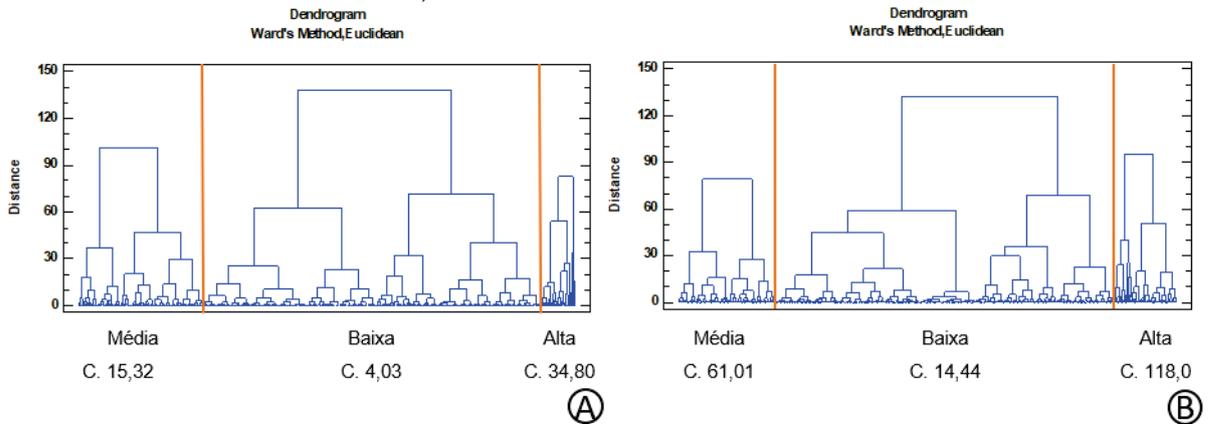
TABELA 17 - CORRELAÇÃO COFENÉTICA DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS (*CLUSTER*) COM A DISTÂNCIA EUCLIDIANA PARA AS VARIÁVEIS: ESTOQUE DE BIOMASSA (EBIO), PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), DENSIDADE ENERGÉTICA (DE), TEOR DE CINZAS (CZ) DOS COMPONENTES COPA E FUSTE DE ÁRVORE DE ACÁCIA NEGRA DE POVOAMENTOS COMERCIAIS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Componentes da biomassa	Variáveis	Vizinho mais próximo	Vizinho mais distante	Valor médio	Centroide	Ward
Copa	EBIO	0,73	0,84	0,87	0,87	0,60
	PCS	0,48	0,68	0,72	0,73	0,67
	DE	0,57	0,68	0,77	0,77	0,59
	CZ	0,56	0,73	0,75	0,75	0,62
Fuste	BIO	0,64	0,86	0,84	0,84	0,73
	PCS	0,50	0,80	0,78	0,81	0,55
	DE	0,47	0,66	0,72	0,72	0,65
	CZ	0,50	0,61	0,79	0,78	0,63

FONTE: O autor (2022).

Os valores dos estoques de biomassa de copa e fuste foram agrupados em três classes, sendo que a classe baixa foi a que reuniu a maior quantidade de indivíduos (FIGURA 17A E 17B).

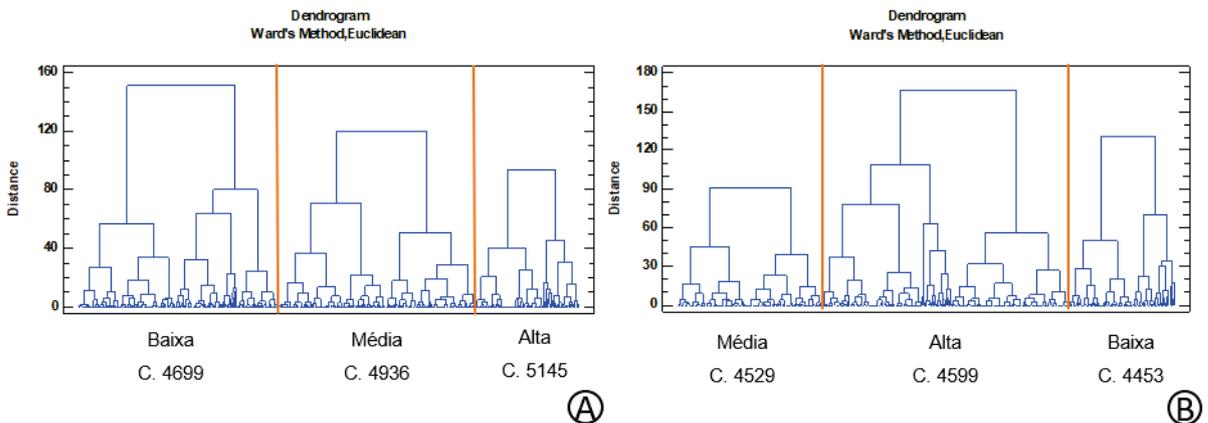
FIGURA 17 - DENDROGRAMAS DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS (*CLUSTER*) DOS ESTOQUES DE BIOMASSA DE COPA (A) E FUSTE (B) DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

Considerando os valores de poder calorífico superior da copa, os dados foram distribuídos com frequência equilibrada entre as três classes de qualidade. Para o fuste, a classe alta reuniu a maior quantidade de indivíduos (FIGURA 18A E 18B).

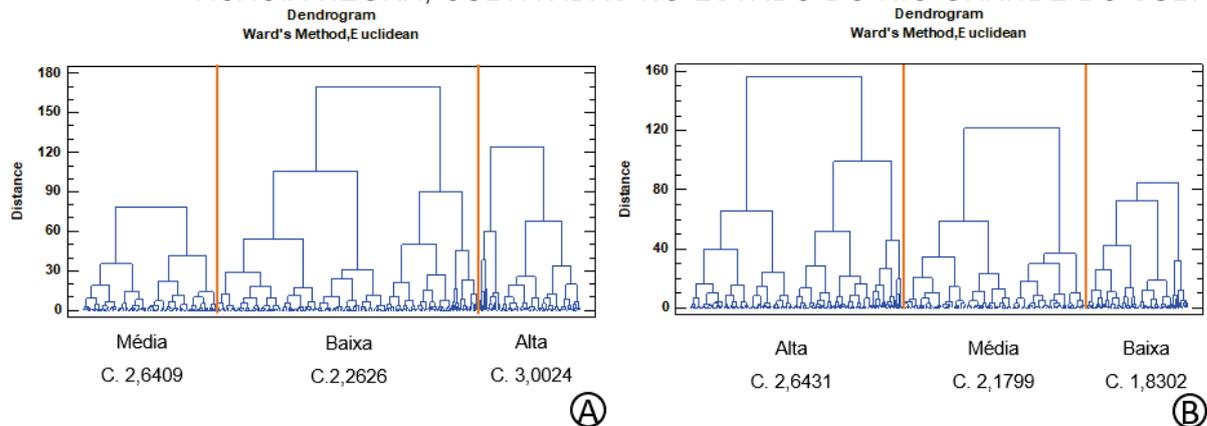
FIGURA 18 - DENDROGRAMAS DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS (*CLUSTER*) DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE COPA (A) E FUSTE (B) DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

Quando considerada a densidade energética da copa, o maior número de indivíduos ficou agrupado na classe baixa, enquanto para o fuste a maior quantidade ficou agrupada na classe alta (FIGURA 19A E 19B).

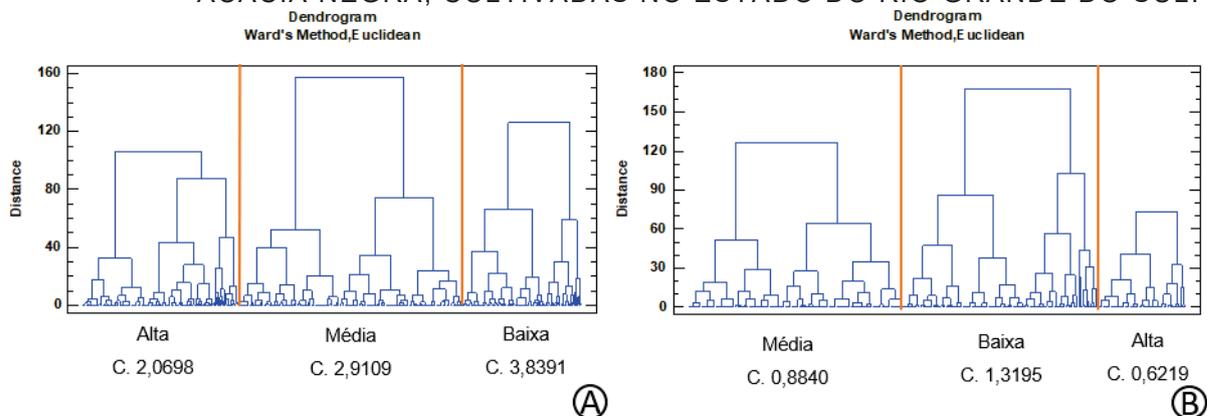
FIGURA 19 - DENDROGRAMAS DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS (*CLUSTER*) DA DENSIDADE ENERGÉTICA DE COPA (A) E FUSTE (B) DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

Para o teor de cinzas da copa e fuste, a maior concentração de indivíduos ficou agrupada na classe média (FIGURA 20A E 20B).

FIGURA 20 - DENDROGRAMAS DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS (*CLUSTER*) DO TEOR DE CINZAS DA COPA (A) E FUSTE (B) DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA, CULTIVADAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.



FONTE: O autor (2022).

Uma vez formados os grupos, a análise discriminante revelou duas funções para classificá-los. As funções discriminantes para o estoque de biomassa da copa classificaram corretamente 85% dos casos. As variáveis que mostraram mais importância na classificação foram idade, diâmetro à altura do peito, altura total, precipitação acumulada, precipitação média e temperatura máxima. As variáveis diâmetro à altura do peito e precipitação média foram as que mais contribuíram na função 1, enquanto, idade, altura e precipitação acumulada contribuíram mais na equação 2 (TABELA 18).

TABELA 18 - FUNÇÕES DISCRIMINANTES PARA AS VARIÁVEIS: ESTOQUE DE BIOMASSA, PODER CALORÍFICO SUPERIOR, DENSIDADE ENERGÉTICA E TEOR DE CINZAS PARA OS COMPONENTE COPA E FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA.

Componente	Nº	Funções discriminantes	CC (%)
Estoques de biomassa			
Copa	1	$-0,246844*I + 1,58809*DAP - 0,54726*H + 0,211521*PP(AC) + 0,585659*PP(MEDIA) - 0,25425*TMAX$	85,05
	2	$-4,11967*I - 1,04506*DAP + 1,71594*H + 3,56211*PP(AC) + 0,0733975*PP(MEDIA) - 0,252731*TMAX$	
Fuste	1	$1,69523*I + 1,39297*DAP - 0,273077*H - 1,54448*PP(AC) + 0,396285*PP(MEDIA) + 0,94779*UR - 1,13419*IS$	90,15
	2	$-2,51154*I - 1,18862*DAP + 1,69781*H + 2,05874*PP(AC) - 0,424*PP(MEDIA) + 1,0957*UR - 0,825408*IS$	
Poder calorífico superior			
Copa	1	$0,301732*I + 0,1158*H + 0,922807*MV$	70,15
	2	$-0,0079085*I + 0,959234*H - 0,486533*MV$	
Fuste	1	$-0,975853*I + 1,1336*H + 0,971238*CF$	51,04
	2	$0,954538*I + 0,0451071*H + 0,382739*CF$	
Densidade energética			
Copa	1	$0,61932*BIO + 1,18316*I - 0,776003*H$	58,81
	2	$-1,11132*BIO + 0,0798068*I + 1,17951*H$	
Fuste	1	$0,137157*BIO + 0,569441*I + 0,458884*H$	65,67
	2	$-0,995065*BIO - 0,60692*I + 1,43903*H$	
Teor de cinzas			
Copa	1	$0,00572521*H + 0,205681*DB + 4,97506*MV + 4,5939*CF$	95,22
	2	$0,810616*H + 0,00900632*DB - 1,47951*MV - 1,84575*CF$	
Fuste	1	$0,252977*I + 6,78267*MV + 6,32894*CF$	89,85
	2	$0,686906*I - 4,65734*MV - 5,3457*CF$	

FONTE: O autor (2022).

EM QUE: CC é o percentual de casos classificados corretamente, I é a idade em anos, DAP é o diâmetro à altura do peito em cm, H a altura total em metros, BIO é a biomassa em kg, PP(AC) é a precipitação acumulada em mm, PP(MEDIA) é a precipitação média anual em mm, TMAX é a temperatura máxima em °C, UR é a umidade relativa %, IS é a insolação em h, MV é o teor de materiais voláteis em %, CF é o teor de carbono fixo %, DB é a densidade básica em g.cm<sup>-3</sup> e CZ é o teor de cinzas em %.

Cerca de 7% das árvores foi classificada como classe alta, 25% como classe média e 68% como classe baixa para o estoque de biomassa de copa. Cerca de 95% da classe alta é composta por árvores do grupo III e IV. Árvores do grupo III e IV respondem por 79% dos indivíduos alocados na classe de qualidade média. A classe baixa é composta por árvores de todas os grupos predominando árvores do grupo I e II, o que equivale a 68%.

Para os estoques de biomassa do fuste, as funções conseguiram classificar corretamente 90% dos casos. As mesmas variáveis que se mostraram mais importantes para classificar o estoque de biomassa de copa também o foram para o fuste, entretanto, excluindo a temperatura e adicionando-se a umidade relativa e insolação. O diâmetro à altura do peito contribuiu mais para a função 1, enquanto a

idade, altura total e precipitação acumulada contribuíram para a função 2. A precipitação média, umidade relativa e insolação contribuíram para ambas as funções (TABELA 18).

Aproximadamente 13% de todas as das árvores avaliadas estão localizadas na classe alta para o estoque de biomassa do fuste. Cerca de 19% estão localizadas na classe média e 68% na classe baixa. Na classe de qualidade alta há somente árvores do grupo III e IV. Cerca de 90% das árvores encontradas na classe média também são do grupo III e IV. Na classe baixa há indivíduos de todos os grupos, porém os que estão no grupo I e II respondem por 74% de toda a classe.

Para o poder calorífico superior da copa as funções discriminantes classificaram corretamente cerca de 70% das árvores. As variáveis idade, altura total e teor de materiais voláteis foram as mais importantes nas funções discriminantes. Na função 1 a idade e o teor de materiais voláteis foram as mais importantes, enquanto a altura total contribuiu mais para a função 2 (TABELA 18).

A classe de qualidade alta para o poder calorífico superior da copa compreende 20% das árvores, enquanto as classes média e baixa compreendem 40% cada. Os povoamentos classificados no grupo I respondem por 68% das árvores localizadas na classe alta. Junto com indivíduos do grupo IV, respondem por 56% das árvores na classe média. Indivíduos dos grupos III e IV representam 69% da classe baixa.

As funções discriminantes para o poder calorífico do fuste classificaram corretamente 51% dos casos. As variáveis altura total e o teor de carbono fixo foram as mais importantes para a função 1, enquanto a idade teve maior contribuição na função 2 (TABELA 18). Nesse caso as funções discriminaram bem as classes de qualidade.

Diferente dos demais casos, para o poder calorífico superior do fuste a classe com maior percentual foi a de qualidade alta, com 50% das árvores. A classe média abrange 29% e a classe baixa 21%. Nas três classes não foi constatada a predominância de indivíduos de um determinado grupo de idade.

As funções discriminantes classificaram corretamente 58,8% dos casos, quando considerada a densidade energética de copa. As variáveis que contribuíram para as funções foram o estoque de biomassa, a idade e a altura total. Na função 1 a idade foi a variável que mais contribuiu, enquanto na função 2 foram os estoques de biomassa e a altura total (TABELA 18).

Aproximadamente 20% das árvores estão reunidas na classe de qualidade alta para a densidade energética, 27% na média e 53% na baixa. Os indivíduos do grupo IV representam 58% dos localizados na classe de qualidade alta. A classe média reúne árvores de todos os grupos, não havendo qualquer uma que se destaque. Os grupos I e II respondem por 68% das árvores alocadas na classe baixa.

Cerca de 65,57% dos indivíduos foram classificados corretamente quando considera a densidade energética do fuste. As variáveis estoque de biomassa, idade e altura novamente foram as que mais contribuíram. A idade contribuiu mais para a função 1 enquanto as demais variáveis para a função 2 (TABELA 18).

Para a densidade energética do fuste 42% das árvores estão reunidas na classe de qualidade alta, 37% na média e 21% na baixa. Cerca de 86% dos indivíduos da classe alta são árvores dos grupos III e IV. Da classe média 72% das árvores são provenientes dos grupos I e II. Na classe baixa 74% das árvores são do grupo I.

O teor de cinza da copa foi a variável mais bem classificada pelas funções, com acerto de 95,22% dos casos. As variáveis mais importantes foram altura total, densidade básica, teor de materiais voláteis e carbono fixo. A altura contribuiu mais para a função 2 enquanto as demais variáveis contribuíram com a função 1.

Quanto maior o teor de cinzas da biomassa pior a qualidade para fins energéticos. Dessa forma, ao contrário das demais variáveis, a classe de qualidade alta reúne indivíduos com os menores teores de cinzas e, conseqüentemente, a classe baixa os indivíduos com os maiores teores de cinzas. Devido a isto, 31% das árvores estão reunidas na classe de qualidade alta, 45% na média e 24% na baixa (TABELA 18). Por volta de 73% das árvores alocadas na classe alta são provenientes de povoamentos do grupo III e IV. Na classe média 38% encontram-se em povoamentos do grupo I. Na classe baixa 73% das árvores são do grupo I e II.

Para o teor de cinzas do fuste 89,85% dos casos foram classificados corretamente. A idade junto com os teores de materiais voláteis e carbono fixo discriminaram os grupos de qualidade. A idade foi a variável que mais contribui na função 2, enquanto o teor de materiais voláteis e carbono fixo contribuem mais na função 1.

Quando considerado o teor de cinzas do fuste, a classe de qualidade alta reúne 18% dos indivíduos, a média 43% e a baixa 39%. Árvores do grupo III e IV compõem 94% da classe alta. A classe média reúne árvores de todos os grupos de idades. Na classe baixa 86% dos indivíduos são do grupo I e II.

Na Tabela 19 está apresentada a matriz de confusão da análise discriminante para as variáveis utilizadas como referência na classificação da qualidade da biomassa para fins energéticos.

TABELA 19 - MATRIZES DE CONFUSÃO DA ANÁLISE DISCRIMINANTE PARA AS VARIÁVEIS ESTOQUE DE BIOMASSA, PODER CALORÍFICO SUPERIOR, DENSIDADE ENERGÉTICA E TEOR DE CINZAS PARA A COPA E FUSTE DE ÁRVORE DE ACÁCIA NEGRA.

Estoque de biomassa da copa					Estoque de biomassa do fuste				
M. Ward		Grupos Preditos			M. Ward		Grupos Preditos		
G.	N.	1	2	3	G	N	1	2	3
1	167	81,44%	5,39%	13,17%	1	130	90,77%	0,77%	8,46%
2	456	12,94%	87,06%	0,00%	2	455	9,89%	90,11%	0,00%
3	46	21,74%	0,00%	78,26%	3	85	10,59%	0,00%	89,41%
Casos classificados corretamente				85,05%	Casos classificados corretamente				90,15%
Poder calorífico da copa					Poder calorífico do fuste				
M. Ward		Grupos Preditos			M. Ward		Grupos Preditos		
G.	N.	1	2	3	G	N	1	2	3
1	267	81,27%	16,85%	1,87%	1	194	48,97%	27,32%	23,71%
2	265	18,49%	55,47%	26,04%	2	334	29,04%	57,78%	13,17%
3	138	0,00%	23,19%	76,81%	3	142	36,62%	25,35%	38,03%
Casos classificados corretamente				70,15%	Casos classificados corretamente				51,04%
Densidade energética da copa					Densidade energética do fuste				
M. Ward		Grupos Preditos			M. Ward		Grupos Preditos		
G.	N.	1	2	3	G	N	1	2	3
1	180	12,22%	55,00%	32,78%	1	283	74,20%	22,61%	3,18%
2	352	7,67%	82,39%	9,94%	2	250	17,20%	53,20%	29,60%
3	138	10,87%	29,71%	59,42%	3	137	2,92%	26,28%	70,80%
Casos classificados corretamente				58,81%	Casos classificados corretamente				65,67%
Teor de cinzas da copa					Teor de cinzas do fuste				
M. Ward		Grupos Preditos			M. Ward		Grupos Preditos		
G.	N.	1	2	3	G	N	1	2	3
1	209	95,69%	4,31%	0,00%	1	287	87,46%	0,35%	12,20%
2	302	4,30%	95,03%	0,66%	2	263	9,13%	90,87%	0,00%
3	159	0,00%	5,03%	94,97%	3	120	6,67%	0,00%	93,33%
Casos classificados corretamente				95,22%	Casos classificados corretamente				89,85%

FONTE: O autor (2022).

EM QUE: G. é o grupo e N é o número de indivíduos em cada grupo.

De modo geral, as variáveis edáficas não contribuíram para a melhora das funções discriminantes. As variáveis meteorológicas contribuíram apenas para a melhora das funções que discriminam os grupos dos estoques de biomassa. As

variáveis energéticas e dendrométricas foram as que mais contribuíram para as funções discriminantes.

### 3.4 CONCLUSÕES

A densidade básica dos galhos e fuste apresentaram valores semelhantes com tendência de aumento ao longo das idades. Para ambos os componentes essa variável apresenta uma distribuição unimodal, tendendo a deslocar-se para a direita com a idade. A função de densidade de probabilidade Lognormal (3P) foi a que melhor se ajustou a todos os conjuntos de dados.

O poder calorífico superior da copa apresentou maiores valores quando comparado aos obtidos para o fuste. Para a copa, os valores se reduzem com a idade. Para o fuste não há uma tendência definida ao longo das idades. Para ambos os componentes a distribuição Normal aderiu aos dados de poder calorífico superior.

A copa apresenta os valores médios mais elevados de densidade energética quando comparada com os obtidos para o fuste. Para ambos os componentes há uma tendência de aumento dos valores de densidade energética com a idade. A função de densidade de probabilidade Normal ajustou-se a todos os conjuntos de dados dessa variável. Com a idade as curvas tendem a deslocar se para a direita.

Para a variável teor de materiais voláteis, o fuste apresentou os maiores valores médios quando comparado aos resultados obtidos para a copa, ambos aumentando com a idade e tendem a se estabilizar a partir do grupo III. Os teores de materiais voláteis apresentaram normalidade dos dados.

Os maiores valores médios para o teor de carbono fixo foram encontrados na copa. Em ambos os componentes há tendência de redução com a idade. Os teores de carbono fixo apresentam uma distribuição de dados simétrica, em que a função de densidade de probabilidade Normal aderiu aos dados.

A copa é o componente com os maiores teores de cinzas em média. À medida que os povoamentos envelhecem os teores de cinzas tendem a diminuir. A distribuição que melhor se ajustou aos conjuntos de dados foi a Lognormal (3P).

Em relação aos estoques de biomassa, o fuste apresenta um estoque consideravelmente maior que os encontrados para a copa. Os estoques de ambos os componentes tendem a aumentar com a idade, enquanto, isso acontece de forma diferente para cada componente. A copa acumula biomassa com o seu crescimento, novas folhas, galhos, flores e frutos, mas também perde biomassa com a queda desses, enquanto o fuste somente incrementa biomassa à medida que a madeira e casca aumentam. Como os dados foram separados em mais grupos, foi necessária uma função de densidade de probabilidade mais flexível, no caso a de Burr. A forma das distribuições muda ao longo das idades, saindo de uma distribuição simétrica e tornando-se assimétrica positiva e tendendo a uma exponencial negativa.

As variáveis biométricas foram as que mais contribuíram para a discriminação de classes de qualidade quando considerada a variável densidade energética. As variáveis biométricas e meteorológicas discriminam mais o estoque de biomassa. Para as variáveis poder calorífico superior e teor de cinzas as variáveis biométricas e energéticas foram as que mais contribuíram.

## 4 ÍNDICE INTEGRADO PARA QUALIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DE ACÁCIA NEGRA

### 4.1 INTRODUÇÃO

No Brasil o consumo de energia proveniente de fontes derivadas de petróleo é de 33%, de fontes renováveis aproximadamente 48%, sendo dessa 12,6% hidráulica (BRASIL, 2021). Se considerarmos a escassez de chuvas, que compromete boa parte da energia hidráulica, e os recentes aumentos dos preços do petróleo, fica evidente a necessidade de novas fontes energéticas renováveis para suprir essas e futuras demandas por energia.

A energia derivada da biomassa florestal, embora também seja dependente das chuvas, é considerada renovável. De acordo com Couto et al. (2004), o período de recomposição do material lenhoso que varia de 5 a 200 anos, pode ser considerado desprezível em comparação com o do petróleo (100 a 450 milhões de anos). Segundo os mesmos autores, comparada aos combustíveis fósseis, a madeira apresenta um baixo teor de enxofre (0,1 a 0,2%) sendo sua combustão menos nociva à atmosfera.

Entretanto, a biomassa florestal é heterogênea, suas propriedades variam de acordo com a espécie, idades, componentes, entre outras características, o que dificulta avaliar a qualidade energética de biomassas com diferentes características e mesmo compará-las.

Uma ferramenta que pode ser utilizada para essa finalidade é a análise de fatores. Para Zeller e Carmines (1980), a análise de fatores não se refere a uma única técnica estatística, mas a uma variedade de técnicas relacionadas e estruturadas para tornar os dados observados mais facilmente interpretáveis. De acordo com King (2001), na análise de fatores há muitas variáveis observadas cujo objetivo é gerar fatores subjacentes não observados (KING, 2001), denominados variáveis latentes.

Portanto, o objetivo no presente trabalho foi de avaliar e classificar a qualidade energética da biomassa de árvores de acácia negra por meio de fatores gerados na análise de fatores e, também, gerar um índice integrado de qualidade energética.

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1 Seleção e amostragem dos povoamentos

O objeto de estudo foi a biomassa de copa e fuste de árvores de acácia negra cultivadas em povoamentos comerciais no estado do Rio Grande do Sul. Foram amostrados 12 povoamentos da espécie em três regiões denominadas: município de Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini. Em Cristal foram amostrados povoamentos com: 1,75; 2,75; 5,00 e 10,08 anos, em Encruzilhada do Sul com: 1,83; 3,08; 5,75 e 10,75 anos e, em Piratini com: 1,00; 2,33; 5,25 e 9,83 anos.

Os povoamentos amostrados foram classificados em grupos de idade. O grupo I compreende povoamentos com idade até dois anos, grupo II os povoamentos maiores que dois anos até quatro anos, grupo III os indivíduos de povoamentos com idade maiores que quatro anos até seis anos e o grupo IV indivíduos com idade acima de seis anos (Tabela 1).

Em cada povoamento foram tomadas quatro unidades amostrais aleatoriamente, totalizando 48 parcelas circulares com área de 78,54m<sup>2</sup> cada. Ao todo 670 árvores selecionadas no interior das parcelas foram derrubadas e amostras tomadas da copa e fuste. Para a copa a amostra tomada foi de 1.500 g e retirada ao longo do comprimento total da copa nas posições de 0% (base da copa), 25%, 50%, 75% e 95%. Para o fuste foram retirados cinco discos, de aproximadamente 2 cm de espessura, nas posições 0% (nível do solo), 25%, 50%, 75% e 95% em relação à altura total. Dessa forma, foram coletadas ao todo 1340 amostras.

Todos os povoamentos amostrados foram implantados utilizando-se práticas de cultivo mínimo com uma subsolagem a 40 centímetros de profundidade e duas gradagens na linha de plantio. As mudas utilizadas foram produzidas a partir de sementes oriundas das áreas de produção de semente da empresa TANAGRO S.A. Cerca de 75 gramas de adubo organo-mineral 4-12-8 foi fornecido a cada muda. Todos os povoamentos foram implantados com espaçamento de 3 m entre linha e 1,75 entre plantas na linha. As mesmas condições de manejo foram adotadas em todos os povoamentos.

#### 4.2.2 Variáveis mensuradas

As seguintes variáveis: densidade básica, poder calorífico superior, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas foram mensuradas.

Para a determinação da densidade básica procedeu-se de acordo com a norma técnica D2395 (ASTM, 2014). A densidade básica foi calculada conforme [1].

$$\rho b_{ij} = \frac{m_{0ij}}{V_{maxij}} \quad (1)$$

Em que:

$\rho b_{ij}$  é a densidade básica do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).

$m_{0ij}$  é a massa da amostra do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$V_{maxij}$  é o volume da amostra saturada em água, do  $i$ -ésimo componente para a  $j$ -ésima árvore ( $\text{cm}^3$ ).

A determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foi efetuada por meio da análise química de acordo com a norma técnica D1762-84 (ASTM, 2013) adaptada. O teor de materiais voláteis em percentual foi calculado conforme [3].

$$MV_{ij} = \frac{m_{1ij} - m_{2ij}}{m_{1ij} - m_{0ij}} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que:

$MV_{ij}$  é o teor de materiais voláteis do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (%).

$m_{0ij}$  é a massa do cadinho do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{1ij}$  é a massa do cadinho e da amostra do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{2ij}$  é a massa do cadinho e do carbono fixo e cinza do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

O teor de carbono fixo em percentual foi calculado conforme a equação [4].

$$CF_{ij} = \frac{m_{2ij} - m_{3ij}}{m_{1ij} - m_{0ij}} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que:

$CF_{ij}$  é o teor de carbono fixo do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (%).

$m_{0ij}$  é a massa do cadinho do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{1ij}$  é a massa do cadinho e da amostra do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{2ij}$  é a massa do cadinho e do carbono fixo e cinza do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{3ij}$  é a massa do cadinho e da cinza do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

O teor de cinzas em percentual foi calculado conforme a equação [5].

$$CZ_{ij} = \frac{m_{3ij} - m_{0ij}}{m_{1ij} - m_{0ij}} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:

$CZ_{ij}$  é o teor de cinzas do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (%).

$m_{0ij}$  é a massa do cadinho, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{1ij}$  é a massa do cadinho e da amostra, do  $i$ -ésimo componente para a  $j$ -ésima árvore (g).

$m_{3ij}$  é a massa do cadinho e da cinza, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

Para a determinação do poder calorífico superior utilizou-se uma bomba calorimétrica digital modelo C5000 *Cooling System* IKA WORKS com o princípio de funcionamento adiabático, seguindo os procedimentos estabelecidos na norma técnica D5865 (ASTM, 2013) adaptada. Todas as análises foram efetuadas no Laboratório de Energia de Biomassa Florestal da Universidade Federal do Paraná.

#### 4.2.3 Análises estatísticas

Os dados foram analisados para as variáveis biomassa de copa e fuste separadamente, e biomassa total (copa + fuste). Os dados foram submetidos ao teste de esfericidade de Bartlett, para identificar se havia correlações entre as variáveis, e o teste de KMO para verificar a adequabilidade da amostra.

A análise de fatores com objetivo de se obter variáveis latentes (aquelas que são obtidas a partir de outras variáveis medidas) na forma de equações lineares foi efetuada para se ter uma melhor compreensão do relacionamento dessas variáveis. Para a análise de fatores foi considerado o método dos componentes principais com base na matriz de correlações. Os fatores foram rotacionados utilizando método Varimax. Para a execução das análises foi utilizado o software SPSS, para a extração dos fatores possíveis.

Protásio et al. (2011) utilizaram análise de componentes principais para a obtenção de um índice de desempenho energético com base na relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal, e que concluíram que análise foi eficiente.

Para calcular os fatores foram selecionadas as variáveis que apresentaram altas correlações ou pesos, sendo estabelecido o critério de valores maiores que 0,75. No cálculo de cada um dos fatores foram utilizadas as variáveis padronizadas. O cálculo foi efetuado de acordo com a equação [6].

$$F_{mij} = V_{nij} \cdot P_{mni} \quad (6)$$

Em que:

$F_{ij}$  é o  $m$ -ésimo fator, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$V_{nij}$  é o valor padronizado da  $n$ -ésima variável, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$P_{nij}$  é o peso do  $m$ -ésimo fator, para a  $n$ -ésima variável, do  $i$ -ésimo componente.

$m_{3ij}$  é a massa do cadinho e da cinza, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore (g).

O potencial energético médio de árvores (PEMA) para a qualidade energética foi calculado conforme a equação [7].

$$PEMA_{ij} = \frac{F_{1ij} \cdot Var_{F1i} + F_{2ij} \cdot Var_{F2i} + F_{3ij} \cdot Var_{F3i}}{(Var_{F1i} + Var_{F2i} + Var_{F3i})} \quad (7)$$

Em que:

$PEMA_{ij}$  é o potencial energético médios do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$F_{1ij}$  é o fator F1, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$F_{2ij}$  é o fator F2, do  $i$ -ésimo componente para a  $j$ -ésima árvore.

$F_{3ij}$  é o fator F3, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$Var_{F1i}$  é a variância explicada pelo fato 1 do  $i$ -ésimo componente.

$Var_{F2i}$  é a variância explicada pelo fato 2 do  $i$ -ésimo componente.

$Var_{F3i}$  é a variância explicada pelo fato 3 do  $i$ -ésimo componente.

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O teste de esfericidade de Bartlett não foi significativo ao nível de 5% de significância, ou seja, há correlação entre as variáveis, o que juntamente com o teste de adequabilidade de KMO revelou que a análise fatorial realizada para a copa, fuste e total foi apropriada.

A análise de fatores aplicada aos dados de biomassa de copa foi capaz de explicar 85% da variância, gerando dois fatores, F1 e F2 (TABELA 20). As principais variáveis que compõem o fator F1 foram: teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo, teor de cinzas e poder calorífico superior, responsável por explicar 63,9% da variância. Já a densidade básica e o teor de cinzas compõem o fator F2, explicando 21,1% da variância.

TABELA 20 - RESUMO ANÁLISE FATORIAL DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA BIOMASSA DE COPA, FUSTE E TOTAL DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA.

Variáveis	Pesos rotacionados			Pesos rotacionados			Com.	Variâncias Específicas
	F1	F2	F3	F1	F2	F3		
Copa								
DB	-0,042	0,97			0,97		0,943	0,057
MV	-0,981	0,048		-0,981			0,965	0,035
CF	0,933	0,109		0,933			0,883	0,117
CZ	0,748	-0,403					0,721	0,279
PCS	0,851	-0,138		0,851			0,743	0,257
Autovalores	3,197	1,057						
Variância (%)	63,943	21,14						
Variância ac. (%)	63,943	85,083						
Fuste								
DB	-0,048	0,961	-0,014		0,961		0,926	0,074
MV	-0,966	0,196	-0,149	-0,966			0,994	0,006
CF	0,967	-0,075	0,169	0,967			0,968	0,032
CZ	0,592	-0,686	0				0,821	0,179
PCS	0,173	-0,007	0,984			0,984	0,998	0,002
Autovalores	2,78	1,154	0,773					
Variância (%)	55,591	23,075	15,469					
Variância ac. (%)	55,591	78,666	94,136					
Total								
DB	-0,113	0,972	-0,134		0,972		0,967	0,033
MV	-0,919	0,196	-0,340	-0,919			0,967	0,033
CF	0,941	-0,078	0,292	0,941			0,932	0,068
CZ	0,644	-0,531	0,422				0,874	0,126
PCS	0,431	-0,196	0,877			0,877	0,724	0,276
Autovalores	3,577	0,886	0,356					
Variância (%)	71,544	17,723	7,123					
Variância ac. (%)	71,544	89,267	96,390					

FONTE: O Autor (2022).

EM QUE: F1, F2 e F3 são os fatores, Com. são as comunalidades, Variância ac. é a variância acumulada, DB é a densidade básica, MV é o teor de materiais voláteis, CF é o teor de carbono fixo, CZ é o teor de cinzas, PCS é o poder calorífico superior.

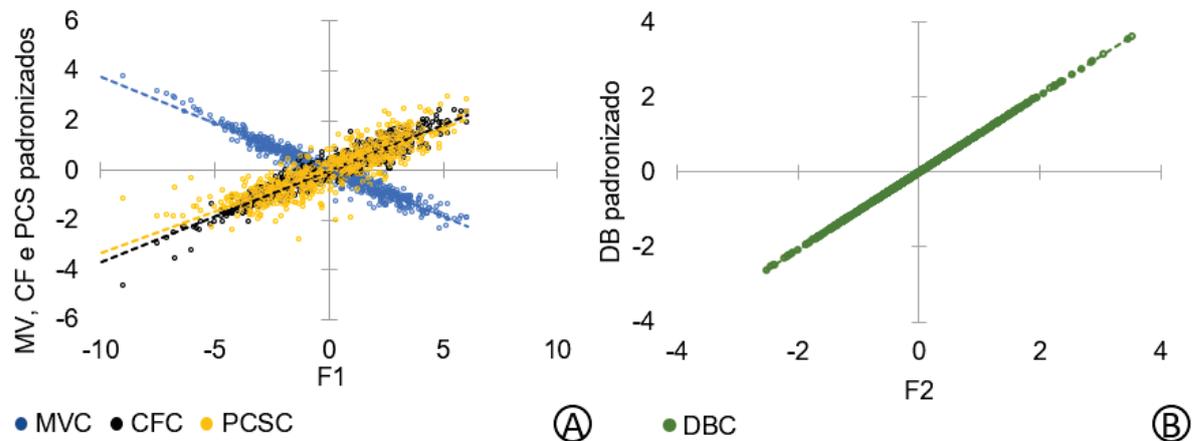
O poder calorífico superior e o teor de carbono fixo apresentam alta correlação positiva com o fator F1, acima de 0,85, enquanto o teor de materiais voláteis apresentou alta correlação negativa. A densidade básica apresentou alta correlação com o fator F2 (TABELA 20).

O teor de cinzas apresentou uma correlação positiva de 0,75 com F1 e negativa de 0,4 com F2. De acordo com Eloy (2015) as folhas de árvores de acácia negra apresentam as maiores médias de poder calorífico superior e teores de cinzas, quando comparado com os resultados obtidos para os demais componentes de biomassa. Como é desejável um menor teor de cinzas para uma melhor qualidade energética da biomassa, optou-se por manter somente as variáveis com correlações superiores a 0,75. Assim, poder calorífico superior, teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis compõem o fator F1 e a densidade básica o fator F2 (FIGURA 21A).

O fator F1 reúne características como a quantidade de energia por unidade de biomassa, expressa pelo poder calorífico superior, e a forma como a biomassa degrada dentro de um aparelho de combustão, expressa pelos teores de materiais voláteis e carbono fixo. O fator F2 apresenta alta correlação positiva com a variável densidade básica, o que faz com que esse fator represente a quantidade de massa por unidade. (FIGURA 21B). De acordo com Bersch et al. (2018) as variáveis densidade básica, poder calorífico e teor de carbono fixo estão entre as características mais indicadas para o uso da madeira na geração de energia.

Em se tratando de biomassa para energia, Protásio et al. (2011) destacam o poder calorífico como uma das propriedades energéticas mais importantes. Para Pereira et al. (2000) também é preferível um maior teor de carbono fixo, uma vez que aumenta o tempo de residência do combustível dentro do aparelho de queima. Para Goulart et al. (2003) a quantidade de energia produzida está intimamente relacionada à massa da madeira. Assim, quanto maior forem essas variáveis melhor será a biomassa para energia.

FIGURA 21 - RELAÇÃO ENTRE OS FATORES EXTRAÍDOS E AS VARIÁVEIS ENERGÉTICAS PARA A BIOMASSA DA COPA DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA.



FONTES: O Autor (2022).

EM QUE: F1 e F2 são os fatores, DB é a densidade básica, MV é o teor de materiais voláteis, CF é o teor de carbono fixo, e PCS é o poder calorífico superior.

Para Chaves et al. (2013) um maior teor de materiais voláteis diminui o tempo em que o combustível permanece dentro do aparelho de combustão, podendo contribuir para uma baixa eficiência energética. Ao contrário das demais variáveis, deseja-se um menor teor de materiais voláteis na biomassa para energia.

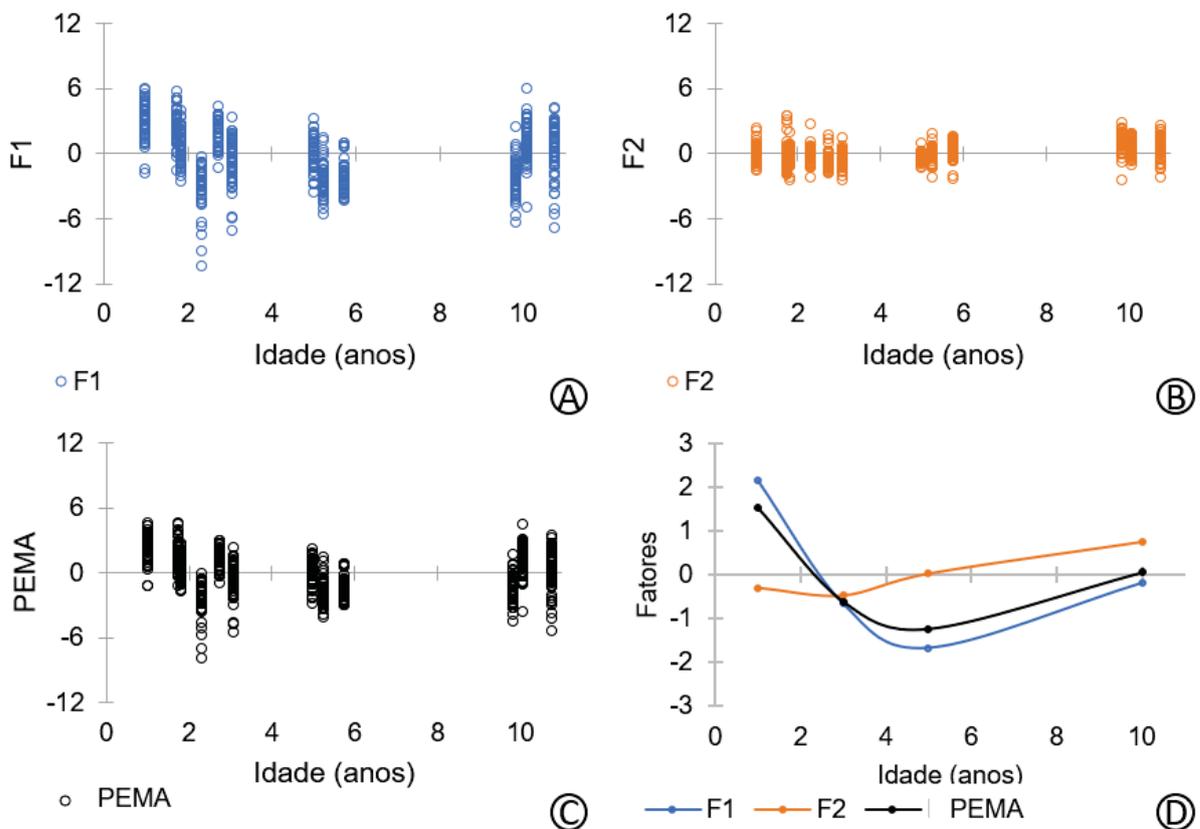
Desse modo, ao avaliar a qualidade da biomassa para uso na produção de energia, deve-se priorizar as árvores com os maiores valores dos fatores F1 e F2. Esses indivíduos serão, também, os que apresentam os maiores valores de poder calorífico, teores de carbono fixo, densidade básica e menores teores de materiais voláteis (FIGURA 21A E 21B).

O fator F1 para a biomassa de copa tende a diminuir a partir de dois anos, influenciado pela redução de folhas e aumento de galhos na biomassa de copa, que altera o poder calorífico superior e principalmente as proporções de materiais voláteis e carbono fixo (FIGURA 22A). Isto pode ser explicado com base no trabalho de Eloy (2015), no qual o autor constatou que as folhas de acácia-negra compõem até 39,7% da biomassa total de povoamentos com um ano de idade.

Essa redução ocorre entre dois e cinco anos, período em que há forte competição entre a copa dos indivíduos. A partir dos cinco anos o fator F1 tende a aumentar novamente. Isso está relacionado ao aumento de mortalidade de indivíduos, o que propicia uma abertura de espaço no dossel da floresta e, conseqüentemente, crescimento da copa das árvores remanescentes em que há incremento de folhas.

O fator F2 da biomassa de copa tende a crescer com a idade, seguindo a mesma tendência da variável densidade básica (FIGURA 22B). O potencial energético médio da árvore pondera os pesos dos fatores F1 e F2 pelo percentual da variância que cada um consegue explicar e, dessa maneira, o fator F1 é responsável pelo comportamento semelhante com o PEMA ao longo das idades (FIGURA 22D).

FIGURA 22 - COMPORTAMENTO DOS FATORES DA BIOMASSA DE COPA AO LONGO DAS IDADES DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA.



FONTE: O Autor (2022)

EM QUE: F1 e F2 são os fatores, PEMA é o potencial energético médio por árvore para a qualidade energética da biomassa de acácia negra.

A escala dos fatores F1 e F2 e do índice PEMA é dada em desvios padrões, o que demonstra que a biomassa da copa de acácia negra tem uma alta variabilidade quando se trata de qualidade energética. O fator F1 apresenta uma variabilidade maior que F2, e como F1 responde por 63,9% da variância total, isso explica a grande parte da variabilidade do PEMA.

Do ponto de vista energético é desejável que a biomassa possua os maiores valores de PEMA e uma baixa variabilidade. Quanto maior forem F1 e F2,

consequentemente maior teor de carbono fixo, poder calorífico superior e densidade básica, e menor variabilidade, melhor será o índice.

Para a biomassa do fuste foram gerados três fatores, F1, F2 e F3, capazes de explicar 94% da variância (TABELA 20). As variáveis teor de materiais voláteis e carbono fixo foram responsáveis por 55,6% da variância correspondente ao fator F1. A densidade básica por 23% correspondente ao fator F2 e o poder calorífico por 15,4% correspondente ao fator F3. O teor de cinzas integrou os fatores F1 e F2, entretanto a correlação com ambos os fatores ficou abaixo de 0,75 e, dessa forma, essa variável não foi utilizada.

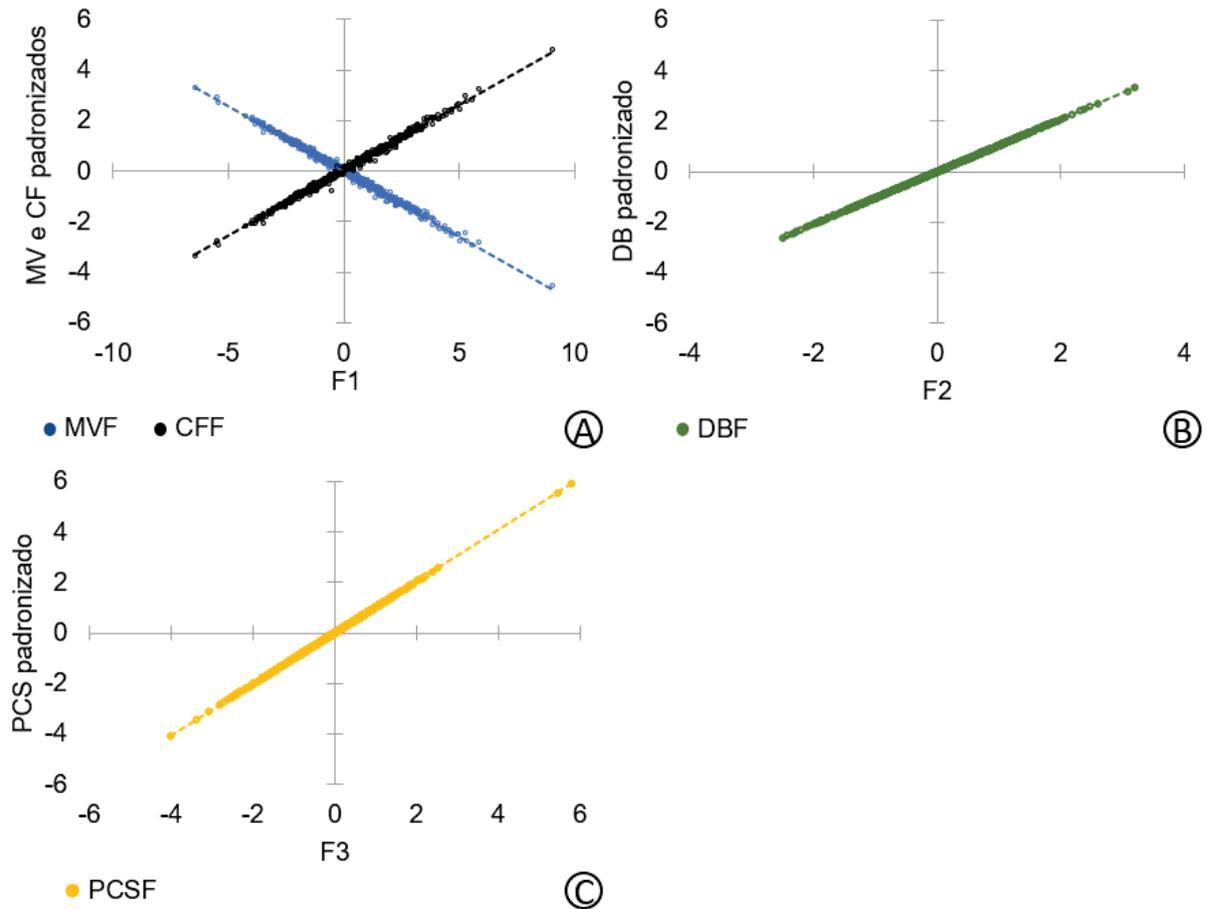
Assim como constatado para a biomassa de copa, o teor de materiais voláteis do fuste também apresentou alta correlação negativa com o fator F1, enquanto o teor de carbono fixo alta correlação positiva. Brand (2010) constatou que os teores de materiais voláteis e carbono fixo são inversamente proporcionais. A densidade básica apresenta alta correlação positiva com o fator F2 e o poder calorífico alta correlação positiva com o fator F3 (TABELA 20).

À medida que as variáveis: teores de carbono fixo, poder calorífico superior e densidade básica aumentam também há aumento dos fatores F1, F2 e F3, o que indica uma biomassa de fuste de melhor qualidade para a produção de energia (FIGURA 23A, 23B e 23C).

Assim como constatado para a biomassa de copa, para a biomassa de fuste o fator F1 decresce a partir de dois anos até o quinto ano (FIGURA 24A). Isto está relacionado ao aumento dos teores de materiais voláteis e redução dos teores carbono fixo com a idade. De acordo com Castro (2011), Soares et al. (2014) e Vargas-Moreno et al. (2012) os materiais voláteis são oriundos da degradação térmica das hemiceluloses e extrativos. Neves et al. (2013) constataram que há uma tendência de aumento dos extrativos com a idade. Logo, o aumento dos materiais voláteis reduz o fator F1.

A densidade básica do fuste tende a aumentar com a idade, o mesmo ocorrendo com o fator F2 (FIGURA 24B). Nos trabalhos de Sanquetta et al. (2013), Eloy (2015) e Delucis et al. (2015) também foi observada a tendência de aumento da densidade básica com a idade para árvores da mesma espécie.

FIGURA 23 - RELAÇÃO ENTRE OS FATORES E AS VARIÁVEIS ENERGÉTICAS PARA A BIOMASSA DE FUSTE DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA.



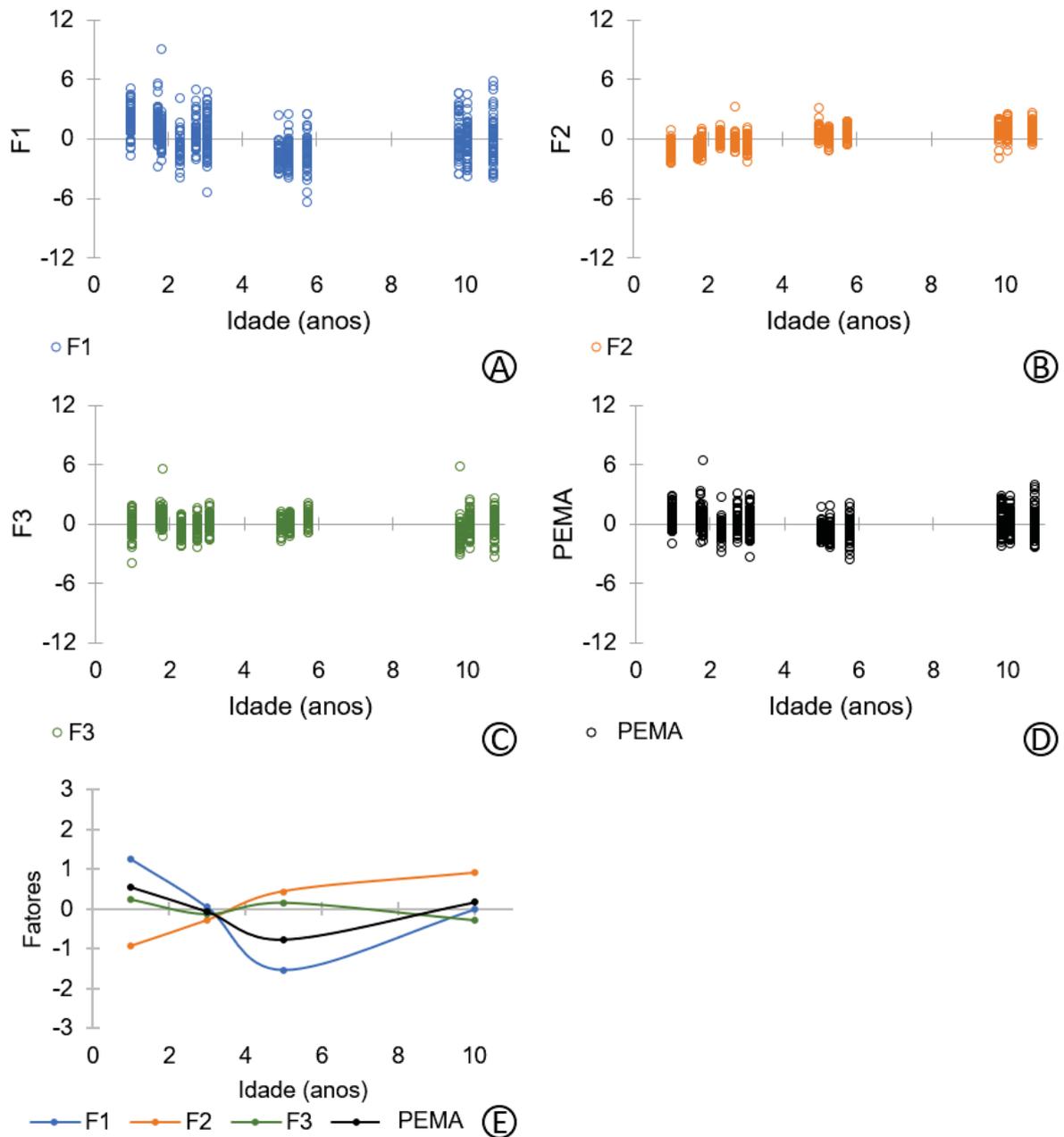
FONTE: O Autor (2022).

EM QUE: F1, F2 e F3 são os fatores, DB é a densidade básica, MV é o teor de materiais voláteis, CF é o teor de carbono fixo, e PCS é o poder calorífico superior.

O poder calorífico superior do fuste não apresenta tendência de aumento com a idade, logo, o fator F3 apresenta comportamento semelhante (FIGURA 24C). Santana (2008), estudando espécies do gênero *Eucalyptus*, também relatou que o PCS foi pouco influenciado pela idade, não sendo possível constatar tendência definida.

Assim como constatado para a biomassa de copa, o PEMA do fuste apresenta comportamento semelhante ao obtido para o fator F1 para a biomassa do fuste, uma vez que esse é responsável por 55,6% da variação total (FIGURA 24D). Ao longo das idades os fatores F2 e F3 contribuem para reduzir as diferenças do PEMA quando comparado com os resultados obtidos para o fator F1 (FIGURA 24E).

FIGURA 24 - COMPORTAMENTO DOS FATORES DA BIOMASSA DE FUSTE AO LONGO DAS IDADES DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA.



FONTE: O Autor (2022).

EM QUE: F1, F2 e F3 são os fatores, PEMA é o potencial energético médio por árvore para a qualidade energética da biomassa de acácia negra.

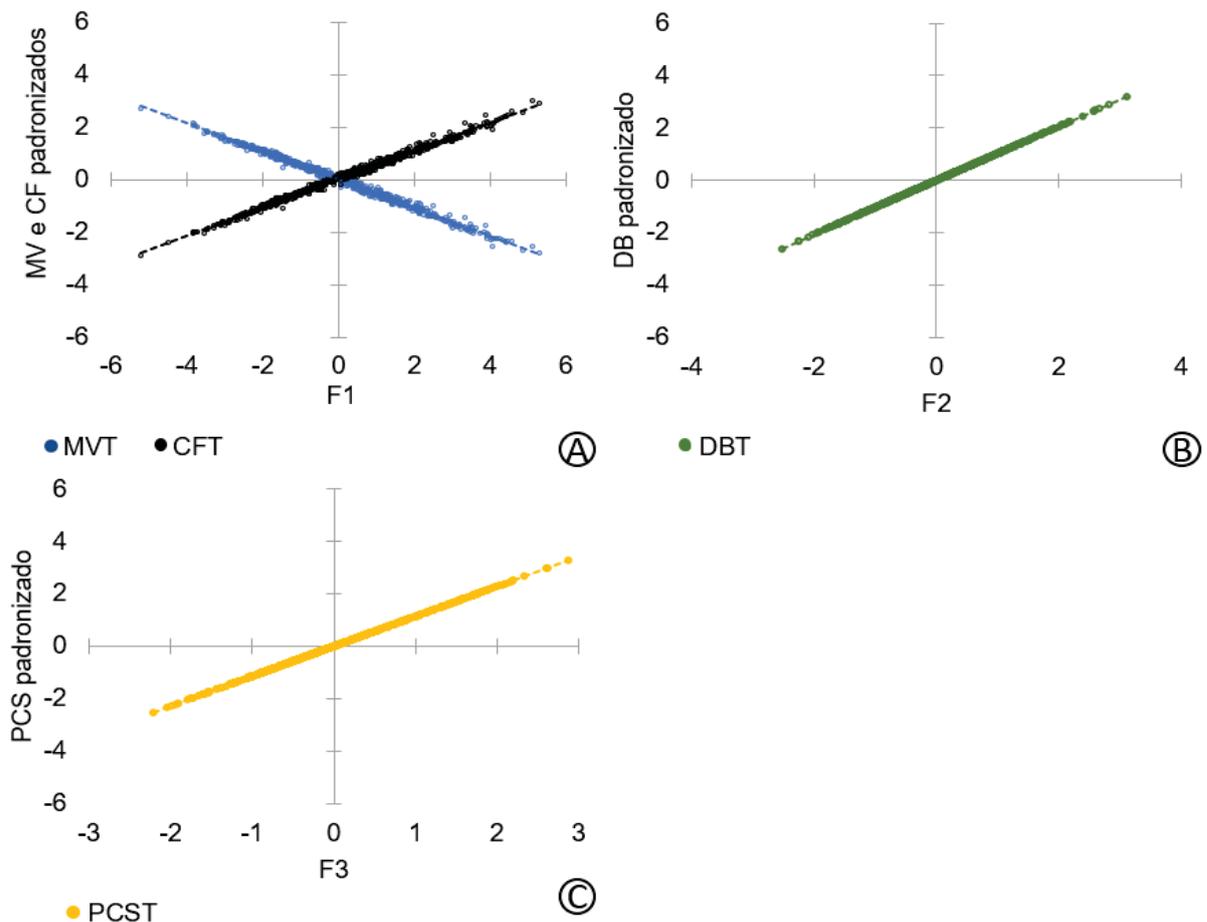
Para a biomassa total foram gerados três fatores, F1, F2 e F3, que explicam 96% da variância total. As variáveis teor de materiais voláteis e carbono fixo integram o fator F1, explicando 71,5% da variância. O fator F2 foi composto pela densidade básica, que explica 17,7% da variação, e o fator F3 pelo poder calorífico superior, que contribuiu para explicar 7% da variância (TABELA 20). O teor de cinzas ficou dividido

entre os três fatores, porém, a correlação com os fatores foi baixa, não sendo utilizada em nenhum deles.

Da mesma forma como foi observado para o fuste, para a biomassa total o teor de materiais voláteis apresenta alta correlação negativa com o fator F1, e o teor de carbono fixo alta correlação positiva. Com o fator F2 é a densidade básica que apresenta alta correlação positiva e com o fator F3 é o poder calorífico que apresenta alta correlação positiva (TABELA 20).

À medida que as variáveis com correlação positiva aumentam, também aumentam os valores dos fatores F1, F2 e F3. Do ponto de vista de produção de energia é desejável que essas variáveis sejam as maiores possíveis, logo, quanto maior os valores dos fatores, melhor a biomassa para essa finalidade (FIGURA 25A, 25B E 25C).

FIGURA 25 - RELAÇÃO ENTRE OS FATORES E AS VARIÁVEIS ENERGÉTICAS PARA A BIOMASSA TOTAL DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA.

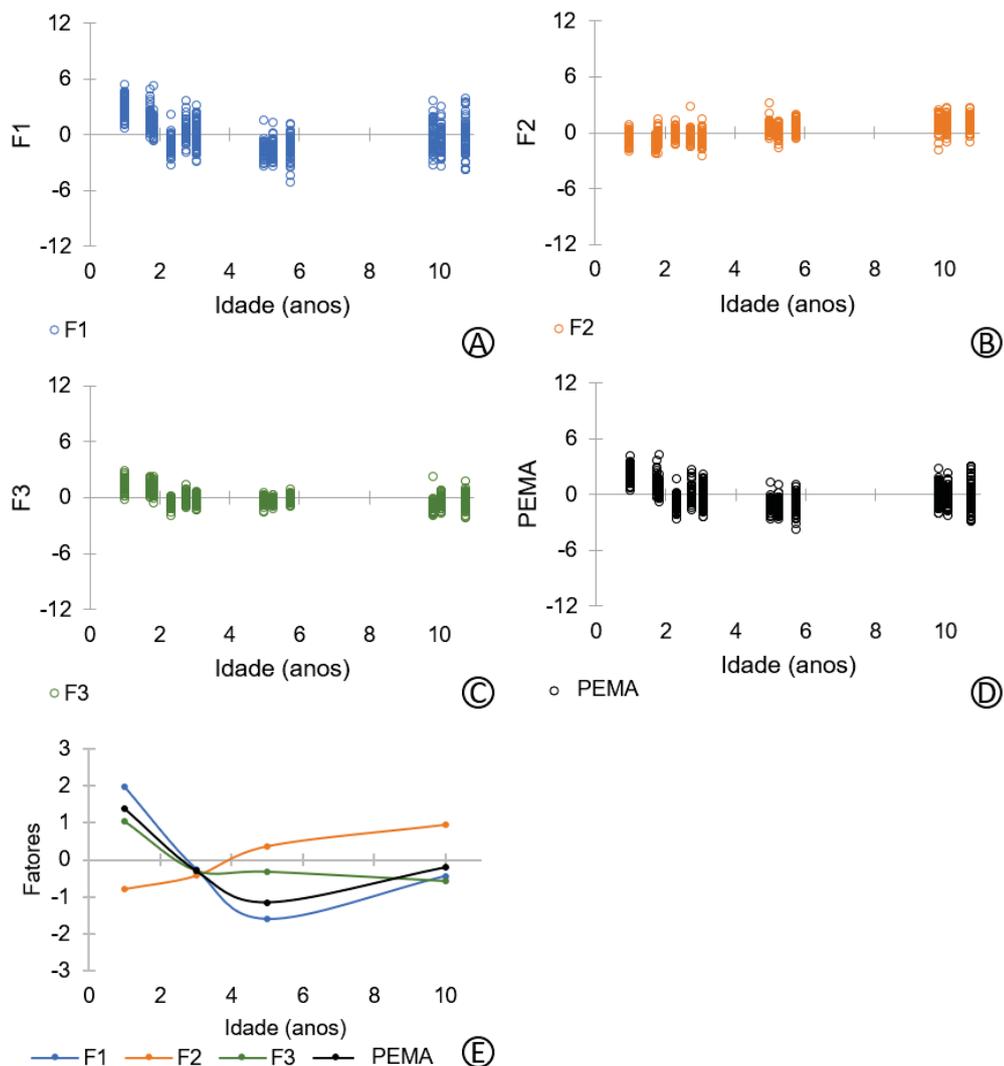


FONTE: O Autor (2022)

EM QUE: F1, F2 e F3 são os fatores, DB é a densidade básica, MV é o teor de materiais voláteis, CF é o teor de carbono fixo, e PCS é o poder calorífico superior.

O comportamento dos fatores F1, F2 e F3 da biomassa total ao longo das idades é muito semelhante ao dos mesmos fatores do fuste (FIGURA 26A, 26B e 26C). Em estudos com a mesma base de dados (COSTA JUNIOR et al. 2018) foi constatado que a partir de um ano o fuste passa a compor a maior parte da biomassa total, chegando a compor 80% na idade madura. Santana et al. (2008) observaram situação semelhante com *Eucalyptus*, entre seis meses e três anos e seis meses de idade, quando houve uma forte queda na percentagem de copa. Logo, as variáveis da copa têm maior peso na idade jovem diminuindo à medida que a idade aumenta, passando as variáveis do fuste a contribuírem com maior peso.

FIGURA 26 - COMPORTAMENTO DOS FATORES DA BIOMASSA TOTAL AO LONGO DAS IDADES DOS POVOAMENTOS DE ACÁCIA NEGRA.



FONTE: O Autor (2022)

EM QUE: F1, F2 e F3 são os fatores, PEMA é o potencial energético médio por árvore para a qualidade energética da biomassa de acácia negra.

A mesma situação relatada se aplica ao PEMA, onde até 2 anos há maior influência das variáveis da copa, diminuindo com a idade (FIGURA 26D). Quando comparadas as médias dos fatores e a média do PEMA por idade, essas relações ficam mais evidentes, visto que na copa as curvas dos fatores e do PEMA são mais acentuadas quando comparadas com as obtidas para o fuste (FIGURA 26E).

Os fatores F1 para a biomassa de copa, fuste e total de árvores de acácia negra podem ser representados de acordo com as equações (8, 9 e 10). Os fatores F2 de acordo com as equações (11, 12 e 13). Os fatores F3 de acordo com as equações (14 e 15). Os índices integrados de qualidade energética de acordo com as equações (16, 17 e 18).

$$F1_{copa} = -0,981 \cdot MV_{pad} + 0,933 \cdot CF_{pad} + 0,851 PCS_{pad} \quad (8)$$

$$F1_{fuste} = -0,966 \cdot MV_{pad} + 0,967 \cdot CF_{pad} \quad (9)$$

$$F1_{total} = -0,919 \cdot MV_{pad} + 0,941 \cdot CF_{pad} \quad (10)$$

$$F2_{copa} = 0,97 \cdot DB_{pad} \quad (11)$$

$$F2_{fuste} = 0,961 \cdot DB_{pad} \quad (12)$$

$$F2_{total} = 0,972 \cdot DB_{pad} \quad (13)$$

$$F3_{fuste} = 0,984 \cdot PCS_{pad} \quad (14)$$

$$F3_{total} = 0,877 \cdot PCS_{pad} \quad (15)$$

$$PEMA_{copa} = \frac{63,943 \cdot F1_{copa} + 21,14 \cdot F2_{copa}}{85,083} \quad (16)$$

$$PEMA_{fuste} = \frac{55,591 \cdot F1_{fuste} + 23,075 \cdot F2_{fuste} + 15,469 \cdot F3_{fuste}}{94,136} \quad (17)$$

$$PEMA_{total} = \frac{71,544.F1_{total} + 17,723.F2_{total} + 7,123.F3_{total}}{96,390} \quad (18)$$

Em que:  $F1$ ,  $F2$  e  $F3$  são os fatores para cada componente,  $PEMA$  é o potencial energético médio por árvore para a qualidade energética de cada componente,  $MV_{pad}$  é o teor de materiais voláteis padronizados em (%),  $CF_{pad}$  é o teor de carbono fixo padronizado em (%),  $PCS_{pad}$  é o poder calorífico superior padronizado em (kcal.kg<sup>-1</sup>) e  $DB_{pad}$  é a densidade básica padronizada em (g.cm<sup>-3</sup>).

De modo geral, quanto maior for os fatores  $F1$ ,  $F2$ ,  $F3$  e  $PEMA$  melhor será a biomassa para uso em geração de energia. Para estabelecer uma divisão entre a biomassa que possui características mais desejáveis adotou-se a seguinte classificação: biomassa com fatores  $F1$ ,  $F2$ ,  $F3$  e  $PEMA$  maiores que zero podem ser consideradas de qualidade alta, já biomassa com fatores  $F1$ ,  $F2$ ,  $F3$  e  $PEMA$  menores que zero podem ser consideradas com qualidade média.

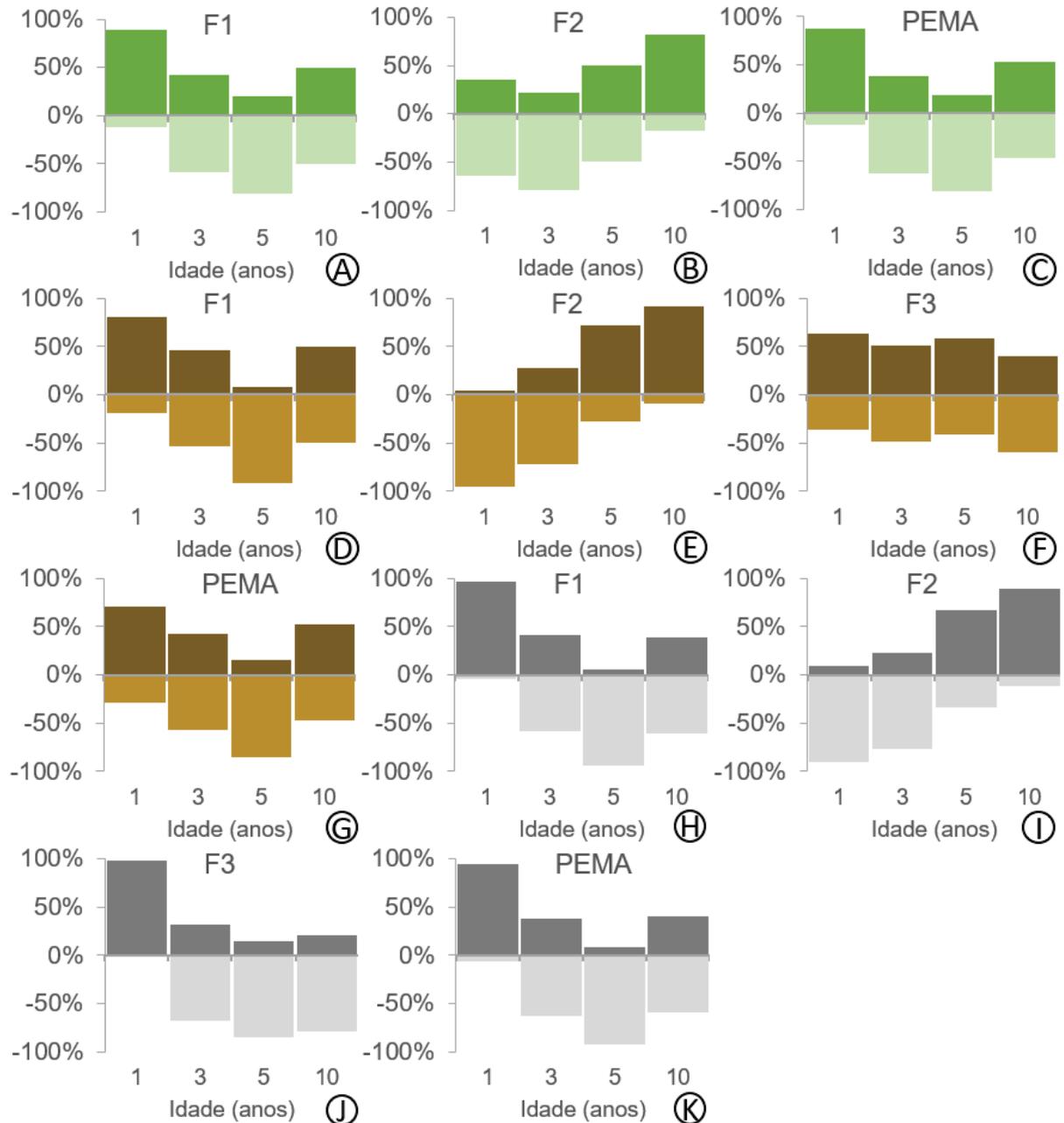
Ao avaliar a qualidade energética da biomassa de copa dos povoamentos de acácia negra, o fator  $F1$  revela que no grupo de idade I aproximadamente 90% das árvores possuem qualidade alta. Esse percentual diminui com a idade, alcançando 20% no grupo II, e aumenta no grupo IV quando atinge 49% (FIGURA 27A). O fator  $F2$  possui uma tendência de aumento com a idade alcançando 82% de indivíduos com qualidade alta no grupo IV (FIGURA 27B).

Situação semelhante ao  $F1$  ocorre com o  $PEMA$  (FIGURA 27C). Essa redução entre grupo I e III e posterior aumento no grupo IV pode estar relacionada à dinâmica de crescimento da floresta, principalmente à proporção de massa foliar na biomassa de copa. Behling (2014) avaliou o crescimento de povoamentos de acácia negra em diferentes idades, constatando um aumento da área e massa foliar até o terceiro ano, a estabilização no quinto ano e, novamente, um aumento até o sétimo ano. Behling (2014) atribuiu tal diferença às condições do ambiente em que as plantas são cultivadas como atributos químicos do solo, principalmente o teor de fósforo, e elementos meteorológicos, especialmente com a radiação solar acumulada.

Quando considerado o fator  $F1$  para a biomassa do fuste foi constatado que 81% das árvores do grupo I possuem biomassa com qualidade alta, e a medida que a idade aumenta esse percentual se reduz até alcançar 8% no grupo III, e volta a aumentar no grupo IV alcançando 50% (FIGURA 27D). O menor percentual na idade

média avançada coincide com a idade em que há os maiores médios dos teores de materiais voláteis na biomassa de fuste, conforme resultados apresentados por Costa Junior et al. (2021) para a mesma base de dados.

FIGURA 27 - QUALIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DE ÁRVORES DE ACÁCIA NEGRA EM POVOAMENTOS COMERCIAIS AO LONGO DAS IDADES POR COMPONENTE.



FONTE: O Autor (2022).

EM QUE: F1, F2 e F3 são os fatores, PEMA é o Potencial Energético Médio por Árvore da biomassa de acácia negra.

Dentro do fator F2, 5% da biomassa de fuste possui qualidade alta no grupo I, aumentando para 91% no grupo IV (FIGURA 27E), o que pode ser atribuído ao aumento da densidade básica ao longo das idades, uma vez que é essa variável que compõem o fator F2.

Considerando o fator F3, no mínimo 40% da biomassa do fuste pode ser considerada de alta qualidade, não havendo uma tendência definida ao longo das idades (FIGURA 27F). O fator F3 segue as mesmas tendências do poder calorífico superior do fuste.

Quando considerado o PEMA da biomassa do fuste, no grupo I cerca de 71% dos indivíduos possuem qualidade alta, e esse percentual diminui no grupo III quando alcança 15% (FIGURA 27G), percentuais esses próximos aos encontrados para o fator F1, uma vez que representa 55% da composição do PEMA.

Quando avaliado o povoamento de acácia negra como um todo pode ser afirmado que os percentuais de biomassa classificados como de qualidade alta, quando considerado o fator F1, do grupo I são de 96%, diminuindo até 6% no grupo III (FIGURA 27H), valores próximos aos observados para a biomassa de fuste. No entanto, a copa contribui para elevar os valores, principalmente no grupo I.

Considerando o fator F2, no grupo I 9% das árvores estão em classe de qualidade alta, aumentando até grupo IV quando alcança 89% (FIGURA 27I), tendência muito semelhante a verificada para a biomassa de fuste.

Quanto ao fator F3 no grupo I praticamente 98% da biomassa está em classes de qualidade alta e nos demais grupos esse percentual fica entre 15% e 32% (FIGURA 27J). Essa grande diferença entre o grupo I e os demais, está relacionada à maior proporção de copa e, conseqüentemente, de folhas, o que aumenta os valores de poder calorífico superior que compõem o fator F3.

Quando considerado todos os fatores juntos, como é o caso do PEMA, 94% das árvores do grupo I estão em classe de qualidade alta, reduzindo a 8% no grupo III. Tendência semelhante ao observado para a biomassa de fuste. Contudo, a inclusão da copa contribui para que haja uma maior variabilidade entre as idades.

De modo geral, para os componentes copa e fuste e total, o fator F1 explicou mais de 50% da variação total das propriedades energéticas, o fator F2 mais de 17%

e o fator F3 mais de 7%. Logo, ao avaliar a qualidade energética de um povoamento de acácia negra as variáveis com os maiores pesos no fator F1, teor de materiais voláteis e carbono fixo, são as mais importantes seguidas de densidade básica e poder calorífico superior respectivamente.

O teor de cinzas da biomassa é uma variável importante do ponto de vista energético, no entanto, ela não contribuiu para uma melhoria do PEMA. A biomassa classificada com os maiores valores de PEMA é justamente a que possui os maiores teores de cinzas. Nesse caso, o teor de cinzas não contribuiu de forma positiva para melhorar o PEMA.

Os fatores e o PEMA foram elaborados para os povoamentos de acácia negra no estado do Rio Grande do Sul, portanto podem ser empregados para avaliar a qualidade energética da biomassa de povoamentos da espécie nessa região. Para avaliar a qualidade energética da biomassa de outras espécies será necessário reprocessar os dados, uma vez que as médias e variâncias das propriedades energéticas serão alteradas, assim como as correlações entre os fatores e as variáveis energéticas.

#### 4.4 CONCLUSÕES

A análise fatorial foi eficiente na obtenção de fatores capazes de explicar a qualidade da biomassa para fins energéticos.

As variáveis teor de materiais voláteis e carbono fixo conseguem explicar mais de 55% da variação das propriedades energéticas da biomassa de árvores de acácia negra.

O Potencial energético médio por árvore é adequado para avaliar a qualidade energética da biomassa de povoamentos de acácia negra, uma vez que explica no mínimo 85% da variação das propriedades energéticas.

O maior percentual de árvores com biomassa classificada como de qualidade alta encontra-se no grupo I, e o menor no grupo III.

## **5 ESTRUTURA AMOSTRAL PARA AVALIAR O POTENCIAL ENERGÉTICO MÉDIO POR ÁRVORE-PEMA**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Aliado ao crescimento econômico está o aumento do consumo energético, preferencialmente de fontes renováveis. Nesse cenário a participação da biomassa na matriz energética do Brasil deverá variar entre 7% e 27% até 2050 (Brasil, 2018). Parte dessa biomassa deverá ser de origem florestal, oriunda de plantios florestais, o que demandará por informações sobre a qualidade da biomassa destas florestas.

Ao decidir por uma biomassa para ser utilizada como combustível, diferentes características devem ser avaliadas para garantir seu melhor aproveitamento e a eficiência do processo de conversão. Atualmente, a qualidade da biomassa para fins energéticos é avaliada considerando variáveis como: teor de umidade, poder calorífico, densidade básica, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo, teor de cinzas, entre outras. Essas variáveis podem ser combinadas resultando em variáveis como densidade energética, e quando combinadas com o estoque de biomassa revelam o estoque energético e estoque de cinzas, por exemplo.

Na avaliação da qualidade da biomassa para fins energéticos é preferível a obtenção de altos valores de poder calorífico, densidade básica, teores de carbono fixo e de biomassa, e baixos valores de teores de umidade, materiais voláteis e cinza. A avaliação separada de cada uma dessas variáveis dificulta a classificação da qualidade da biomassa, requerendo, assim, uma avaliação simultânea. Para atingir este objetivo, o potencial energético médio por árvore (PEMA) foi utilizado como uma variável capaz de representar a qualidade energética da biomassa de árvores.

As variáveis mencionadas não são homogêneas dentro dos povoamentos florestais, o que dificulta a avaliação da qualidade energética da floresta. As propriedades energéticas das árvores variam entre locais de cultivo, entre idades, entre os componentes da própria planta (copa e fuste). Dessa maneira, para conhecer

a qualidade energética de uma floresta plantada, é necessário realizar um inventário qualitativo dos povoamentos florestais.

Mensurar variáveis energéticas considerando uma floresta em diferentes locais, múltiplas idades e diferentes componentes demanda tempo e recursos financeiros. Para utilizar da melhor forma o tempo e os recursos destinados à avaliação da qualidade energética são imprescindíveis o emprego de técnicas que minimizem o uso desses recursos, mas que também garantam a representação da variabilidade existente nos povoamentos florestais. Nesse contexto se faz necessário o emprego de uma estrutura amostral adequada.

Desse modo, foi proposta e testada uma estrutura amostral para avaliar o PEMA de florestas plantadas em múltiplas idades, locais de cultivo e em diferentes componentes da biomassa de árvores de acácia negra.

## 5.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.2.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo da presente pesquisa foram árvores de acácia negra cultivadas em povoamentos comerciais no estado do Rio Grande do Sul. As áreas cultivadas com a espécie foram divididas em três regiões denominadas: Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini (FIGURA 1). O clima, tipo de relevo e solo dessas regiões estão apresentados na pesquisa de Mochiutti (2007).

Foram selecionados 12 povoamentos comerciais, sendo 4 em cada região e cada um em uma idade diferente. Em Cristal foram amostrados povoamentos com: 1,75; 2,75; 5,00 e 10,08 anos. Em Encruzilhada do Sul com: 1,83; 3,08; 5,75 e 10,75 anos e, em Piratini com: 1,00; 2,33; 5,25 e 9,83 anos. Os povoamentos distribuídos em diferentes idades foram separados em grupos de idades nominadas respectivamente de I, II, III e IV. No grupo I estão os povoamentos com idade até dois anos, grupo II entre dois e quatro anos, grupo III entre quatro e seis anos e no grupo IV os povoamentos acima de seis anos.

Em cada povoamento foram tomadas quatro unidades amostrais aleatoriamente, totalizando 48 unidades amostrais, composta por uma parcela circular

com área de 78,54m<sup>2</sup>. Todas as árvores circunscritas ao perímetro da parcela foram amostradas. Ao todo 670 árvores vivas foram derrubadas, mensuradas e amostradas. Informações como coordenadas centrais, altitude, número de árvores mortas e altura dominante dos povoamentos amostrados estão apresentadas na Tabela 1.

Todos os povoamentos amostrados foram implantados utilizando-se práticas de cultivo mínimo com uma subsolagem a 40 centímetros de profundidade e duas gradagens na linha de plantio. As mudas utilizadas foram produzidas a partir de sementes oriundas das áreas de produção de semente da empresa TANAGRO S.A. Cerca de 75 gramas de adubo foi fornecido para cada muda. Todos os povoamentos foram implantados com espaçamento de 3 m entre linha e 1,75 entre plantas na linha. As mesmas condições de manejo foram adotadas em todos os povoamentos.

### 5.2.2 Variáveis mensuradas

As árvores amostradas foram mensuradas quanto a circunferência à altura de 1,3 metros (CAP) e a altura total (h). A biomassa também foi avaliada e, para isso, as árvores foram divididas em dois componentes, sendo (madeira do fuste e casca) e copa (galhos vivos e mortos, folhas, flores e sementes), conforme as concepções definidas em Picard et al. (2012).

Para cada árvore foram tomadas duas amostras compostas, sendo uma da copa e outra do fuste. Cada amostra com aproximadamente 1.500 g foi tomada ao longo do comprimento total de cada componente, da copa nas posições de 0% (base da copa), 25%, 50%, 75% e 95%. Para o fuste foram retirados cinco discos de aproximadamente 2 cm de espessura nas posições: 0% (nível do solo), 25%, 50%, 75% e 95% em relação à altura total. Dessa forma, foram coletadas ao todo 1.340 amostras.

Para a determinação da densidade básica procedeu-se de acordo com a norma técnica D2395 (ASTM, 2014). Os corpos de prova, utilizados para a determinação desta variável, foram oriundos da amostragem realizada nas posições descritas anteriormente. A determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foi realizada por meio da análise química de acordo com a norma técnica D1762-84 (ASTM, 2013) adaptada.

Para a determinação do poder calorífico superior utilizou-se uma bomba calorimétrica digital modelo C5000 *Cooling System* IKA WORKS com o princípio de funcionamento adiabático, seguindo os procedimentos estabelecidos na norma técnica D5865 (ASTM, 2013) adaptada. Todas as análises foram efetuadas no Laboratório de Energia de Biomassa Florestal da Universidade Federal do Paraná.

### 5.2.3 Potencial energético médio por árvore – PEMA

Tendo em vista a dificuldade para avaliar a qualidade da biomassa por meio das variáveis descritas anteriormente, foi utilizado o potencial energético médio por árvore (PEMA), que considera as variáveis simultaneamente para avaliar a qualidade energética da biomassa de árvores.

Dessa forma, por meio do PEMA avaliou-se a qualidade da biomassa total (copa + fuste). Entretanto, sabe-se que as propriedades energéticas dos componentes da biomassa são diferentes, então optou-se também por analisar separadamente para copa e fuste. O PEMA resume as informações contidas nas variáveis energéticas (teor de materiais voláteis, carbono fixo, cinzas, densidade básica e poder calorífico superior) para uma melhor compreensão do relacionamento das variáveis, utilizando a análise de fatores.

Para calcular os fatores de cada árvore foram selecionadas as variáveis que apresentassem altas correlações ou pesos, sendo estabelecido o critério de valores maiores que 0,75. No cálculo de cada um dos fatores foram utilizadas as variáveis padronizadas. O cálculo foi realizado de acordo com a Equação 1. Os fatores foram extraídos utilizando-se a técnica de componentes principais com rotação varimax.

$$F_{mij} = V_{nij} \cdot P_{mni} \quad (1)$$

Em que:

$F_{mij}$  é o  $m$ -ésimo fator, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$V_{nij}$  é o valor padronizado da  $n$ -ésima variável, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$P_{mni}$  é o peso do  $m$ -ésimo fator, para a  $n$ -ésima variável, do  $i$ -ésimo componente.

O PEMA foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$PEMA_{ij} = \frac{F_{1ij} \cdot Var_{F1i} + F_{2ij} \cdot Var_{F2i} + F_{3ij} \cdot Var_{F3i}}{(Var_{F1i} + Var_{F2i} + Var_{F3i})} \quad (2)$$

Em que:

$PEMA_{ij}$  é o potencial energético médio por árvore do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$F_{1ij}$  é o fator F1, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$F_{2ij}$  é o fator F2, do  $i$ -ésimo componente para a  $j$ -ésima árvore.

$F_{3ij}$  é o fator F3, do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$Var_{F1i}$  é a variância explicada pelo fator 1 do  $i$ -ésimo componente.

$Var_{F2i}$  é a variância explicada pelo fator 2 do  $i$ -ésimo componente.

$Var_{F3i}$  é a variância explicada pelo fator 3 do  $i$ -ésimo componente.

O PEMA para a copa foi composto por 2 fatores com capacidade de explicar 85% da variância. Já o PEMA para o fuste e para o total foram necessários 3 fatores para explicar 94% e 96% da variância, respectivamente. Como o PEMA assume números negativos e positivos optou-se por normalizar os dados.

Dessa forma, os valores do PEMA encontram-se entre 0 e 1, quanto mais próximo de 0 pior a qualidade da biomassa para fins energéticos, e quanto mais próximo de 1 melhor a qualidade. A normalização dos dados foi realizada de acordo com a Equação 3.

$$PEMA_{ijn} = \frac{(PEMA_{ij} - PEMA_{mínimo})}{(PEMA_{máximo} - PEMA_{mínimo})} \quad (3)$$

Em que:

$PEMA_{ijn}$  é o potencial energético médio por árvore do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore normalizado.

$PEMA_{ij}$  é o potencial energético médio por árvore do  $i$ -ésimo componente, para a  $j$ -ésima árvore.

$PEMA_{mínimo}$  é o potencial energético médio por árvore mínimo.

$PEMA_{máximo}$  é o potencial energético médio por árvore máximo.

#### 5.2.4 Análise da estrutura de amostragem

O PEMA é resultante da interação simultânea entre as variáveis energéticas como densidade básica, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e poder calorífico superior. Essas variáveis são consideradas aleatórias contínuas uma vez que podem assumir qualquer valor real dentro de determinado domínio. Dessa forma,

o PEMA também se caracteriza como uma variável aleatória contínua, sendo utilizada para avaliar a qualidade da biomassa dos povoamentos de acacia negra para fins energéticos.

Para a mesma base de dados, Costa Junior et al. (2021) identificou um maior efeito da idade dos povoamentos sobre as variáveis energéticas quando comparado ao efeito dos locais de cultivo. Assim, foi proposta a estratificação da população em um primeiro nível por localidade e em segundo nível por idade. Para avaliar a estratificação proposta foram calculados as estatísticas relevantes para um inventário florestal como: média, variância, desvio padrão, variancia da média, intervalo de confiança para a média e erro de amostragem relativo e absoluto, conforme apresentado na sequência.

#### 5.2.4.1 Equações para a média e variância.

Com esta estrutura, têm-se que a população é composta de  $N$  parcelas, as quais se distribuem em  $k$  estratos, cada um com  $N_1, N_2, \dots, N_k$  respectivamente. Estes estratos não se superpõem e juntos eles compõem a população total, Equação 3.

$$N_1 + N_2 + \dots + N_k = N \quad (3)$$

Com os estratos devidamente estabelecidos, uma amostra foi sorteada dentro de cada estrato, ou seja, dentro das áreas de cada povoamento com a mesma idade. Os tamanhos amostrais dentro de cada estrato, definidos como  $n_1, n_2, \dots, n_k$  respectivamente perfazem (Equação 4):

$$n_1 + n_2 + \dots + n_k = n \quad (4)$$

Seja considerada como  $x_{tj}$  ( $j = 1, 2, \dots, N_t$ ;  $t = 1, 2, \dots, k$ ) o valor da variável PEMA da  $j$ -ésima parcela no  $t$ -ésimo estrato. Neste caso, a média da população no  $t$ -ésimo estrato é dada pela Equação 5 e a média da população pela Equação 6.

$$\bar{X}_t = \frac{1}{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} x_{tj} \quad (t = 1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^k N_t \bar{X}_t \quad (6)$$

Em que:  $N$  é o número de parcelas na população;  $k$  é o número de estratos;  $N_t$  é o número potencial de parcelas no  $t$ -ésimo estrato;  $n_t$  é o número de parcelas da amostra dentro do  $t$ -ésimo estrato;  $n = \sum_{t=1}^k n_t$  é o tamanho da amostra na população;  $x_{tj}$  é o valor do PEMA da  $j$ -ésima parcela no  $t$ -ésimo estrato. As formulas para os cálculos das estatísticas da amostragem estão apresentadas nas Equações 7 a 13.

$$\bar{X}_t = \frac{\sum_{j=1}^{N_t} x_{tj}}{N_t} \quad (7)$$

$$\bar{x}_t = \frac{\sum_{j=1}^{n_t} x_{tj}}{n_t} \quad (8)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^k n_t \bar{x}_t}{n} \quad (9)$$

$$S_x^2 = \frac{\sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^{N_t} (x_{tj} - \bar{X})^2}{N - 1} \quad (10)$$

$$s_x^2 = \frac{\sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^{n_t} (x_{tj} - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (11)$$

$$S_{t(x)}^2 = \sum_{j=1}^{N_t} \frac{(x_{tj} - \bar{X}_t)^2}{N_t - 1} \quad (12)$$

$$s_{t(x)}^2 = \sum_{j=1}^{n_t} \frac{(x_{tj} - \bar{x}_t)^2}{n_t - 1} \quad (13)$$

Em que:  $\bar{X}_t$  é a média paramétrica do PEMA no  $t$ -ésimo estrato;  $\bar{x}_t$  é a média da amostragem do PEMA no  $t$ -ésimo estrato;  $\bar{x}$  é a média do PEMA no total da amostra;  $S_x^2$  é a média quadrática na população;  $s_x^2$  é a média quadrática no total da amostragem;  $S_{t(x)}^2$  é a variância paramétrica do PEMA no  $t$ -ésimo estrato e  $s_{t(x)}^2$  é a variância da amostra do PEMA no  $t$ -ésimo estrato.

No presente caso não foi efetuada a amostragem dentro de cada estrato com alocação proporcional às áreas e sim um número constante de unidades amostrais por estrato. Neste caso, as estimativas são obtidas por meio das Equações 14,15 e 16.

$$\hat{X} = \bar{x}_{st} = \frac{\sum_{j=1}^{N_t} N_t \bar{x}_t}{N} \quad (14)$$

$$V_{(\bar{x}_{st})} = \frac{1}{N^2} \sum_{t=1}^k N_t (N_t - n_t) \frac{S_{t(x)}^2}{n_t} \quad (15)$$

$$v_{(\bar{x}_{st})} = \frac{1}{N^2} \sum_{t=1}^k N_t (N_t - n_t) \frac{S_{t(x)}^2}{n_t} \quad (16)$$

Em que:  $\hat{X} = \bar{x}_{st}$  é a estimativa da média estratificada ou média da população;  $V_{(\bar{x}_{st})}$  é a variância da média estratificada em função da variância paramétrica do PEMA no  $t$ -ésimo estrato;  $v_{(\bar{x}_{st})}$  é a variância da média estratificada em função da estimativa da variância do PEMA no  $t$ -ésimo estrato.

Se for aplicado um teste de Bartlett para se avaliar a homogeneidade de variâncias dos estratos, e este teste atestar não significância, então a estimativa da variância total dos estratos é obtida pela variância média dentro dos estratos (Equações 17 e 18):

$$s_{w(x)}^2 = \frac{\sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^{n_t} (x_{tj} - \bar{x}_t)^2}{n - k} \quad (17)$$

$$v_{(\bar{x}_{st})} = \frac{N - n}{N} \frac{s_{w(x)}^2}{n} \quad (18)$$

Em que:  $s_{w(x)}^2$  é a variância média dentro dos estratos e  $v_{(\bar{x}_{st})}$  é a variância da média estratificada em função da estimativa da variância média dentro dos estratos para o PEMA no  $t$ -ésimo estrato. O erro padrão é obtido pela raiz quadrada de  $v_{(\bar{x}_{st})}$ . As estimativas para o total da população e sua variância da média são obtidos de acordo com as Equações 19 e 20:

$$\hat{X}_{st} = N \bar{x}_{st} \quad (19)$$

$$v_{(\hat{x}_{st})} = \sum_{t=1}^k N_t (N_t - n_t) \frac{S_{t(x)}^2}{n_t} \quad (20)$$

Em que:  $\hat{X}_{st}$  é a estimativa do total da população e  $v_{(\hat{x}_{st})}$  é a estimativa da variância do total da população. O Erro de amostragem absoluto e relativo são obtidos de acordo com as Equações 21 e 22:

$$E_a = \pm t \sqrt{v_{(\bar{x}_{st})}} \quad (21)$$

$$E_r = \pm \frac{t \sqrt{v(\bar{x}_{st})}}{\bar{x}_{st}} 100 \quad (22)$$

Em que:  $E_a$  é o erro de amostragem absoluto e  $E_r$  é o erro de amostragem relativo. O intervalo de confiança para a média e o total é obtido de acordo com as Equações 23 e 24:

$$IC_{\bar{x}} = [\bar{x}_{st} - (t \cdot \sqrt{v(\bar{x}_{st})}) \leq \bar{X} \leq \bar{x}_{st} + (t \cdot \sqrt{v(\bar{x}_{st})})] \quad (23)$$

$$IC_{\hat{X}} = [\hat{X} - N(t \cdot \sqrt{v(\bar{x}_{st})}) \leq \bar{X} \leq \hat{X} + N(t \cdot \sqrt{v(\bar{x}_{st})})] \quad (24)$$

Em que  $IC_{\bar{x}}$  é o intervalo de confiança para a média e o  $IC_{\hat{X}}$  é o intervalo de confiança para total.

### 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O PEMA é uma variável formada pela combinação de dois fatores para a copa e três fatores para o fuste e total. Esses fatores combinados com a variância que cada um resulta em uma variável latente que é capaz de reportar a qualidade energética de uma determinada biomassa.

Quanto maior for o valor do PEMA melhor será a biomassa para fins energéticos. Considerando que os valores do PEMA foram normalizados, quanto mais próximo de um melhor será a biomassa para energia, e quanto mais próximo de zero pior será a biomassa.

#### 5.3.1 Aplicação da estrutura amostral

Foram constatados diferentes valores para média e variância do PEMA de acordo com o componente, a idade e a região avaliada (TABELA 21).

Entre os componentes copa e fuste as maiores médias do PEMA foram verificadas na copa. Em cristal e Piratini as maiores médias para a copa foram constatadas na idade I sendo 0,7654 e 0,8209, respectivamente. Em Encruzilhada do Sul os maiores valores para a copa foram observados na idade I e IV sendo 0,6727 e

0,6845. Para a variância da copa não foi verificada tendência de aumento ou diminuição ao longo das idades e locais de cultivo.

TABELA 21 - VALORES MÉDIOS E VARIÂNCIA DO PEMA POR ESTRATO, CLASSE DE IDADE, LOCAL E COMPONENTES DA BIOMASSA EM POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Local	Idade	Copa		Fuste		Total	
		Média	Variância	Média	Variância	Média	Variância
Cristal	I	0,7654	0,0043	0,4344	0,0032	0,6138	0,0034
	II	0,7365	0,0010	0,3880	0,0020	0,4864	0,0027
	III	0,6272	0,0051	0,2852	0,0004	0,3293	0,0010
	IV	0,7000	0,0029	0,3771	0,0007	0,4376	0,0008
Encruzilhada do Sul	I	0,6727	0,0017	0,3861	0,0014	0,5569	0,0021
	II	0,5800	0,0028	0,3704	0,0055	0,4501	0,0099
	III	0,5119	0,0025	0,3087	0,0040	0,3408	0,0055
	IV	0,6845	0,0160	0,3856	0,0041	0,4536	0,0082
Piratini	I	0,8209	0,0002	0,4435	0,0024	0,7520	0,0016
	II	0,4439	0,0019	0,3044	0,0003	0,3536	0,0004
	III	0,4901	0,0034	0,2761	0,0007	0,3164	0,0019
	IV	0,5184	0,0024	0,3859	0,0037	0,4514	0,0063

FONTE: O autor (2022).

EM QUE: I compreende povoamentos com até dois anos, II entre dois e quatro anos, III entre quatro e seis anos e IV acima de seis anos.

O mesmo comportamento constatado para a componente copa foi observado para o fuste. As maiores médias do PEMA para o fuste foram verificadas na idade I em Cristal e Piratini, sendo 0,4344 e 0,4435 respectivamente. Em Encruzilhada do Sul os maiores valores foram observados na idade I e IV, sendo 0,3861 e 0,3856 respectivamente.

Quando considerados os valores médios estratificados do PEMA, a Copa possui os maiores valores (TABELA 22). Cristal é a região com a maior média do PEMA para a copa, seguida por Piratini. Para o fuste a maior média foi verificada em Piratini, seguida por Cristal. Em relação ao componente total, o maior valor foi constatado em Piratini, seguido por Encruzilhada do Sul.

Para a copa o maior erro de amostragem relativo foi de 5,27%, observado na região de Encruzilhada do Sul. A exatidão, proximidade do verdadeiro valor, dos intervalos de confiança para a média do PEMA na copa foi maior em Piratini, ou seja, a menor amplitude do intervalo de confiança foi de 0,0398. Em Cristal e Encruzilhada

do Sul a amplitude foi maior da ordem de 0,0699 e 0,0633, respectivamente (TABELA 23).

TABELA 22 - VALORES MÉDIOS E VARIÂNCIA DO PEMA ESTRATIFICADOS PARA OS LOCAIS E COMPONENTES DA BIOMASSA PARA POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Local	Copa		Fuste		Total	
	Média	Variância	Média	Variância	Média	Variância
Cristal	0,6949	0,00027	0,3625	0,00007	0,4386	0,00009
Encruzilhada do Sul	0,6010	0,00022	0,3589	0,00024	0,4492	0,00040
Piratini	0,6460	0,00009	0,3713	0,00016	0,5473	0,00014

FONTE: O autor (2022).

No fuste foi constatado o maior erro amostral relativo de 9,29% na localidade de Encruzilhada do Sul. Para esse componente, a exatidão do intervalo de confiança para a média foi maior em Cristal, onde a amplitude do intervalo de confiança foi de 0,035, seguida por Piratini 0,0546 e Encruzilhada por 0,0666 (TABELA 23).

TABELA 23 - ESTATÍSTICA DA AMOSTRAGEM ESTRATIFICADA DO PEMA PARA OS COMPONENTES DA BIOMASSA COPA, FUSTE E TOTAL PARA POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA AMOSTRADOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.

Local	Média	Variância da média	Erro absoluto	Erro relativo (%)	Intervalo de Confiança (LI)	Intervalo de Confiança (LS)
Copa						
Cristal	0,6949	0,00027	0,0164	5,03	0,6600	0,7299
Encruzilhada do Sul	0,6010	0,00022	0,0149	5,27	0,5693	0,6326
Piratini	0,6460	0,00009	0,0093	3,08	0,6261	0,6659
Fuste						
Cristal	0,3625	0,00007	0,0082	4,82	0,3450	0,3800
Encruzilhada do Sul	0,3589	0,00024	0,0156	9,29	0,3256	0,3922
Piratini	0,3713	0,00016	0,0128	7,35	0,3440	0,3986
Total						
Cristal	0,4386	0,00009	0,0094	4,56	0,4185	0,4586
Encruzilhada do Sul	0,4492	0,00040	0,0199	9,46	0,4067	0,4917
Piratini	0,5473	0,00014	0,0117	4,54	0,5225	0,5722

Fonte: O autor (2022).

Em que: LI é o limite inferior e LS é o limite superior.

Para o total, o maior erro amostral relativo segue a mesma tendência constatada para o fuste, sendo 9,46% para a localidade de Encruzilhada do Sul. A exatidão do intervalo de confiança para a média foi maior em Cristal, em que a menor

amplitude do intervalo de confiança foi de 0,0401, seguida por Piratini com 0,0497 e Encruzilhada com 0,085 (TABELA 23).

Utilizando a estrutura amostral proposta para o PEMA, o maior erro relativo foi observado no componente fuste e, conseqüentemente, no total. As maiores variâncias, assim como os maiores erros de amostragem, foram constatadas na localidade de Encruzilhada do Sul.

Avaliar a qualidade energética de uma floresta não é fácil por uma série de fatores. As variáveis energéticas são de diferentes grandezas e unidades de medidas, o que dificulta sua ponderação para possibilitar classificá-las. As propriedades energéticas variam entre os locais de cultivo, entre as idades, entre os componentes da árvore.

De acordo com Bolfarine e Bussab (2005) se a população é heterogênea as razões de custos limitam o aumento do número de amostras, tornando difícil manter uma exatidão razoável. De acordo com Péllico Netto e Brena (1997) a população pode ser estratificada pela variável de interesse visando sua homogeneização dentro dos estratos. Desse modo, a divisão da população em subpopulações homogêneas contribui para reduzir a variabilidade da variável de interesse (SANQUETTA et al, 2014).

Diversos autores adaptaram uma estrutura amostral para condições específicas a fim de melhorar os resultados do inventário florestal. A exemplo, Silva e Pellico Netto (2002) desenvolveram um sistema de inventario florestal para seringal nativo, aplicando amostragem inteiramente aleatória em dois estágios. Barbeiro (2012) apresentou um sistema de amostragem para a quantificação de castanhas baseado na amostragem em múltiplos estágios.

A avaliação da qualidade energética da biomassa é facilitada uma vez que o problema de escala das variáveis geralmente avaliadas (densidade básica, teor de materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior) é resolvido utilizando o PEMA. Na mensuração do PEMA a variabilidade existente nos povoamentos florestais pode ser superada com a utilização da estrutura amostral proposta. Essa estrutura contribui para homogeneizar as variâncias dentro dos estratos e assim reduzir o tamanho da amostra e, conseqüentemente, a demanda por tempo e recursos, garantido a acuidade das informações.

Neste trabalho foram avaliados povoamentos de acácia negra com diferentes idades, entre eles alguns muito jovens. Normalmente, a amostragem dos

povoamentos é feita em idades mais próximas da colheita, uma vez que, em idades muito jovens o estoque de biomassa nos povoamentos cultivados nas condições descritas anteriormente é relativamente baixo, comparado às demais idades e isto corrobora que o método utilizado poderá ser aplicado para povoamentos com diferentes idades. Quanto menor a variação de idade se espera uma menor variabilidade do PEMA, logo uma melhoria na exatidão das estimativas.

Considerando que não foi efetuada uma amostragem dentro de cada estrato proporcional às áreas e sim um número constante de unidades amostrais por estrato, em estudos futuros seria interessante empregar a alocação das amostras proporcional as áreas de cada estrato. Com isso se espera otimizar ainda mais o emprego de recursos e o ganho em exatidão.

#### 5.4 CONCLUSÕES

Com a estrutura proposta, o menor erro relativo da amostragem foi verificado no componente copa, perfazendo 3%. O maior erro encontrado no total e fuste, 9,5% e 9,3 % respectivamente. Em 66% dos casos, o erro relativo da amostragem ficou entre 3 e 5,3%, considerando os componentes copa, fuste e total, e os três locais de cultivo.

A estrutura amostral proposta pode ser utilizada para avaliar a qualidade energética, por meio do PEMA, dos povoamentos de acácia negra em diferentes locais de cultivo com múltiplas idades e diferentes componentes da biomassa.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os valores médios das variáveis energéticas de copa diferem das obtidas para o fuste. A amplitude das curvas ajustadas para a copa difere das ajustadas para o fuste e geralmente são maiores. Esses resultados caracterizam a biomassa de copa como sendo mais heterogênea do que a do fuste.

O comportamento das variáveis é diferente em cada grupo de idade. As variáveis densidade básica, densidade energética, teor de materiais voláteis e os estoques de biomassa, energético e cinzas de copa e fuste tendem a aumentar com a idade. O poder calorífico superior da copa, teor de carbono fixo e teor de cinza tendem a diminuir com a idade. O poder calorífico superior do fuste é pouco influenciado pela idade.

A distribuição normal aderiu aos dados das variáveis poder calorífico superior, densidade energética, teor de materiais voláteis e carbono fixo para copa e fuste, para o conjunto total de dados e, também, para os dados agrupados em classes de idade. Para densidade básica e teor de cinzas de copa e fuste, a distribuição Lognormal aderiu aos dois conjuntos de dados.

Para a variável estoque de biomassa, quando separado por locais dentro das idades, a variabilidade da distribuição aumentou e isso requereu distribuições mais flexíveis para o ajuste. Para os estoques de biomassa a distribuição de Burr foi a que melhor aderiu aos conjuntos de dados separados por idades e locais.

A competição entre os indivíduos é um dos fatores que afeta as variáveis energéticas, principalmente os estoques de biomassa. No grupo I a distribuição dos dados se aproxima da simetria, e à medida que a idade aumenta as curvas vão se tornando assimétricas positivas e em seguida passam a se aproximar de uma exponencial negativa.

As variáveis biométricas foram as que mais contribuíram para a discriminação de classes de qualidade quando considerada a variável densidade energéticas e as variáveis biométricas e meteorológicas para o estoque de biomassa. Para as variáveis poder calorífico superior e teor de cinzas foram as variáveis biométricas e energéticas as que mais contribuíram.

As funções discriminantes que consideram as variáveis estoque de biomassa e teor de cinzas como classes de qualidade, foram as que conseguiram classificar corretamente a maioria das árvores, acima de 85%. As que consideram as variáveis poder calorífico superior e densidade energética classificam corretamente entre 50 e 70% das árvores.

Para a copa, dois fatores conseguiram explicar 85% da variância dos dados energéticos. Para o fuste e total, três fatores explicaram 94% e 96% da variância dos dados energéticos.

Para a copa, o fator F1 reuniu características como a quantidade de energia por unidade de biomassa e a forma como ela degrada dentro do aparelho de combustão. O fator F2 reuniu características da densidade energética. O fator F1 dá suporte às variáveis teor de materiais voláteis e carbono fixo, e no caso da copa, também o poder calorífico superior. O Fator F2 explica a quantidade de biomassa por volume ao dar suporte à densidade básica. O F3, no caso do fuste e total, explica a quantidade de energia por unidade ao carregar o poder calorífico superior.

As variáveis teor de materiais voláteis e carbono fixo explicam no mínimo 55% das variações das propriedades energéticas da biomassa de árvores de acácia negra.

O PEMA pode ser utilizado para avaliar e comparar a qualidade energética da biomassa de povoamentos de acácia negra. Entre os grupos de idade, os povoamentos do grupo I são aqueles com maior percentual de árvores na classe alta. No grupo III apresentam o menor percentual. Os maiores valores médios do PEMA foram verificados na biomassa de copa.

A estrutura proposta para avaliar o PEMA das árvores de acácia negra em diferentes locais, idades e componentes foi adequada. O menor erro relativo da amostragem foi verificado na componente copa (3%), e o maior no total e fuste, 9,5% e 9,3 % respectivamente.

Em 66% dos casos, o erro relativo da amostragem ficou entre 3 e 5,3%, considerando os componentes copa, fuste e total, e os três locais de cultivo.

## REFERÊNCIAS

- ABBOT, P.; LOWORE, J.; KHOFI, C.; AND WERREN, M. Defining firewood quality: A comparison of quantitative and rapid appraisal technique to evaluate firewood species from a Southern African Savana. **Biomass Bioenergy**, v.12 p.429–437.1997
- ALZATE, S. B. A.; FILHO, M. T.; PIEDADE, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.68, p. 87-95, 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D 2395-14: standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials**. Conshohocken: ASTM International, 2014. 13 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D1762-84: standard test method for chemical analysis of wood charcoal**. West Conshohocken: ASTM International, 2013. 2 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D5865-13: standard test method for gross calorific value of coal and coke**. West Conshohocken: ASTM International, 2013. 19 p.
- ANDRADE, A. S. **Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.: influência da idade e classe de produtividade**. 2006. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <[http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf\\_ms/2006/d452\\_0623-M.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_ms/2006/d452_0623-M.pdf)>. Acesso em: 24 nov. 2017.
- BARBEIRO, L.S.S. **Sistema de amostragem para quantificar a produção de sementes de *Bertholletia excelsa* h.b.k (castanha do brasil) na região de Oriximiná – PA**. 115f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.
- BEHLING, A. **A produção de biomassa e o acúmulo de carbono em povoamentos de acácia negra em função de variáveis bioclimáticas**. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BEHLING, A. **Modelagem da biomassa de árvores para assegurar aditividade dos seus componentes**. 117p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.
- BERSCH, A. P.; BRUN, E. J.; PEREIRA, F. A.; SILVA, D. A.; DE BARBA, Y. R.; DORINI JUNIOR, J. R. Caracterização energética da madeira de três materiais

genéticos de *Eucalyptus sp.* **Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 1, p. 87 - 92, 2018. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/51673>>. Acesso em: 12 out. 2021. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v48i1.51673>.

BHATT, B. P.; TODARIA, N. P. 1992. Fuelwood characteristics of some mountain trees and shrubs. **Commonwealth Forestry Rev.** 47:363–366. **biomass allometric equations: from field measurement to prediction**. Rome e Montpellier:

BOLFARINE, H.; BUSSAB, W.O. **Elementos de amostragem**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 269p.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro, Interciência, 2010.

BRAND, M. A. Influência da espécie na qualidade da biomassa florestal sob estocagem, para geração de energia. **Ambiência**, Guarapuava, v.9, n.3, p.461-474, 2013. DOI. 10.5935/ambiencia.2013.03.01. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/1592/59>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

BRAND, M. A.; STÄHELIN, T. S. F.; FERREIRA, J. C.; NEVES, M. D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.2, p.353-360, 2014.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Cenários de demanda para o PNE 2050**. Rio de Janeiro, 2018. 34 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2020**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em:<<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>>. Acesso em 21 out. 2021.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: i. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, São Paulo, v. 1, n. 14, p.9-20, jan. 1977. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr14/cap01.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; **Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia**. Piracicaba: IPEF, 1979. 7p. Circular Técnica nº 52. Disponível em: <<http://ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr052.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E.G. **Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis**. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo, 1982. p.101-137.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p

CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; NETO, R. M. R.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, E. M. Quantificação da biomassa acima do solo de *Acacia mearnsii* De Wild., procedência Batemans Bay – Austrália. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.2, p.79-91, 2001.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus sp.* em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v.38 n.2, 375-381. 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>

CARVALHO, J. F. Energia e sociedade. **Estudos Avançados** [online]. 2014, v. 28, n. 82, p.25-39. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-40142014000300003>>.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies introduzidas alternativas às dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* para reflorestamento no centro-sul do Brasil**. In: SEMINÁRIO ESPÉCIES NÃO TRADICIONAIS PARA PLANTIOS COM FINALIDADES PRODUTIVAS E AMBIENTAIS, 1998. Curitiba. Anais... Curitiba: EMBRAPA–CNPQ, 1998. p. 75-99.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de material genético de *Eucalyptus sp.* Na madeira e carvão vegetal**. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CHAVES, A. M. B. VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp.* **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.9, n.17, p.533-542, 2013.

CINTRA, T. C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

COSTA JUNIOR, S.; SILVA, D. A.; BEHLING, A.; KOEHLER, H. S.; SIMON, A. A.; COSTA, A. Propriedades energéticas da biomassa de *Acacia mearnsii* De Wild. em diferentes idades e locais de cultivo. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 131, e3406. 2021. DOI:<https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.04>. Disponível em: <<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr131/2318-1222-scifor-49-131-e3406.pdf>> Acesso em 01 de junho de 2022.

COSTA JUNIOR, S.; SILVA, D. A.; SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; SIMON, A. A.; TRAUTENMULLER, J. W.; FERRAZ, F. A. Quantificação dos estoques de biomassa de *Acacia mearnsii* de Wild. em diferentes idades e locais de cultivo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.46, n.120, p.614-625, 2018. DOI:[dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n120.10](http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n120.10)

COUTO, L.C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L.F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v.1, n.1, p.71-92, 2004.

DELUCIS, R. A.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E. Análise da deformação residual longitudinal e sua relação com propriedades tecnológicas da madeira de acácia-negra. **Revista Árvore**, Viçosa, v.39, n.3, p.585-594, 2015.

EISFELD, R.; EISFELD, C. L.; FERREIRA, J. M.; PIMENTEL, A.; RODRIGUES, F.; ALMEIDA, A. Modelagem da massa específica básica dos cavacos a partir de variáveis dendrométricas e da massa específica do disco. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 4, p. 877-886, 2009.

ELOY, E. **Produção e qualidade da biomassa de florestas energéticas no norte do Rio Grande do Sul, Brasil**. 157f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

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

ELOY, E.; CARON, B. O.; SILVA, D. A.; SOUZA, V. Q.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; ELLI, E. F. Produtividade energética de espécies florestais em plantios de curta rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n.8, p.1424-1431, 2015. DOI. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130177>. Disponível em: <<http://revistas.bvs-vet.org.br/crural/article/view/26394/27454>>. Acesso em 27 nov. 2017.

ELOY, E.; DA SILVA, D. A.; CARON, B. O.; DE SOUZA, V. Q. Capacidade energética da madeira e da casca de acácia-negra em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo,35(82), 163-167, 2015.

FLEIG, F.D. **Avaliação econômica dos sistemas de produção com Acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul**. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1993.

FOEKEL, C. Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos: Aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos ins presentes nas árvores. In **Eucalyptus Online Book**. 133p. 2005.

FREDDO, A. **Elementos minerais em madeiras de eucaliptos e acácia-negra e sua influência na indústria de celulose kraft branqueada**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

GOEL, V. L.; BEHL, H. N. 1996. Fuelwood quality of promising tree species for alkaline soil sites in relation to tree age. **Biomass Bioenergy** 10:57–61.

GOULART, M.; HASELEIN, C. R.; HOPPE, J. M.; FARIAS, J. A.; PAULESKI, D. T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 167-175, 2003.

HABITZREITER, T. L.; ADAMI, P. F.; BRUN, E. J.; BATISTA, V. V.; FERREIRA, M. L.; GIACOMEL, C. L. Poder calorífico e análise econômica do uso total ou parcial da biomassa de eucaliptos. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 18, n. 3, p. 282–288, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.18188/sap.v18i3.21822>

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORE (IBÁ) **Relatório anual 2021**, São Paulo, 2021. 176p. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2022.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. 6 p. (Comunicação Técnica, 1797).

KANNEGIESSER, U. Apuntes sobre algunas acacias australianas: 1. *Acacia mearnsii* De Willd. **Ciencia e Investigación Forestal**, Concepción, v. 4, n. 2, p. 198-212, 1990.

KAPLAN, Y. A. Overview of wind energy in the world and assessment of current wind energy policies in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p.562-568, 2015.

KING, G. How not to lie with statistics [Online] Disponível em:< <https://oconnell.fas.harvard.edu/files/gking/files/mist.pdf>> Acesso em: 21 out. 2021.

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

LIMA, J. T. The wood density of three eucalyptus saligna Smith clones in relation to age. **Annuary Science Forestry**, v.52, p.347-352, 1994.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das angiospermas: Leguminosas**. Santa Maria: Editora da UFSM, 1997.

MCKENDRY, P. **Recurso tecnológico**. v.82. p. 47-54. 2002.

MINATTI, M.; TRAUTENMÜLLER, J.W.; PÉLLICO NETTO, S.; CORTE, A.P.D.; BALBINOT, R.; LAMBRECHT, F.R. Modelagem da distribuição dos incrementos em

diâmetro de remanescentes de *Araucaria angustifolia* em área manejada. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 124, p. 613-623, 30 dez. 2019. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr124/cap03.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v47n124.03>

MIRANDA, R. L.; MARTINS, E. M.; LOPES, K. A Potencialidade Energética da Biomassa no Brasil. **Revista Desenvolvimento Socioeconômico em Debate**. v.5, n.1, p.94-106, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18616/rdsd.v5i1.4829>

MOCHIUTTI, S. **Produtividade e sustentabilidade de plantações de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul**. 270 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

MOMOLLI, D.R.; SCHUMACHER, M.V. Sustentabilidade de povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. em diferentes idades: uma revisão da ciclagem de nutrientes. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**., v.6, n.12, p.263-272, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21438/rbgas.061220>.

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

MOREIRA, J. M. M. A. P.; LIMA, E. A.; GOULART, I. C. G. R. Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. Embrapa Florestas, Comunicado Técnico, n. **293**, Colombo, p. 1-5, 2012.

MOULIN, J. C.; ARANTES, C. M. D.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. C.O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.39, n.1, p.199-208, 2015 DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000100019>.

MÜLLER, I. **Avaliação da produtividade da *Acacia mearnsii* De Wild. (Acácia negra) em função de diferentes espaçamentos**. 2006.131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Santa Maria, 2006.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; VALLE, M. L. A.; SOUSA, L. C.; VIEIRA, C. M. M. Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal Of Agricultural And Environmental Sciences**, Lavras, v.56, n. 2, p.139-148, 2013.. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.022>.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações**. 2ªed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. In: BARRETO, Eduardo José Fagundes. **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

NUNES, L.J.R. **A utilização de biomassa como alternativa energética para a sustentabilidade e competitividade da indústria portuguesa**. 240p. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão industrial) Departamento de engenharia, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2015.

OJELEL, S.; OTITI, T.; MUGISHA, S. Índices de valor de combustível de espécies de combustível de madeira selecionadas usadas nos distritos de Masindi e Nebbi de Uganda. **Energ Sustain Soc** v.5, n.14, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1186/s13705-015-0043-y>

OLIVEIRA, E. **Correlação entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden)**. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

ORELLANA, B. B. M. A. **Quantificação da biomassa e potencial energético de *Tachigali vulgaris* em áreas plantadas no estado do Amapá**. 2015. 77p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2015.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. Textbook of technology. 4th ed. New York: McGraw Hill; p. 705, 1980.

PÉLLICO NETO, S.; BRENA, D.A. **Inventário florestal**. Curitiba: Editorado pelos autores, 1997. 316p.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. **Documentos**, n. 38, Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p.

PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction**. Rome e Montpellier: Food and Agricultural Organization of the Unites Nations and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, 2012. 215p.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, n.66, p.113-122, 2011. DOI. <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113>.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briguetes de carvão vegetal**. Brasília,DF: LPF, 1991. (Série Técnica, n. 13). Disponível em:<http://mundoflorestal.com.br/arquivos/indice.pdf>. Acesso em: 08 jun.2022.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 15, n. 89, p. 100-106, 2005.

RACHWAL, M.F.G.; CURCIO, G.R.; DEDECEK, R.A. **Caracterização do desenvolvimento e produção de madeira da *Acacia mearnsii* aos 3 e 5 anos de idade em solos derivados de micaxistos no município de Piratini, RS**. Colombo, Embrapa Florestas, 1997.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p.277-290, 2012. DOI. <http://dx.doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.277>.

REIS, M. G. F.; KIMMINS, J. P.; RESENDE, G. C.; BARROS, N. F. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v.9, n.2, p.149-162, 1985.

ROCHA, M.F.V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 71f. Dissertação (Mestrado Ciências Florestais), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; SIMON, A.; PSCHIEDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.42, n.103, p.361-370, 2014.

SANQUETTA, C. R.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; ELOY, E.; DALLA CORTE, A. P.; SIMON, A. A.; SILVA, D. A. Variação axial da massa específica básica da *Acacia mearnsii* em diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul. **Revista Biociências**, Taubaté, v.19, n.2. p43-52, 2013.

SANQUETTA, C.R.; CORTE, A.P.D.; RODRIGUES, A.L.; WATZLAWICK, L.F.; **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Editorado pelos autores, 2014. 406p.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.4, p.697-706, 2008.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SANTANA, W. M.; CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F. Efeito da idade e da classe diamétrica nas propriedades da madeira de *Eucalyptus* clonal. **Cerne**, v.18, n.1, p.1-8, 2012.

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2012.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; GIACOMELLI SOBRINHO, V.; SCHNEIDER, P. S. P. Determinação indireta do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, 2005, 15(4), 391-402.

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

SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; SPATHELF, P. Produção de madeira e casca verde por índice de sítio e espaçamento inicial de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.1, p.151-165, 2001.

SCREMIN, A. L. T. **Estudo Energético e Físicoquímico do Carvão Vegetal de *Eucalyptus dunnii* Maiden**. 103f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, Universidade Estadual do Centro- Oeste, Guarapuava, 2012.

SETTE JUNIOR, C. R.; OLIVERA, I. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; YAMAJI, F. M.; LACLAU, J. P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.36, n.6, p.1183-1190, 2012.

SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Composição química da madeira de *Eucalyptus citriodora* em função das direcções estruturais. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 1, n. 14, p.113-126, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.mec.pt/pdf/slu/v14n1/v14n1a09.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

SILVA J.C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira** [tese]. Curitiba: Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná; 2002.

SILVA, D. A.; BEHLING, A.; SANQUETTA, C. R.; RUZA, M. S.; CORTE, A. P. D.; PSCHIEDT, H.; COSTA JUNIOR, S. Potencial dendroenergético dos diferentes compartimentos de *Acacia mearnsii* cultivada no estado do Rio Grande do Sul. **Biofix scientific journal**, Curitiba, v.2, n.2, p.71-75, 2017. DOI. [dx.doi.org/10.5380/biofix.v2i2.55777](https://doi.org/10.5380/biofix.v2i2.55777).

SILVA, J. A.; PÉLLICO NETTO, S. Sistema de inventário florestal para seringal nativo. **Floresta**, v.32, n.1, p.97-110. 2002. DOI. <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v32i1.2351>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2351/1965>. Acesso em: 29 maio 2022.

SILVA, J. C.; OLIVERA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JÚNIOR, S.; MATOS, J. L. M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Floresta**, Curitiba, v.34, n.1, 13- 22, 2005.

SIMON, A. A. A cadeia produtiva da acácia-negra, aspectos econômicos, sociais e ambientais. In: STROHSCHOEN, A.G.; REMPEL, C. **Reflorestamento e recuperação ambiental: Ambiente e tecnologia: o desenvolvimento sustentável em foco**. Lajeado: Univates, 2005. p. 149-166.

SIMON, A.A. **Produção de mudas de Acácia-negra – plantio 1998**. Montenegro: TANAGRO, 1999. 3p. Relatório Técnico.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA JÚNIOR A.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.3, p.543-549, 2014 Disponível em: <http://udlap.redalyc.org/articulo.oa?id=48831728017>. Acesso em: 20 nov. 2017.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA JÚNIOR A.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.3, p.543-549, 2014 Disponível em: <http://udlap.redalyc.org/articulo.oa?id=48831728017>. Acesso em: 20 out. 2021.

STEIN, P. P.; TONIETTO, L. Black Wattle Silviculture in Brazil. In: BROWN, A.G.; KO, H.C. (Ed.). **Black Wattle and its Utilisation**. Barton: RIRDC, 1997. p. 78-82.

TAFlick, T.; SCHWENDLER, L.A.; ROSA, S.M.L.; REHMAN, N.; BICA, C.I.D.; NACHTIGALL, S.M.B. Extrativos influem na obtenção de nanocristais de celulose de acácia negra? In: 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS (12ºCBPol), 12, 2013. Florianópolis, **Anais...** Florianópolis. Associação Brasileira de Polímeros, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004

TANAC, Matéria prima. Manejo responsável, focado no bem do planeta. Disponível em: <<https://www.tanac.com.br/materia-prima/>>. Acesso em 04 ago. 2021.

TAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos**. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) Departamento de Hidráulica e Saneamento - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

TEIXEIRA, C. M.; MARTINS, M. P.; YAMAMOTO, H.; CHRISOSTOMO, W; YAMAJI, F. M. Caracterização química de resíduos de *Eucalyptus sp.* de floresta de curta rotação para a produção de bioenergia. **Revista Virtual de Química**. v. 8, n. 5, p. 1693-1701, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20160112>.

TÉO, S. J.; ROCHA, S. P.; BORTONCELLO, A. C.; PAZ, R. A.; COSTA, R. H.. Dinâmica da distribuição diamétrica de povoamentos de *Pinus taeda*, na região de Caçador, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 67, p. 183, 2011. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/ojs-3.2.1-3/index.php/pfb/article/view/190>. Acesso em: 21 jun. 2021.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; SCHNEIDER, P. R.; MENEZES, L. F. Efeito da intensidade de desbaste nas características dendrométricas e tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.17, n.4, p. 377-387, 2007.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**. Lavras, v.2, n.1, p.94-111, 1996.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, vol. 2, núm. 1-2, 2001. Disponível em: Acesso em 20 nov. 2017.

VARGAS-MORENO, J. M.; CALLEJÓN-FERRE, A. J.; PÉREZ-ALONSO, J.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v.16, n.5, p. 3065-3083, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.054>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112001487#!>>. Acesso em: 20 out. 2021.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V. Biomassa em povoamentos monoespecíficos e mistos de eucalipto e acácia-negra e do milho em sistema agrossilvicultural. **Revista Cerne**, v. 17, n. 2 p. 259-265, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-7602011000200014>>. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000200014>.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V.; TRÜBY, P.; ARAÚJO, E.F. Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, em Eldorado do

Sul-RS. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v.1, p.1-13, 2013. DOI.  
<http://dx.doi.org/10.13086/2316-980x.v01n01a01>.

WATZLAWICK, L.F.; WIONZEK, F.B.; SILVA, S.V.K.; BENIN, C.C. Produção de biomassa e propriedades energéticas do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. In: GONÇALVES, F.G. **Engenharia industrial madeireira: tecnologia, pesquisa e tendências**. 1. Científica Digital, 2020. P.267-285. DOI: 10.37885/201101958.

ZELLER, R. A; CARMINES, E. G. Measurement in the social sciences: The link between theory and data. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.