



**BRENO ASSIS LOUREIRO**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE *Eucalyptus*  
*urophylla* EM FUNÇÃO DA IDADE E DE DIFERENTES  
MATERIAIS GENÉTICOS**

**LAVRAS-MG**

**2022**

**BRENO ASSIS LOUREIRO**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE *Eucalyptus urophylla* EM FUNÇÃO  
DA IDADE E DE DIFERENTES MATERIAIS GENÉTICOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e utilização de materiais lignocelulósicos e derivados, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho  
Orientador

**LAVRAS-MG**

**2022**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Loureiro, Breno Assis.

Potencial energético da madeira de *eucalyptus urophylla*  
em função da idade e de diferentes materiais genéticos / Breno  
Assis Loureiro. - 2021.

81 p.

Orientador(a): Paulo Fernando Trugilho.

Coorientador(a): José Reinaldo Moreira da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2021.  
Bibliografia.

1. Qualidade da madeira. 2. Biomassa. 3. Bioenergia. I.  
Trugilho, Paulo Fernando. II. Silva, José Reinaldo Moreira da.  
III. Título.

**BRENO ASSIS LOUREIRO**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE *Eucalyptus urophylla* EM FUNÇÃO  
DA IDADE E DE DIFERENTES MATERIAIS GENÉTICOS**

**ENERGY POTENTIAL OF *Eucalyptus urophylla* WOOD AS A FUNCTION OF AGE  
AND DIFFERENT GENETIC MATERIALS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e utilização de materiais lignocelulósicos e derivados, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 16 de novembro de 2021.

Dr. Paulo Fernando Trugilho	UFLA
Dr. Aylson Costa Oliveira	UFMT
Dra. Marina Donária Chaves Arantes	UFSJ
Dra. Izabel Cristina Rodrigues de Figueiredo	GRUPO PLANTAR
Dra. Graziela Baptista Vidaurre	UFES

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho  
Orientador

**LAVRAS-MG**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira pela possibilidade de realizar este trabalho e à CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

À Raisia, pela paciência e disposição em auxiliar na resolução dos problemas burocráticos.

Gostaria de agradecer, em especial, ao meu orientador Prof. Paulo Trugilho pela orientação e amizade durante o decorrer desta jornada.

Agradeço, também, à toda equipe do Laboratório Multiusuário de Biomateriais que me auxiliou na execução de várias partes deste projeto de tese e a empresa PLANTAR, por fornecer o material de desenvolvimento do estudo.

À Lidiany do Departamento de Química/UFLA pelo auxílio e ensinamento na realização das análises S/G.

Agradeço, ainda, à minha família e minha namorada Bianca pelas orações, apoio, paciência e compreensão em todos os momentos dessa caminhada.

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi de avaliar o efeito da idade nas características de qualidade da madeira, além do rendimento e qualidade do carvão vegetal produzido por clones de híbridos de *Eucalyptus urophylla*, em seis idades diferentes (1, 2, 3, 4, 5 e 6 anos), bem como determinar as relações entre as características da madeira com as do carvão vegetal. A densidade básica e o poder calorífico superior (PCS) foram determinados. Foram realizadas análises químicas (extrativos, lignina, holocelulose, relação siringil/guaiacil da lignina, cinzas, análise elementar), térmica (análise termogravimétrica) e anatômica (individualização das fibras para determinação da espessura da parede celular e fração parede) na madeira. O carvão vegetal foi produzido em forno tipo mufla, com taxa de aquecimento de  $60^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ . A carbonização iniciou à temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  até temperatura máxima de  $380^{\circ}\text{C}$ , com tempo de residência de 60 minutos. No carvão vegetal produzido foi determinado os rendimentos gravimétricos, assim como a densidade relativa aparente (DRA), análise química imediata e elementar e poder calorífico superior (PCS). As densidades básica e energética, massa seca e teor de extrativos aumentaram com a idade da árvore. Características da madeira, como teor de holocelulose, cinzas, e nitrogênio tiveram seus valores diminuídos com a idade da planta. As curvas TG/DTG exibiram três faixas de decomposição térmica, atribuídas à secagem da madeira e à decomposição das hemiceluloses e celulose. Maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal, densidade relativa aparente e energética, teor de carbono fixo e eficiência energética foram mais elevados no material mais maduro. Os valores de consumo específico de madeira, teor de materiais voláteis, cinzas e nitrogênio no carvão vegetal reduziram com a idade. As correlações canônicas foram elevadas, sendo que, nas três idades, o primeiro e segundo pares foram significativos a 15% de probabilidade. A idade da árvore influenciou as propriedades da madeira, embora a maioria dos clones tenha apresentado propriedades satisfatórias para produção de carvão vegetal para uso siderúrgico, em regra o material mais maduro obteve melhor desempenho. A idade ideal de corte para fins energéticos é de 4 anos, visto que as características da madeira e do carvão são similares às do material mais maduro, podendo reduzir os custos de produção florestal e garantir rendimentos econômicos em curto espaço de tempo.

**Palavras-chave:** Qualidade da madeira. Biomassa. Bioenergia. Carvão vegetal. Carbonização.

## ABSTRACT

This research aimed to evaluate age effect on wood quality characteristics, in addition to the yield and quality of charcoal produced by *Eucalyptus urophylla* hybrid clones, at six different ages (1, 2, 3, 4, 5 and 6 years), as well as to determine the relationship between the wood characteristics with those of charcoal. Basic density and higher heating value (HHV) were determined. Chemical (extractives, lignin, holocellulose, syringyl/guaiacyl ratio of lignin, ash, ultimate analysis), thermal (thermogravimetric analysis) and anatomical (individualization of fibers to determine cell wall thickness and wall fraction) analyzes were performed on the wood. The charcoal was produced in a muffle furnace, with  $60^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$  heating rate. The carbonization started at a temperature of  $100^{\circ}\text{C}$  to a maximum temperature  $380^{\circ}\text{C}$ , with a residence time of 60 minutes. In the charcoal produced, the gravimetric yields were determined, as well as the apparent relative density (ARD), proximate and ultimate chemical analysis and HHV. Basic and energetic densities, dry mass and extractive content increased with tree age. Wood characteristics, such as holocellulose, ash, and nitrogen content had their values decreased with plant age. The TG/DTG curves showed three ranges of thermal decomposition, attributed to wood drying and to the hemicelluloses and cellulose decomposition. Higher gravimetric yield in charcoal, apparent relative and energetic densities, fixed carbon content and energy efficiency were higher in the more mature material. Specific wood consumption values, volatile material content, ash and nitrogen in charcoal reduced with age. The canonical correlations were high, and at three ages, the first and second pairs were significant at 15% probability. Tree age influenced the wood properties, although most clones showed satisfactory properties for the charcoal production for steel use, as a rule the more mature material had better performance. The ideal cutting age for energy purposes is 4 years since the wood and charcoal characteristics are similar to those most mature material, which can reduce forestry production costs and guarantee economic returns in a short period of time.

**Keywords:** Wood quality. Biomass. Bioenergy. Charcoal. Carbonization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais unidades aromáticas presentes na molécula de lignina.....	33
Figura 2 - Esquema da amostragem nos discos das árvores selecionadas.....	38
Figura 3 - Variação da densidade básica da madeira (DB) e massa seca (MS).....	38
Figura 4 - Relação funcional entre densidade básica (DB) e energética (DE) da madeira.....	39
Figura 5 - Poder calorífico superior (PCS) da madeira em função do clone e da idade.....	39
Figura 6 - Variação da espessura da parede (EP) e fração parede (FP) das fibras.....	40
Figura 7 - Teor de lignina total (LIG) da madeira e a relação siringil/guaiacil (S/G) da lignina em função do clone e da idade.....	41
Figura 8 - Variação do teor de extrativos em acetona (EXTac) da madeira em função da idade.....	43
Figura 9 - Variação do teor de holocelulose (HOLO) e cinzas (CIZm) da madeira em função da idade.....	44
Figura 10 - Variação do teor de hidrogênio (H), oxigênio (O), carbono (C) e nitrogênio (N) da madeira em função da idade.....	45
Figura 11 - Curvas termogravimétricas e derivadas da madeira em atmosfera de nitrogênio...	48
Figura 12 - Variação do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV), em gases não condensáveis (RGGNC) e em líquido pirolenhoso (RLP) da carbonização em função da idade.....	53
Figura 13 - Variação do teor de materiais voláteis (MV) e carbono fixo (CF) do carvão vegetal em função da idade.....	55
Figura 14 - Variação do teor de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e cinzas (CIZ) no carvão vegetal em função da idade.....	56
Figura 15 - Variação do consumo específico de madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal em função da idade.....	57
Figura 16 - Relação funcional entre densidade relativa aparente e densidade energética do carvão vegetal.....	58
Figura 17 - Variação do poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal e da eficiência energética (EE) em função da idade.....	59
Figura 18 - Conteúdo de siringaldeído da lignina na madeira em função do clone e da idade (anos).....	80

Figura 19 - Variação do estoque de carbono na massa seca em função da idade (anos).....	80
Figura 20 - Variação do índice de Runkel em função da idade (anos).....	81
Figura 21 - Variação de massa de carbono fixo em função da idade (anos).....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos da relação S/G da madeira de <i>Eucalyptus</i> mencionadas na literatura.....	26
Tabela 2 - Composição elementar, imediata e rendimento de carvão em função da temperatura de carbonização.....	28
Tabela 3 - Identificação do material genético utilizado.....	32
Tabela 4 - Valores médios das características de crescimento dos clones.....	33
Tabela 5 - Análises das características da madeira.....	34
Tabela 6 - Análises das propriedades do carvão vegetal.....	35
Tabela 7 - Matriz de correlações entre as propriedades avaliadas na madeira.....	47
Tabela 8 - Valores médios da perda de massa dos clones de <i>Eucalyptus</i> em função das faixas de temperatura e massa residual, em porcentagem.....	50
Tabela 9 - Resumo da interação clone x idade nas propriedades da madeira.....	52
Tabela 10 - Matriz de correlações entre as propriedades do carvão vegetal.....	60
Tabela 11 - Resumo da interação clone x idade para o carvão vegetal.....	61
Tabela 12 - Estatísticas utilizadas na avaliação das seis primeiras variáveis canônicas.....	62
Tabela 13 - Cargas canônicas da matriz estrutural entre as variáveis do carvão vegetal (grupo I) e as variáveis da madeira de <i>E. urophylla</i> (grupo II) aos 4 anos.....	63
Tabela 14 - Cargas canônicas da matriz estrutural entre as variáveis do carvão vegetal (grupo I) e as variáveis da madeira de <i>E. urophylla</i> (grupo II) aos 5 anos.....	64
Tabela 15 - Cargas canônicas da matriz estrutural entre as variáveis do carvão vegetal (grupo I) e as variáveis da madeira de <i>E. urophylla</i> (grupo II) aos 6 anos.....	65
Tabela 16 - Resumo das análises de variância realizadas para o poder calorífico superior, densidade básica, massa seca e as características anatômicas da madeira.....	76
Tabela 17 - Resumo das análises de variância realizadas para a composição química estrutural da madeira.....	76
Tabela 18 - Resumo das análises de variância realizadas para a vanilina e siringaldeído da lignina.....	77

Tabela 19 - Resumo das análises de variância realizadas para a análise química elementar da madeira.....	77
Tabela 20 - Resumo das análises de variância realizadas para estoque de carbono por massa seca (ECM) e índice de Runkel (IR) da madeira, além da Massa seca de carbono fixo (ECF) do carvão vegetal.....	78
Tabela 21 - Resumo das análises de variância realizadas para os rendimentos da carbonização e os teores de materiais voláteis e carbono fixo.....	78
Tabela 22 - Resumo das análises de variância realizadas para os constituintes elementares e o teor de cinzas da madeira.....	79
Tabela 23 - Resumo das análises de variância realizadas para o poder calorífico superior, densidade relativa aparente e energética, eficiência energética e consumo.....	79

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	15
3.1	Aspectos gerais sobre o gênero <i>Eucalyptus</i> e suas florestas plantadas.....	15
3.2	Influência da idade nas características da madeira de eucalipto .....	16
3.3	Qualidade da madeira para a produção de carvão vegetal .....	18
3.4	Composição química da madeira.....	22
3.5	Processo de carbonização e a qualidade do carvão vegetal .....	26
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	32
4.1	Material biológico, amostragem e cubagem das árvores .....	32
4.2	Características de crescimento da árvore .....	33
4.3	Análises das características da madeira .....	34
4.4	Carbonização e análises das características do carvão vegetal .....	35
4.5	Delineamento estatístico e análises de dados .....	36
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
5.1	Interação clone x idade nas propriedades da madeira.....	37
5.2	Análise termogravimétrica (TG/DTG).....	48
5.3	Resumo da interação clone x idade nas propriedades da madeira.....	51
5.4	Interação clone x idade para o carvão vegetal.....	52
5.5	Resumo da interação clone x idade para o carvão vegetal.....	61
5.6	Correlação canônica.....	62
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	66
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	67
	<b>ANEXOS</b> .....	76

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade está associado ao aumento do consumo de energia e ao uso de diversas fontes energéticas. Nas últimas décadas, a demanda de energia foi suprida principalmente por fontes não renováveis, o que desencadeou inúmeras perguntas sobre o abastecimento de energia, em conjunto com o equilíbrio ambiental e econômico. Desse modo, vários países têm buscado caminhos para reduzir os problemas relacionados ao uso intensivo das fontes de energia não renováveis, predominantemente reforçando o uso de fontes renováveis, incluindo a biomassa florestal.

A biomassa florestal se destaca como fonte energética alternativa renovável, favorecendo de maneira positiva na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, cujos estudos, realizados no Brasil e no mundo, relataram o potencial da biomassa na produção de energia, como, por exemplo, os desenvolvidos por Kumar *et al.* (2011), Telmo e Lousada (2011), Carneiro *et al.* (2014) e Resquin *et al.* (2019).

O setor de árvores plantadas do país é importante na redução dos danos causados pela mudança climática. As emissões de gases de efeito estufa podem ser evitadas pelo uso de madeira, fibras e combustíveis de origem florestal. A energia da biomassa florestal é um destes insumos presente em diversas indústrias, uso doméstico e comercial, que substitui fontes fósseis e não renováveis. Desse modo, o setor tem papel relevante no cumprimento do Acordo de Paris e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, da ONU (IBÁ, 2021).

O carvão vegetal pode ser considerado como uma das principais fontes de energia de biomassa, usado em larga escala na produção brasileira destinada ao setor siderúrgico, obtendo muitas vantagens em relação ao carvão mineral, pois apresenta em sua constituição química baixos teores de minerais, especialmente de enxofre e fósforo (ASSIS *et al.*, 2012; NEVES *et al.*, 2011; REIS *et al.*, 2012), que afetam negativamente os produtos advindos da siderurgia.

Na siderurgia, o carvão vegetal é agente de dupla finalidade, gerando energia e o agente redutor do minério de ferro para produzir o ferro gusa, além de outras ligas metálicas. No entanto, a indústria siderúrgica enfrenta um grande problema, que é a heterogeneidade do carvão vegetal que, além de afetar o consumo específico do biorredutor no alto forno, também interfere na qualidade do produto final desejado. Isso ocorre devido às variações nas características da madeira utilizada, bem como as condições do processo de pirólise.

A idade é fator que provoca modificações das características da madeira, em virtude da ocorrência de alterações fisiológicas enquanto a árvore envelhece, como: mudanças nas composições químicas, físicas e anatômicas (CARNEIRO *et al.*, 2014). A madeira juvenil apresenta

baixa densidade, alto teor de lignina e fibras menores em relação à madeira adulta (CARNEIRO *et al.*, 2014; PROTÁSIO *et al.*, 2014a).

O teor de cinzas e da lignina apresentam diminuição dos valores (MORAIS *et al.*, 2017; SOARES *et al.*, 2015; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996) com a idade e é bastante claro o aumento da densidade com a idade da árvore (NEVES *et al.*, 2013; RESQUIN *et al.*, 2019; SANTANA *et al.*, 2012), assim como relatado por Sette Júnior *et al.* (2012) e Trugilho, Lima e Mendes (1996) para as dimensões das fibras (comprimento, largura e espessura). Entretanto, o poder calorífico superior geralmente não possui tendência em relação à idade (NEVES *et al.*, 2013; PROTÁSIO *et al.*, 2014a; SOARES *et al.*, 2015), em razão dessa propriedade resultar da dependência de parâmetros como lignina, extrativos e cinzas (KUMAR *et al.*, 2011).

Desta forma, o fator idade é importante na tomada de decisão das empresas florestais em relação ao estabelecimento da rotação ótima da floresta. A tomada de decisão deve ser pautada considerando que a idade altera as características da madeira e, conseqüentemente, a qualidade do carvão vegetal produzido. Portanto, é importante salientar que, na escolha da idade de corte do povoamento florestal, deve ser considerada a produtividade volumétrica bem como a qualidade da madeira. Avaliar as variações na madeira provocadas pela idade, possibilitará definir com mais precisão o ponto ótimo de colheita florestal e maximizar o seu aproveitamento.

Nesse contexto, se torna essencial a avaliação das características da madeira que influenciam na qualidade e produção do carvão vegetal, além da importância de entender a possível dependência entre os fatores clone e idade para as características da madeira que influenciam o uso energético. Segundo Pereira *et al.* (2012) e Protásio *et al.* (2012, 2013a), a composição química, com destaque para o maior teor de lignina, juntamente com a alta densidade básica da madeira, são fatores benéficos para a seleção de clones visando a finalidade energética.

A alta demanda por madeira no setor florestal impulsiona pesquisas para aumentar a produtividade dos plantios e a redução da idade de corte dos mesmos. Nesse cenário, as florestas de curta rotação despontam no setor energético como alternativa para atingir madeira em intervalos de tempo reduzido e com custos menores de produção (CARNEIRO *et al.*, 2016). Contudo, madeira de curta rotação e as produzidas em sistemas convencionais apresentam características distintas, em razão da variabilidade que ocorre em função da idade da planta (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito da idade sobre as características de qualidade da madeira, além do rendimento e qualidade do carvão vegetal.

Os objetivos específicos foram:

- a) Avaliar as propriedades físicas, químicas e os parâmetros das fibras da madeira;
- b) Avaliar o impacto da idade na avaliação das propriedades do carvão vegetal;
- c) Analisar a decomposição térmica da madeira por meio da análise termogravimétrica;
- d) Determinar a correlação idade-idade das características da madeira e carvão vegetal.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Aspectos gerais sobre o gênero *Eucalyptus* e suas florestas plantadas

O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Mirtaceae*, de ocorrência natural na Austrália e possui cerca de 600 espécies adaptadas às diversas condições de clima e solo. Dessa grande diversidade de espécies, só duas não são originárias da Austrália: *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus deglupta*.

Esse gênero foi introduzido no Brasil no início do século XIX com a finalidade de ornamentação. Porém, somente no início do século XX que foi plantado com o objetivo comercial (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

Em 2020, a área total de árvores plantadas totalizou 9,55 milhões de hectares, um recuo de 1,4% em relação a 2019 (9,69 milhões de hectares). Desse total, a maioria (78%) é representada pelo cultivo de eucalipto, com 7,47 milhões de hectares. Os estados de Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina continuam sendo os maiores detentores de florestas plantadas no país (IBÁ, 2021).

Atualmente, inúmeras espécies e clones pertencentes aos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, com destaque para as espécies de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e seu híbrido, possuem grande notoriedade na produção de carvão vegetal. Assim, diversas pesquisas têm sido publicadas com o objetivo de melhoria na classificação e seleção de materiais genéticos superiores para essa finalidade (NEVES *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2017; SILVA; FORTES; SETTE JUNIOR, 2018; SOARES *et al.*, 2015). Esses estudos possuem grande importância, pois evidenciam a alta correlação das propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira em relação à produção do carvão vegetal.

No presente, a eucaliptocultura no Brasil é uma das mais avançadas do mundo servindo de referência para outros países, inclusive a Austrália. Os plantios florestais no Brasil se destacam quando o assunto é produtividade, com alto volume de produção anual de madeira por área e um curto ciclo. As mudanças climáticas pode ser um dos fatores que impactaram na queda de produtividade média por ano no plantio de eucalipto de 38,6 m<sup>3</sup>/ha, em 2019, para 36,8 m<sup>3</sup>/ha em 2020 (IBÁ, 2021).

Além das propriedades da madeira, deve-se considerar o crescimento ou incremento volumétrico nos programas de seleção de clones de *Eucalyptus*. O incremento volumétrico tem relação direta com a estimativa de massa seca, afetando, assim, a produtividade energética e, por consequência, a classificação dos clones (CARNEIRO *et al.*, 2014; TRUGILHO *et al.*, 2001).

Nas últimas décadas, a silvicultura clonal proporcionou avanços significativos na cultura do *Eucalyptus*, destaque para os clones híbridos do gênero, além de propiciar redução na idade de colheita, maior produção de madeira de melhor qualidade em menor tempo e por unidade de área; racionalização das atividades operacionais e redução nos custos de exploração e transporte. O aprimoramento das pesquisas em relação ao manejo, à exploração e melhoria das árvores como matéria-prima para diversas finalidades fez com que o Brasil se tornasse referência mundial na tecnologia florestal, com alta produtividade e considerando volume de madeira produzido por área ao ano. É uma das rotações mais curtas, considerando o tempo decorrido entre o plantio e a colheita das árvores do mundo (IBÁ, 2021).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de carvão vegetal no setor caiu 0,9% em 2020, chegando a 4,19 milhões de toneladas. O setor de árvores cultivadas tem participação em 94% da produção de carvão vegetal. O consumo do produto de fonte renovável caiu de 4,23 para 4,19 milhões de toneladas em 2020, com relação ao ano anterior. A maioria das 180 principais unidades produtoras de porte médio e grande de ferro-gusa, ferro-liga e aço no Brasil utilizam o carvão vegetal em seu processo de produção. O principal polo de consumo de carvão vegetal, com mais de 40% das empresas, encontra-se no estado de Minas Gerais (IBÁ, 2021).

### **3.2 Influência da idade nas características da madeira de eucalipto**

As propriedades da madeira são decorrentes de fatores genéticos, ambientais e de suas interações. A expressão fenotípica dos clones sofre influência da interação genótipo x ambiente; isso ocorre devido ao fato das condições climáticas, características do solo e o próprio material genético estarem ligados à produtividade, conseqüentemente, interferir na qualidade da madeira (ROSADO *et al.*, 2012). Como exemplo, a densidade da madeira sofre influência dentro de uma mesma espécie, pela idade, genótipo, índice de sítio, clima, localização geográfica, tratamentos silviculturais (VITAL, 1984), dentre outros fatores.

A idade é uma variável importante do manejo florestal por estar relacionada ao crescimento e à produtividade do povoamento, portanto, sendo parâmetro fundamental quando se pensa em florestas com finalidade energética, para que se alcance melhor rendimento no carvão vegetal. Além de tudo, a idade pode colaborar no planejamento e na composição dos custos da madeira, além de servir como base para avaliar o potencial produtivo do sítio.

Há complexidade na escolha da idade de corte de um povoamento já que, de maneira geral, as empresas a estipulam considerando apenas a produtividade florestal. Porém, não se deve

desconsiderar a rotação, o tipo de crescimento da espécie em questão, a vinculação com planos globais de abastecimento, o aumento em valor devido ao ganho em qualidade da madeira e o uso de diferentes taxas de juros (RODRIGUEZ; BUENO; RODRIGUES, 1997).

É indispensável a avaliação das características tecnológicas da madeira, uma vez que estas são influenciadas pelo incremento da idade, em função de alterações fisiológicas que ocorrem com o passar do tempo (CARNEIRO *et al.*, 2014). Por consequência, espera-se modificações também nas características do carvão vegetal. De modo geral, o carvão vegetal produzido com madeiras mais velhas, até uma determinada idade, irá apresentar maior densidade e resistência (CASTRO *et al.*, 2013).

O efeito da idade sobre algumas características da madeira já é conhecido, por exemplo, diversos autores observaram aumento na densidade básica da madeira com a maturidade da árvore (CASTRO *et al.*, 2016; NEVES *et al.*, 2013; RESQUIN *et al.*, 2019; SOARES *et al.*, 2015). Isso ocorre devido ao aumento da espessura da parede celular e da diminuição da largura das células (VITAL, 1984). Espécies que possuem maior densidade básica tenderão a apresentar maior densidade energética da madeira e são, portanto, mais propícias como combustível para ser utilizado na geração direta de energia, conforme sugerido por Protásio *et al.* (2013a).

O teor de lignina tende a diminuir com a idade da árvore (MORAIS *et al.*, 2017; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996), pois as espécies mais jovens tendem a apresentar maior proporção de madeira juvenil, que é mais rica em lignina que a madeira madura (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996). Entretanto, Neves *et al.* (2013), Protásio *et al.* (2012, 2014a) e Trugilho *et al.* (1997), observaram aumento do teor da lignina com a idade, afetando diretamente a qualidade e a produção de carvão vegetal, pois a lignina é mais estável termicamente e possui maior teor de carbono, assim é esperado que ocorra incremento do rendimento gravimétrico (PROTÁSIO *et al.*, 2012; TRUGILHO *et al.*, 1997).

Morais *et al.* (2017), Protásio *et al.* (2014a) e Trugilho, Lima e Mendes (1996) verificaram um decréscimo no teor de holocelulose com a maturidade das árvores, isto pode ser considerado uma tendência positiva para o uso bioenergético, pois a fração de carboidratos apresenta perfil mais instável, pouco resistente frente à degradação térmica e resultando em maiores porcentagens de gases não condensáveis e gases condensáveis. Os mesmos autores também observaram a tendência de estabilização do teor de holocelulose e lignina da madeira.

Correlacionaram este fato com o início de formação da madeira adulta, pois geralmente as características químicas da madeira estão propensas a variações iniciais na madeira juvenil, tendendo a valores mais estáveis na madeira adulta. Assim, sugere-se estudos referentes à delimitação da região de transição entre a madeira juvenil e adulta em clones de *Eucalyptus* spp.,

o que poderá ser de destaque no comportamento dos componentes moleculares da madeira com a idade e, conseqüentemente, ajudando na melhor seleção e avaliação dos materiais genéticos para a produção de energia.

Existe relação positiva entre a idade e o teor de extrativos (MORAIS *et al.*, 2017; NEVES *et al.*, 2013; SOARES *et al.*, 2015). Dependendo da sua estabilidade térmica, o aumento do teor de extrativos pode contribuir para o aumento do rendimento em carvão vegetal (SANTOS *et al.*, 2011). O aumento no teor de extrativos em função da idade do material lenhoso pode ser justificado, em razão do processo de cernificação, no qual ocorre a transformação do alburno em cerne. No trabalho de Morais *et al.* (2017), a partir dos 5 anos de idade se intensificou este processo para os materiais de *Eucalyptus grandis* e híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

Neves *et al.* (2013), Protásio *et al.* (2014a) e Soares *et al.* (2015) não encontraram correlação entre o poder calorífico superior e a idade da árvore, enquanto Kumar *et al.* (2011), verificaram aumento dessa característica em função da idade. Esses autores também constataram redução do teor de cinzas com a maturidade, o que pode ter contribuído com o aumento do poder calorífico. Já é bem definido na literatura que o teor de cinzas reduz com a idade (MORAIS *et al.*, 2017; NEVES *et al.*, 2013; PROTÁSIO *et al.*; 2014a; SANTANA *et al.*, 2012; SOARES *et al.*, 2015), tal fato ocorre provavelmente devido à diminuição da atividade fisiológica da árvore com a idade, exigindo, assim, menor presença de componentes minerais. Esse resultado é positivo, uma vez que os minerais são indesejáveis na produção de carvão vegetal e na geração direta de bioenergia.

### **3.3 Qualidade da madeira para a produção de carvão vegetal**

No uso siderúrgico, o carvão deve estar dentro de muitos parâmetros que estão diretamente ligados à qualidade da madeira (teor de umidade, densidade, composição química, forma, tamanho e diâmetro), do tipo do equipamento e das condições operacionais da carbonização (taxa de aquecimento, pressão e temperatura final) (NEVES *et al.*, 2011).

As propriedades físicas, químicas, anatômicas e mecânicas da madeira influenciam a produtividade e a qualidade do carvão vegetal e devem ser consideradas nos programas de seleção de clones de *Eucalyptus* para essa finalidade. O teor de umidade, teor de lignina e densidade básica, além das estimativas de massa seca e massa de lignina e o poder calorífico da madeira são propriedades geralmente utilizadas na determinação da qualidade do carvão vegetal para uso doméstico ou siderúrgico. Tais características são consideradas como os

principais índices de qualidade da madeira para a carbonização. Essa avaliação proporciona a diferenciação entre materiais genéticos com diferentes incrementos volumétricos e que estão relacionados com o seu uso energético (TRUGILHO *et al.*, 2001).

Com relação à densidade básica da madeira, diversos autores mencionaram a existência de forte correlação entre essa característica com a densidade do carvão vegetal (CASTRO *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2011; VALE *et al.*, 2001). A correlação é positiva, pois madeiras mais densas produzirão carvões com maiores valores de densidade relativa aparente. Este fato afetará positivamente a densidade energética, estoque de carbono fixo por volume e resistência à compressão, além de maior quantidade de massa enfiada, ou seja, melhor será o uso do volume interno do forno de carbonização e, conseqüentemente, maior será a produtividade da unidade de produção.

Castro *et al.* (2016) e Soares *et al.* (2014) encontraram correlação negativa entre a densidade básica e o teor de carbono fixo e, conseqüentemente, uma correlação positiva entre a densidade básica e o teor de materiais voláteis no carvão vegetal. Porém, os resultados encontrados por Santos *et al.* (2011), Trugilho *et al.* (2001) e Vale *et al.* (2001) foram inversos aos observados pelos autores anteriores. Para a produção de carvão vegetal é importante a escolha de materiais genéticos que apresentem madeira com maior teor de carbono fixo e menor teor de materiais voláteis.

A correlação entre a densidade básica da madeira e o rendimento em carvão tem comportamentos diferenciados na literatura, podendo ou não ter efeito significativo. Castro *et al.* (2016), analisando todos os clones utilizados no trabalho, verificaram que há correlação positiva entre a densidade básica da madeira e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, porém, Soares *et al.* (2014) e Vale *et al.* (2001) não encontraram correlação significativa, enquanto que Vital, Jesus e Valente (1986) observaram relação negativa. Portanto, verifica-se que existe muita controvérsia na literatura e a falta de definição entre essas duas propriedades ligadas à produção energética.

Associada à densidade básica, está a estimativa da quantidade de massa seca, que pode funcionar como indicador na seleção de clones em programas de melhoramento (BOTREL *et al.*, 2007) visando o uso energético da madeira.

A correlação entre o teor de lignina e o rendimento em carvão vegetal é relatada como positiva em diferentes trabalhos (BRITO; BARRICHELO, 1977; PEREIRA *et al.*, 2012; TRUGILHO *et al.*, 1997), assim como a correlação com a densidade do carvão (CASTRO *et al.*, 2016) e o teor de carbono fixo (BRITO; BARRICHELO, 1977; TRUGILHO *et al.*, 2001).

Brito e Barrichelo (1977), a partir da carbonização de diferentes espécies de *Eucalyptus*, encontraram o coeficiente de correlação de 0,78 entre o teor de carbono fixo e o teor de lignina.

A lignina é o componente químico molecular que mais contribui na formação do resíduo carbonáceo, pois sua estrutura química é complexa, possuindo alto grau de aromaticidade e, conseqüentemente, é uma macromolécula com elevada termoresistência (RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006; YANG *et al.*, 2007).

Em conjunto com o teor de lignina da madeira, deve-se considerar a qualidade desta macromolécula, ou seja, a relação entre as unidades siringil e guaiacil (S/G). De modo geral, a menor relação S/G ou maior proporção de unidades guaiacil contribuirá para o maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal (GOUVÊA *et al.*, 2015; PEREIRA *et al.*, 2013; SOARES *et al.*, 2015).

Na literatura, pode-se encontrar estudos que evidenciam correlação entre a relação S/G e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (PEREIRA *et al.*, 2013), assim como há pesquisas que não identificaram essa associação (ARAÚJO *et al.*, 2016; CASTRO *et al.*, 2016), o que sugere a necessidade de mais estudos sobre a influência da relação S/G para fins energéticos. Uma possível explicação para essa discordância pode estar relacionada às unidades estruturais do tipo guaiacil (G) do que propriamente a relação S/G, pois a maior quantidade de monômeros do tipo G não implicaria, necessariamente, em ocorrência de ligações mais estáveis termicamente dentro da macromolécula de lignina (ARAÚJO *et al.*, 2016).

No que se refere aos extrativos, no estudo de Santos *et al.* (2011) com quatro clones de *Eucalyptus*, apenas em um clone foi encontrada correlação com o rendimento em carvão vegetal (0,78). Resultado similar também foi verificado por Vital, Jesus e Valente (1986). Isso se deve, provavelmente, às diferenças nas composições químicas dos extrativos, em que algumas classes destes compostos podem favorecer a estabilidade térmica e, conseqüentemente, afetar positivamente o rendimento em carvão.

Os extrativos possuem composição diversificada ao contrário do que é verificado nos componentes químicos de maior quantidade como a celulose, hemiceluloses e a lignina, e independente da sua reduzida quantidade, podem ser utilizados na caracterização química da madeira (ROWELL *et al.*, 2005).

Soares *et al.* (2014) verificaram correlação positiva entre o teor de cinzas na madeira e no carvão vegetal. Do ponto de vista bioenergético, os minerais presentes nos combustíveis de biomassa são prejudiciais, pois podem formar incrustações nos equipamentos e nas tubulações quando a biomassa é queimada em fornalhas, além de diminuir o poder calorífico do material combustível (BRAND, 2010; PAULA *et al.*, 2011).

É válido mencionar que, a madeira de clones e espécies de *Eucalyptus*, geralmente apresentam baixo teor de cinzas, conseqüentemente, o carvão vegetal delas produzido também terá baixo conteúdo percentual de minerais (NEVES *et al.*, 2011; SANTANA *et al.*, 2012; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

Santos *et al.* (2011), trabalhando com quatro clones de *Eucalyptus*, em apenas um dos clones verificaram correlação positiva entre o poder calorífico superior (PCS) e o teor de carbono fixo e relação inversa entre PCS e teor de materiais voláteis e cinzas. Entretanto, no estudo de Santos *et al.* (2011) foi verificado, também, que o material genético 1 apresentou correlação negativa entre o poder calorífico e o teor de carbono fixo. Os autores concluem que esse resultado diferiu do normalmente encontrado na literatura usual. A correlação do poder calorífico com os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, tem explicação na composição química da madeira, pois o carbono é o principal elemento combustível e, assim, está relacionado ao carbono fixo do carvão vegetal. Logo, o maior poder calorífico no carvão está associado a carvões com maiores teores de carbono fixo (HUANG *et al.*, 2009; PAULA *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2012).

O poder calorífico é uma característica que sempre é utilizada na avaliação para fins energéticos, pois representa a expressão do quanto um combustível possui de energia ou o quanto de calor ele libera quando queimado completamente, ou seja, pode ser considerado como a medida da quantidade de calor liberado durante a sua combustão total. O poder calorífico sofre influência negativa da umidade, pois é inevitável que ocorra perda de calor pela evaporação da água, fase da secagem (fase endotérmica) do processo de combustão, que consome mais ou menos energia dependendo da quantidade água presente (QUIRINO *et al.*, 2005).

Desse modo, deve-se considerar a umidade como parâmetro na produção de carvão vegetal, uma vez que está relacionada ao gasto energético da carbonização (fase de secagem) e o consumo de lenha nos fornos para carbonizar a madeira. Isso possui conseqüências nas propriedades mecânicas do carvão, em decorrência do aparecimento de trincas e fissuras internas pela saída brusca da água na forma de vapor e devido à contração volumétrica.

No estudo de Oliveira (1988), com *Eucalyptus grandis*, as correlações entre as dimensões das fibras e rendimento gravimétrico do carvão foram negativas. Andrade (1993) ressaltou que há estreita correlação entre as propriedades do carvão vegetal e as características anatômicas da madeira que lhe deu origem. O autor afirmou que, o estudo entre anatomia (espessura da parede) e a densidade da madeira, propicia a escolha de espécies para a produção energética, amparado na escolha de madeiras de alta densidade e com fibras com parede celular espessa.

As dimensões das fibras utilizadas isoladamente, muitas vezes, não apresentam correlações significativas com a qualidade do carvão vegetal. Geralmente, considera-se quatro medidas fundamentais na avaliação da biometria das fibras da madeira: comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume. Com os valores das dimensões das fibras, é possível calcular alguns índices indicativos de qualidade. Tais índices podem ser usados na avaliação da qualidade e na determinação da associação com as características do carvão vegetal, auxiliando na identificação e seleção de madeiras mais aptas a esta finalidade, por exemplo, a fração parede (SANTOS, 2010).

### 3.4 Composição química estrutural da madeira

O entendimento da composição química da madeira é importante para a escolha do seu uso. Para fins energéticos é fundamental a quantificação dos teores de celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos, pois auxilia na classificação de clones de *Eucalyptus* para utilização da madeira em vários setores industriais.

A celulose é avaliada como o constituinte químico da madeira mais significativo, compondo de 40 a 45% da matéria seca das madeiras, encontra-se, de maneira principal, na parede secundária, é um polissacarídeo linear composto por unidades de  $\beta$ -D-anidroglicopiranoose, unidas por ligações glicosídicas do tipo  $\beta(1-4)$ . Por possuir estrutura cristalina, por meio das ligações de hidrogênio intra e intermoleculares, dando alta estabilidade à molécula de celulose, ela possui maior dificuldade de degradação, o que a diferencia das hemiceluloses que são fáceis de serem degradadas, dessa forma, sua decomposição é realizada na faixa de temperatura de 260 a 350°C (ROWELL *et al.*, 2005).

Em fornos de alvenaria, o processo de carbonização ocorre em temperaturas acima de 300°C, assim, a contribuição da celulose, nesse processo, é pouco expressiva. Utilizando temperatura de 400°C, a celulose contribui com 13% no rendimento do carvão (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

As hemiceluloses, da mesma forma que a celulose, pouco colaboram para o rendimento do carvão. Na temperatura de 450°C, as hemiceluloses representam cerca de 10% do rendimento do carvão vegetal (RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006).

Os extrativos são o grupo que contém diversos compostos químicos presentes na madeira, mas que não constituem a estrutura essencial dessa madeira, por exemplo, os polifenóis, óleos, gorduras, resinas, amido e ceras.

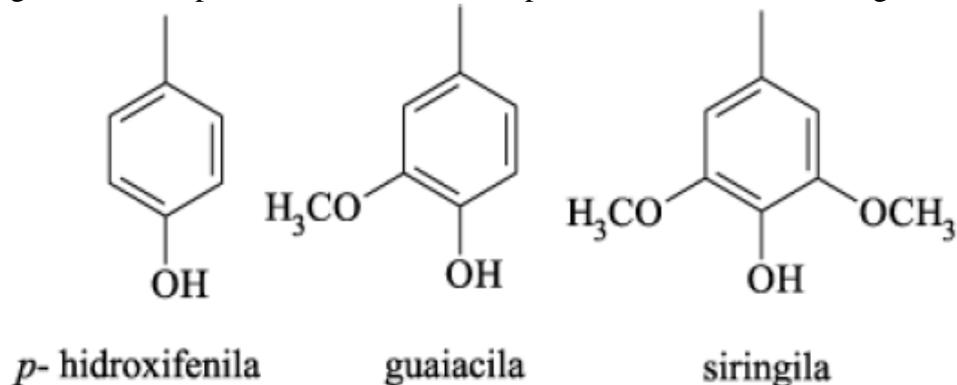
Em sua maioria, independente de folhosa ou conífera, a localização dos extrativos é no cerne, eles é o principal responsável na formação da cor, do cheiro, do sabor e durabilidade da madeira. Em geral, as madeiras não apresentam altos teores de extrativos e as madeiras de clima mais quente possuem maior teor de extrativos do que as madeiras de clima frio. A origem fenólica de alguns extrativos pode atuar no aumento do poder calorífico da madeira e do carvão, em virtude da presença do alto teor de carbono (ROWELL *et al.*, 2005).

A origem da lignina é resultado da condensação desidrogenativa de três álcoois precursores, sendo eles o trans coniferílico, trans sinapílico e p-cumarílico, os quais dão origem às subestruturas (unidades estruturais/monômeros) que compõem a macromolécula da lignina denominadas, respectivamente, guaiacilpropano (G), siringilpropano (S) e phidroxifenilpropano (H) (CHEN, 1992).

A proporção molar das unidades fenilpropanoídes, H, S e G, na planta depende, principalmente, do grupo vegetal. Em madeiras de coníferas predominam, basicamente, subestruturas do tipo guaiacil; em madeiras de folhosas, existe uma composição de quantidades significativas de subestruturas guaiacil (G) e siringil (S). Nas palhas de cereais e gramíneas, além de unidades guaiacílicas e siringílicas, encontram-se subestruturas do tipo p-hidroxifenil (H), todas em quantidades relevantes (CHEN, 1992).

A nomenclatura mais utilizada para lignina baseia-se na unidade básica fenilpropanoide,  $C_6C_3$ . O anel aromático é numerado, iniciando-se a contagem pelo carbono ligado à cadeia alifática,  $C_3$ , e é denominado de acordo com seus substituintes como guaiacil (G), siringil (S) e p-hidroxifenil (H) (SALIBA *et al.*, 2001). A estrutura do anel aromático e seus substituintes são representados na Figura 1.

Figura 1 - Principais unidades aromáticas presentes na molécula de lignina.



Fonte: Rowell *et al.* (2005).

É considerada como pirólise da madeira, a decomposição térmica de seus constituintes fundamentais, ou seja, a celulose, hemiceluloses e lignina. De modo geral, esse processo pode ser dividido em quatro fases: secagem, que ocorre na faixa de temperatura entre 50-150°C; a decomposição das hemiceluloses, em torno de 220-315°C; a decomposição da celulose, entre 315-400°C; e a degradação da lignina, que ocorre em amplo intervalo de temperatura (160 a 900°C) (YANG *et al.*, 2007). Os mesmos autores salientaram, ainda, que embora a degradação da lignina ocorra em ampla faixa de temperatura, sua velocidade de perda de massa é, em média, 13 vezes inferior àquela da celulose e xilana (YANG *et al.*, 2007).

O que promove essa diferença no comportamento térmico desses compostos da madeira são suas estruturas químicas, por exemplo, presença de ramificações, grau de polimerização, variedade e tipos de ligações químicas. As ligações C–C são mais resistentes à degradação química que as C–O–C. Portanto, existe a hipótese de que quanto maior for a quantidade de ligações C–C na molécula, mais resistente esta será durante os processos térmicos (SOLOMONS, 1996).

A lignina e os extrativos se destacam para o uso energético, pois apresentam correlação direta com o poder calorífico da madeira ou da biomassa lignocelulósica (TELMO; LOUSADA, 2011).

Segundo Telmo e Lousada (2011), 56,4% do poder calorífico pode ser explicado pelo teor de lignina e 43,6% pelo teor de extrativos. Esse resultado se dá em decorrência das diferentes composições químicas dessas moléculas, sendo que a lignina possui maior concentração de carbono e hidrogênio.

Nos trabalhos de Castro *et al.* (2013), Protásio *et al.* (2013a) e Trugilho *et al.* (2001), no qual foram estudados clones do gênero de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal, os autores observaram teores de lignina maiores que 30%. Esses resultados evidenciaram que alguns materiais genéticos de eucalipto, madeira de folhosa, plantados no Brasil alcançam valores semelhantes às coníferas.

Vale destacar que esta característica não deve ser considerada como único fator para a escolha de materiais genéticos para fins energéticos (TRUGILHO *et al.*, 2001). Alguns trabalhos demonstram a relação positiva entre o teor de lignina na madeira e o rendimento gravimétrico da carbonização (BRITO; BARRICHELO, 1977; PEREIRA *et al.*, 2012; TRUGILHO *et al.*, 1997). No entanto, outros autores não observaram esta correlação (CASTRO *et al.*, 2016; SOARES, 2014; TRUGILHO *et al.*, 2001). A possível justificativa desta controvérsia na literatura pode estar associada à composição da lignina, ou seja, a proporção entre os monômeros S, G e/ou H que compõem sua estrutura.

Diversos estudos têm como objetivo de caracterizar e quantificar as unidades monoméricas da lignina, devido à diversidade estrutural dessa macromolécula em diferentes gêneros vegetais ou, ainda, dentro de uma mesma espécie (ARAÚJO *et al.*, 2016; PROTÁSIO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2016; SOARES *et al.*, 2014). A quantificação estabelecida é a relação siringila/guaiacila (S/G), isto é, a proporção entre as unidades siringila e guaiacila presentes na lignina (SANTOS *et al.*, 2016).

No processo de polpação já é amplamente discutido a relação siringil/guaiacil (S/G) e a reatividade da lignina está relacionada com a frequência das suas unidades monoméricas. Assim, mais unidades do grupo siringil (S) e/ou elevadas relações S/G, têm como resultado o aumento da reatividade da lignina no processo de polpação. O índice de deslignificação é diretamente proporcional à relação S/G e não depende apenas da acessibilidade da lignina, mas de sua estrutura química (RODRIGUES *et al.*, 1999).

A maior reatividade do monômero siringila ocorre por consequência de sua estrutura menos condensada, pois no carbono cinco (C5) existe um grupo metoxílico (OCH<sub>3</sub>) ligado, o que impede a sua ligação com outras substâncias durante a polimerização (GOMIDE *et al.*, 2005).

Por outro lado, a unidade guaiacil apresenta um grupo metoxílico a menos no anel aromático (C3) e isso possibilita a ocorrência de ligações C=C, C-O-C e C-C entre anéis aromáticos e, conseqüentemente, maior será a condensação da macromolécula de lignina (SOARES *et al.*, 2015). Estas ligações apresentam elevada estabilidade, ocasionando maior polimerização e, conseqüentemente, maior quantidade de energia será necessária para quebrar as mesmas (ARAÚJO *et al.*, 2016; PEREIRA *et al.*, 2013).

Dessa forma, no cenário energético, particularmente na produção de carvão vegetal, alguns estudos observaram que a menor relação S/G da lignina ou maior proporção de unidades guaiacil (GOUVÊA *et al.*, 2015; PEREIRA *et al.*, 2013; SOARES *et al.*, 2015), podem estar relacionadas ao maior rendimento gravimétrico da carbonização, entretanto, vale salientar que ainda são necessários mais estudos acerca do assunto.

Na Tabela 1 estão alguns intervalos da relação S/G observados em trabalhos publicados por vários autores, para a madeira de eucalipto.

Tabela 1 - Estudos da relação S/G da madeira de Eucalyptus mencionadas na literatura.

Referência	Material biológico	Idade (anos)	Relação S/G
Castro <i>et al.</i> (2013)	<i>Eucalyptus</i> sp.	3, 4 e 5	2,30 a 3,20
Pereira <i>et al.</i> (2013)	<i>E. camaldulensis</i> e <i>E. urophylla</i>	7,5	2,33 a 2,95
Soares <i>et al.</i> (2014)	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	3, 5 e 7	2,30 a 3,50
Gouvêa <i>et al.</i> (2015)	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	3	2,31 a 3,05
Araújo <i>et al.</i> (2016)	<i>Eucalyptus</i>	6	2,79 a 3,90
Santos <i>et al.</i> (2016)	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	7	2,60 a 3,25
Protásio <i>et al.</i> (2017)	<i>Eucalyptus</i> spp.	6,75	2,53 a 4,03

Fonte: Do Autor (2021).

Os minerais ou cinzas são constituintes inorgânicos que não participam do processo de combustão da biomassa, representando 1% da massa seca da madeira. Alta porcentagem de cinzas é prejudicial ao carvão, ou seja, os minerais são indesejáveis para a produção de carvão vegetal, destinado a fins energéticos, pois, após a carbonização, é formado resíduo, dado que essa propriedade não é degradada no processo; por consequência, contribui para a redução do PCS do carvão vegetal e pode tornar o carvão quebradiço, menos maleável e com campos favoráveis à propagação de trincas e fissuras (ANDRADE, 1993).

### 3.5 Processo de carbonização e a qualidade do carvão vegetal

A pirólise lenta ou carbonização, ocorre na presença controlada de oxigênio, com o objetivo de eliminar a maior parte do oxigênio e do hidrogênio pela ação do calor e, com isso, proporcionar aumento na concentração do carbono na estrutura residual, que é o carvão vegetal. Na madeira, os teores de carbono e oxigênio são, em média, respectivamente, de 49% e 44%. Depois de carbonizada, esses teores passam, em média, no carvão vegetal, para 82% e 13,7%. O carvão retém 57% do carbono da madeira, enquanto 89% do oxigênio são volatilizados (SANTOS, 2010).

As etapas da pirólise são influenciadas pela composição química da madeira e não ocorre de maneira simultânea, pois as hemiceluloses se degradam primeiro, sob temperaturas que variam entre 190°C e 360°C, seguidas da celulose (315-400°C) e da lignina a partir de 100°C até temperaturas próximas de 900°C (PEREIRA *et al.*, 2013).

De acordo com Trugilho *et al.* (2001), a primeira etapa da carbonização ocorre na faixa de temperatura entre 100°C e 200°C, caracterizada predominantemente como fase de secagem da madeira, que é um processo endotérmico. Na faixa de 200°C e 280°C acontece a segunda etapa, com a liberação de ácido acético, metanol, H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, entre outros e continua sendo um processo predominantemente endotérmico. Na terceira etapa, representada na faixa de temperatura entre 280°C e 500°C, ocorre predominância de reações exotérmicas, liberação de gases, como CO, CH<sub>4</sub> e alcatrões e, sob temperaturas acima de 500°C, ocorre a liberação de pequenas quantidades de voláteis, especialmente o H<sub>2</sub>.

O processo de carbonização da madeira gera, além do carvão vegetal produzido, o líquido pirolenhoso, alcatrão vegetal e gases não condensados. O aumento no rendimento gravimétrico em carvão vegetal tem como consequência a redução das emissões de gases jogados na atmosfera, uma vez que a emissão de gases e vapores produzidos durante o processo é diretamente associada ao rendimento em carvão vegetal (CARDOSO *et al.*, 2010).

Vale destacar que, desde os pequenos produtores até as empresas da cadeia do carvão vegetal, atualmente, devido à nova legislação, buscam por novas tecnologias e processos de carbonização utilizando o sistema de queima dos gases gerados para a diminuição do seu potencial poluente e produzir em bases mais sustentáveis, além de aproveitar melhor a sua capacidade energética. A energia gerada (ar quente) pode ser revertida em benefício do processo de carbonização, especialmente na fase de secagem da madeira, reduzindo a umidade da matéria-prima e aumentando o rendimento gravimétrico em carvão, ou pode ser utilizada em sistemas de co-geração.

Alguns fatores afetam a carbonização interferindo no seu rendimento e na qualidade do produto final; em relação ao carvão vegetal, por exemplo, o teor de carbono fixo, a densidade e reatividade, entre outros. Dentre esses fatores, ressalta-se a temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento, a pressão e o tamanho da peça de madeira a ser carbonizada.

O aumento da temperatura final no processo de carbonização pode causar a diminuição da fração sólida (TRUGILHO; SILVA, 2001), que é o carvão vegetal e, conseqüentemente, ocorrerá aumento dos produtos gasosos e do teor de carbono fixo no produto sólido. Na Tabela 2 é possível verificar o comportamento do aumento da temperatura em relação à composição elementar do carvão, rendimento gravimétrico e teores de carbono fixo e materiais voláteis.

Tabela 2 - Composição elementar, imediata e rendimento de carvão em função da temperatura de carbonização.

Temperatura final de carbonização (°C)	Composição elementar			Rendimento (%) <sup>1</sup>	Análise química imediata	
	C (%)	H (%)	O (%)		CF (%)	MV (%)
200	52,3	6,3	41,4	91,8		
300	73,2	4,9	21,9	51,4	68	31
400	82,7	3,8	13,5	37,8		
500	89,2	3,1	6,7	31,0	86	13
600	92,2	2,6	5,2	29,1		
700	92,8	2,4	4,8	27,8	92	7
800	95,7	1,0	3,3	26,7		
900	96,6	0,7	3,2	26,6		
1000	96,4	0,5	2,9	26,5		

CF: teor de carbono fixo; MV: teor de materiais voláteis.

Fonte: Gomes (2011).

A taxa de aquecimento tem grande influência na formação do carvão vegetal, alterando a estrutura deste. Em consequência do prolongado aquecimento e altas temperaturas, tendem a produzir um carvão mais friável, causam fissuras e trincas, com isso há o aumento do volume de poros, assim, reduz a área superficial específica (ISBAEX, 2014).

As maiores taxas de aquecimento podem causar a diminuição do rendimento gravimétrico nos teores de materiais voláteis e na densidade aparente. Entretanto, na pirólise realizada em baixa taxa de aquecimento verifica-se maior taxa de decomposição térmica dos componentes da biomassa e redução na velocidade de saída dos compostos recém-formados do sistema, uma vez que é prolongado o tempo em que a temperatura final será alcançada.

A pressão também é indicador de processo que influencia o rendimento da carbonização. A atuação positiva da pressão em relação ao rendimento em carvão origina-se da maior concentração da fase gasosa, composta pelos voláteis, no interior do reator de carbonização, e não simplesmente pelo aumento de pressão do sistema. Pressões maiores, inclusive, podem melhorar a transferência de calor dentro do reator, gerando carvão mais uniforme (de cima a baixo) e diminuindo o tempo para o aquecimento (GOMES, 2011).

No setor siderúrgico, o carvão vegetal é utilizado como termorredutor do minério de ferro, para a produção de ferro gusa, aço e de outras ligas metálicas. Apresenta menos impurezas do que o coque metalúrgico (enxofre e cinzas), o que resulta num ferro gusa menos quebradiço, mais resistente e maleável para o forjamento (FREDERICO, 2009).

Contudo, o rendimento do processo de carbonização é baixo. Isso ocorre, uma vez que existem duas questões para alcançar o carvão vegetal de boa qualidade, que são a

homogeneidade da madeira utilizada e o controle das variáveis do processo utilizado na obtenção do carvão. A escolha de madeira originária de florestas plantadas e a melhoria em equipamentos e métodos de produção, juntamente ao aperfeiçoamento da mão de obra, podem contribuir para minimizar esses entraves. É importante salientar que o carvão vegetal possui propriedades muito variáveis e essa variabilidade gera excesso de desperdício do material, pois prejudica a operação dos altos fornos siderúrgicos (CASTRO *et al.*, 2013; PEREIRA *et al.*, 2013).

Pesquisas para melhor conhecimento das propriedades do carvão são de grande interesse, já que ajuda na escolha de madeira com propriedades desejadas à conversão energética. O carvão vegetal pode ser dividido em três frações: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas; que podem ser obtidos pela análise química imediata. Outras características importantes são a densidade relativa aparente, o poder calorífico e a densidade energética.

O teor de materiais voláteis é a matéria volátil residual do carvão, que é composta principalmente de hidrogênio, hidrocarbonetos, CO, CO<sub>2</sub>. Nos trabalhos de Assis *et al.* (2012), Castro *et al.* (2016) e Protásio *et al.* (2014b), observaram valores entre 18,50 a 25,40% para o teor de materiais voláteis em clones de *Eucalyptus*.

Segundo Santos (2008), porcentagem inferior a 25% para o teor de materiais voláteis é desejável para a finalidade energética, devido ao seu comportamento inversamente proporcional ao teor de carbono fixo no carvão, afetando, assim, a eficiência do redutor durante as operações no alto forno. Em contraponto, essa propriedade atua na estabilidade da chama e na velocidade de combustão, visto que gera aumento da permeabilidade da carga no alto forno e a diminuição da reatividade do carvão vegetal. Logo, se faz necessário uma porcentagem de materiais voláteis no carvão para uso siderúrgico.

O carbono fixo é responsável pela formação da massa amorfa. De acordo com Santos (2008), o carvão vegetal para uso siderúrgico deve apresentar teor de carbono fixo entre 70% e 80%. Ao analisar o teor de carbono fixo no carvão da madeira do gênero *Eucalyptus*, Soares *et al.* (2015) e Trugilho *et al.* (2001) encontraram valores variando entre 76,85% e 81,50%, dentro do padrão citado por Santos (2008). Ressalta-se que, Soares *et al.* (2015) e Trugilho *et al.* (2001) trabalharam com a mesma taxa de aquecimento e temperatura final. Além desses fatores, a composição química da madeira pode afetar nesses percentuais.

O teor de cinzas é o resíduo de óxidos minerais obtido pela combustão completa do carvão. Geralmente, o carvão vegetal de clones ou espécies de *Eucalyptus* possuem teor de cinzas inferior a 1% (ASSIS *et al.*, 2012; NEVES *et al.*, 2011; ; REIS *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2011). Para o teor de cinzas, menores quantidades são desejadas no carvão vegetal,

dado que os minerais não sofrem o processo de combustão e, assim, diminuem o valor calórico do combustível, além de aumentar a corrosão dos equipamentos utilizados na conversão energética, principalmente em sistemas termoquímicos (BRAND, 2010; PAULA *et al.*, 2011; REIS *et al.*, 2012). O alto teor de cinzas no carvão vegetal pode provocar o acúmulo de impurezas no centro das peças do metal solidificado, promovendo variações nas propriedades do ferro gusa (ASSIS *et al.*, 2012; NEVES *et al.*, 2011).

A densidade é um parâmetro importante na avaliação da qualidade do carvão vegetal, pois determina o volume ocupado pelo redutor no alto forno siderúrgico. Quanto mais elevada a densidade do carvão vegetal, maior será a utilização do volume do alto forno e maior o tempo de residência da carga metálica no equipamento, além de maior capacidade de carga em termos de carbono por volume. Não havendo prejuízo para as outras propriedades, a densidade do carvão deve ser a maior possível (PEREIRA *et al.*, 2016).

Reis *et al.* (2012) relataram densidade aparente para o carvão vegetal da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla*, aos 84 meses, de 326 kg m<sup>-3</sup>. Protásio *et al.* (2014b) encontraram densidade aparente média de 401 kg m<sup>-3</sup> para o carvão vegetal de dois clones de *Eucalyptus* spp, na idade de 58 meses.

Vale salientar que essa característica é importante para o uso siderúrgico, pois quanto maior a densidade do carvão maior a quantidade de carbono fixo por unidade de volume e maior a resistência do carvão (menor fiabilidade), ocasionando maior produtividade dos altos fornos e menor risco de ocorrência de impermeabilidade de carga no mesmo.

O carvão vegetal possui maior densidade energética que a madeira que lhe deu origem, (PEREIRA *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2014b) para clones de *Eucalyptus*. Entretanto, o carvão vegetal utilizado como biorredutor geralmente apresenta densidade energética inferior se comparado aos combustíveis fósseis (JESUS *et al.*, 2017). No entanto, os combustíveis fósseis dispõem de fatores negativos no âmbito ambiental, por exemplo, não é uma fonte renovável, aumenta os teores de enxofre que podem causar chuva ácida e dióxido de carbono, principal gás do efeito estufa (ASSIS *et al.*, 2012; NEVES *et al.*, 2011; REIS *et al.*, 2012).

Poder calorífico: está relacionado ao número de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível, sendo expresso, geralmente, em kcal/kg, para combustíveis sólidos, como o carvão.

A quantificação do poder calorífico é fundamental para se avaliar o potencial energético de combustíveis de biomassa (BRAND, 2010). O poder calorífico superior do combustível está diretamente relacionado com sua composição química elementar (BRAND, 2010; HUANG *et*

*al.*, 2009; PROTÁSIO *et al.*, 2011a) e intimamente relacionado com o percentual de carbono fixo (PROTÁSIO *et al.*, 2011b; SANTOS *et al.*, 2011; VALE *et al.*, 2001).

Protásio *et al.* (2014b) encontraram valor médio de  $7745 \text{ kcal.kg}^{-1}$  para o poder calorífico superior do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 46 e 58 meses de idade. Neves *et al.* (2011) obtiveram valor médio de  $7654 \text{ kcal.kg}^{-1}$  para clones de eucalipto em diferentes locais de cultivo e idades. Esses valores podem ser considerados similares, pois, para fins de geração de energia, somente diferenças maiores que  $300 \text{ kcal kg}^{-1}$  no poder calorífico dos combustíveis são realmente valores que os diferenciam (BRAND, 2010). No caso do carvão vegetal, tal fato é válido somente para as mesmas condições de carbonização.

Verifica-se, ainda, que existe correlação direta e positiva entre o teor de carbono fixo e o poder calorífico superior, sendo o contrário observado para o teor de materiais voláteis e essa propriedade energética (TRUGILHO; SILVA, 2001). Pelo fato do carbono fixo ser o componente em maior quantidade no carvão vegetal, conclui-se que quanto maior o teor de carbono fixo maior será a entalpia de combustão e o seu valor calórico. Isso pôde ser observado no trabalho Reis *et al.* (2012) para os carvões vegetais de clone de *Eucalyptus urophylla*.

Umidade: o carvão vegetal deve apresentar baixa umidade. A umidade presente no carvão no interior do alto forno é vaporizada, exigindo maior quantidade de calor dos gases para vaporizar a água; como consequência, mais reações de combustão serão necessárias e, com isso, mais carvão será consumido (BRITO, 1993).

Outra consequência observada é que a maior quantidade de umidade na madeira causa o desequilíbrio na eficiência do processo, em virtude do aumento da temperatura necessária para compensar a temperatura dentro do forno de carbonização (BRITO, 1993).

Estima-se que a produção do alto forno fique comprometida em cerca de 10% com cargas de umidade entre 8% e 20%. A perda de umidade acarreta também alterações nas características físicas e mecânicas, pois a eliminação da água gera fissuras e quebras, reduzindo o tamanho médio das partículas e aumentando a quantidade de finos (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Material biológico, amostragem e cubagem das árvores

Para a realização do trabalho, foram utilizadas a madeira de três clones de *Eucalyptus urophylla*, provenientes de plantios comerciais pertencentes à empresa Plantar, localizados nos municípios de Curvelo e Felixlândia, estado de Minas Gerais (Tabela 3). O município de Felixlândia se situa a 45 km a norte-oeste de Curvelo, essa distância entre os plantios não foi levada em consideração na análise de dados.

Cinco árvores de diâmetro médio por idade foram selecionadas aleatoriamente para o estudo, com área útil de de 9,0 m<sup>2</sup>, totalizando 90 árvores. A coleta foi realizada em uma única vez e em conjunto para as idades de 1 a 6 anos para o clone 2 e 1 a 5 anos para os clones 1 e 3, a idade de 6 anos para os clones 1 e 3 foi realizada um ano depois.

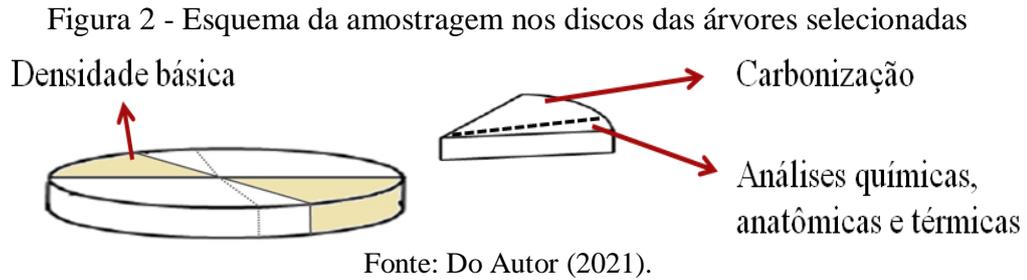
Tabela 3 - Identificação do material genético utilizado.

Clone	Idade (anos)	Município
1	1, 4, 5 e 6	Curvelo
1	2 e 3	Felixlândia
2	1 a 6	Curvelo
3	1 e 2	Felixlândia
3	3 a 6	Curvelo

Fonte: Do Autor (2021).

De cada árvore foram retirados sete discos correspondentes a 0, 2, 10, 30, 50, 70 e 100% da altura comercial do tronco (DOWNES *et al.*, 1997), definidos até diâmetro mínimo de 4,0 cm com casca. Em todos os discos, retiraram-se duas cunhas opostas, utilizadas para a determinar a densidade básica da madeira. As cunhas restantes foram utilizadas para as demais análises (anatômica, química e térmica) na madeira e carbonização em escala de laboratório.

Nas análises e carbonização da madeira, utilizaram-se amostras compostas, ou seja, uma amostra por árvore com material obtido em todas as posições longitudinais de amostragem.



## 4.2 Características de crescimento da árvore

Após o corte, as árvores foram cubadas nas posições fixas de 0,10, 0,70, 1,30, 2,0 m e, a partir desta, a cada 2 metros até a altura comercial. Posteriormente, o volume individual, com e sem casca, foi estimado utilizando-se a equação de Smalian.

Os valores médios para as características de crescimento da árvore encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios das características de crescimento dos clones.

Clone	Idade	Local	Hc	DAPcc	Vsc	Vcc
1	1	Curvelo	6,62	7,64	0,015502	0,014102
	2	Felixlândia	11,52	10,70	0,046580	0,057679
	3	Felixlândia	16,46	13,20	0,101621	0,123038
	4	Curvelo	17,94	13,57	0,111555	0,134449
	5	Curvelo	24,45	16,48	0,225917	0,259728
	6	Curvelo	25,92	17,91	0,280465	0,321164
	CV	-		40,11	26,30	73,59
Clone	Idade		Hc	DAPcc	Vsc	Vcc
2	1	Curvelo	5,82	6,89	0,011394	0,014102
	2	Curvelo	13,40	11,33	0,061949	0,073283
	3	Curvelo	14,46	10,47	0,058268	0,068182
	4	Curvelo	18,58	15,02	0,145557	0,169240
	5	Curvelo	24,24	17,21	0,253470	0,290034
	6	Curvelo	23,04	15,81	0,201663	0,228895
	CV	-		38,39	28,33	71,57
Clone	Idade		Hc	DAPcc	Vsc	Vcc
3	1	Felixlândia	1,96	3,69	0,001601	0,002147
	2	Felixlândia	10,16	8,97	0,031104	0,038323
	3	Curvelo	15,56	11,89	0,076781	0,089314
	4	Curvelo	18,88	14,43	0,137737	0,157842
	5	Curvelo	24,94	17,18	0,251528	0,282425
	6	Curvelo	25,96	18,10	0,297219	0,331963
	CV	-		52,32	40,78	83,95

Hc = altura comercial (m); DAPcc = diâmetro altura do peito (cm); Vsc = volume individual sem casca (m<sup>3</sup>); Vcc = volume individual com casca (m<sup>3</sup>).

Fonte: Do Autor (2021).

### 4.3 Análises das características da madeira

Para a determinação das propriedades avaliadas da madeira, adotou-se os procedimentos contidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Análises das características da madeira.

Análises	Procedimentos
Densidade básica (DB)	NBR 11941 (ABNT, 2003)
Poder calorífico superior (PCS)	ASTM E711-87 (ASTM, 2004)
Densidade energética (DEm)	$DEm = \frac{DB \times PCS}{1000}$
Estimativa de massa seca (MS)	$MS = V_{sc} \times DB$
Componentes elementares (C, H e N)	Analizador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube)
Oxigênio (O)	$O = 100 - C - H - N - S - CIZ$
Teor de extrativos em acetona (EXT)	NBR 14853 (ABNT, 2010)
Teor de lignina insolúvel	Método Klason por Gomide e Demuner (1986)
Teor de lignina solúvel	Goldschimid (1971)
Teor de lignina total (LIG)	$LIG = \text{Lignina insolúvel} + \text{Lignina solúvel}$
Relação siringil/guaiacil (S/G)	Lin e Dence (1992)
Teor de cinzas (CIZ)	NBR 13999 (ABNT, 2017)
Teor de holocelulose (HOLO)	$HOLO = 100 - LIG - EXT - CIZ$
Individualização das fibras	Dadswell (1972)
Espessura da parede celular da fibra (EP)	$EP = \frac{\text{Largura da fibra} - \text{Diâmetro do lume da fibra}}{2}$
Fração parede (FP)	$FP = \frac{2 \times \text{Espessura da parede celular da fibra}}{\text{Largura da fibra}} \times 100$

em que,  $V_{sc}$  é o volume individual sem casca ( $m^3$ ); C é o teor de carbono da madeira; H é o teor de hidrogênio da madeira; N é o teor de nitrogênio da madeira.

Fonte: Do Autor (2021).

Para a análise termogravimétrica da madeira, foram selecionadas as árvores que representam a densidade básica média em cada idade, sendo realizada no aparelho TGA-60, da marca Shimadzu. As análises foram conduzidas sob atmosfera de gás nitrogênio com vazão constante de  $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  e com cerca de 4 mg de amostra de madeira de granulometria classificada entre as peneiras de 200 e 270 mesh. As curvas termogravimétricas partiram da temperatura ambiente até  $600^\circ\text{C}$ , com taxas de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ .

#### 4.4 Carbonização e análises das características do carvão vegetal

As carbonizações da madeira foram realizadas em forno elétrico de laboratório conectado a um condensador resfriado a água, o qual é acoplado ao frasco coletor de gases condensáveis. As amostras foram previamente secas em estufa a  $103\pm 2^\circ\text{C}$  e introduzidas em reator metálico com dimensões nominais de 30 cm de comprimento e 12 cm de diâmetro.

O tempo total da carbonização foi de, aproximadamente, 5,7 horas, com taxa de aquecimento de  $60^\circ\text{C h}^{-1}$ . A carbonização iniciou à temperatura de  $100^\circ\text{C}$  até temperatura máxima de  $380^\circ\text{C}$ , com tempo de residência de 60 minutos.

Após as carbonizações, foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, todos em relação à massa seca de madeira (Tabela 6).

As propriedades e rendimentos gravimétricos dos produtos da carbonização foram determinados de acordo com os procedimentos apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Análises das propriedades do carvão vegetal.

Análises	Procedimentos
Rendimento gravimétrico (RGCV)	$\text{RGC} = \frac{\text{Massa de líquido}}{\text{Massa de madeira}} \times 100$
Rendimento em líquido pirolenhoso (RLP)	$\text{RLP} = \frac{\text{Massa de carvão}}{\text{Massa de madeira}} \times 100$
Rendimento em gases não condensáveis (RGGNC)	$\text{RGGNC} = 100 - \text{RGC} - \text{RLP}$
Densidade relativa aparente (DRA)	NBR 11941 (ABNT, 2003)
Poder calorífico superior (PCS)	ASTM E711-87 (ASTM, 2004)
Densidade energética do carvão vegetal (DE <sub>cv</sub> )	$\text{DE}_{cv} = \frac{\text{DRA} \times \text{PCS}}{1000}$
Componentes elementares (C, H e N)	Analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube)
Oxigênio (O)	$\text{O} = 100 - \text{C} - \text{H} - \text{N} - \text{S} - \text{CIZ}$
Química imediata	ASTM D1762-84 (ASTM, 2007)
Teor de carbono fixo (CF)	$\text{CF} = 100 - \text{MV} - \text{CIZ}$
Consumo específico de madeira (CE)	$\text{CE} = \frac{1}{\text{DB} \times \frac{\text{RGCV}}{100}}$
Eficiência energética (EE)	$\text{EE} = \text{RGCV} \times \frac{\text{PCS carvão}}{\text{PCS madeira}}$

em que, C é o teor de carbono do carvão vegetal; H é o teor de hidrogênio do carvão vegetal; N é o teor de nitrogênio do carvão vegetal; CIZ é o teor de cinzas; MV é o teor de materiais voláteis.

Fonte: Do Autor (2021).

#### 4.5 Delineamento estatístico e análises de dados

Na avaliação do experimento, foi adotado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), disposto em parcelas subdivididas, em que o efeito da parcela é a idade e da subparcela o clone, com cinco repetições. O modelo estatístico foi realizado conforme a Equação 1.

$$Y_{ij} = \mu + I_i + \varepsilon_i + C_j + (I \times C)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

em que,  $Y_{ij}$  é a observação do efeito da  $i$ -ésima idade do  $j$ -ésimo clone,  $\mu$  é um valor inerente a todas as observações,  $I_i$  é o efeito da  $i$ -ésima idade,  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório a,  $C_j$  é o efeito do  $j$ -ésimo clone,  $(I \times C)_{ij}$  é o efeito da interação idade x clone e  $\varepsilon_{ij}$  é o erro aleatório b.

Preliminarmente, foram aplicados os testes de Levene ( $p \leq 0,05$ ) e Shapiro-Wilk ( $p \leq 0,05$ ) para verificar a homogeneidade da variância e a normalidade dos dados. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). A análise de correlação de Pearson foi usada para avaliar a relação entre as propriedades da madeira. O efeito significativo da idade nas características da madeira foi avaliado por meio de análise de regressão, considerando modelos lineares simples e múltiplos. O teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ) foi utilizado para verificar a similaridade dos clones dentro de cada idade. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o *software* R, versão 3.4.3 (R CORE TEAM, 2017).

Foi realizada a análise de correlação canônica, considerando os dados originais observados nas idades de 4, 5 e 6 anos (idades mais próximas a idade de corte) para verificar as associações existentes entre o primeiro grupo de características do carvão vegetal (densidade relativa aparente, rendimento gravimétrico, poder calorífico, carbono fixo, consumo específico de madeira e eficiência energética) com o segundo grupo formado pelas característica da madeira (teor de extrativos e lignina, relação S/G da lignina, teor de guaiacil, massa seca, densidade energética e fração parede). O primeiro grupo representa as variáveis independentes (U) e, o segundo, as dependentes (V). Foram estimadas as cargas canônicas cruzadas que representam a correlação entre uma variável original de um determinado grupo e a variável estatística canônica do outro grupo. O *software* Genes foi utilizado na análise dos dados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Interação clone x idade nas propriedades da madeira

Houve efeito da interação clone x idade para todas as características avaliadas, exceto para o poder calorífico superior (PCS) e para o teor de lignina (LIG) nas idades avaliadas (Tabelas 16, 17 e 19). Interação significativa indica que existe dependência entre os fatores e que se deve fazer o seu desdobramento e avaliação de um efeito dentro do outro e optou-se por fazer a avaliação do efeito da idade dentro de clone.

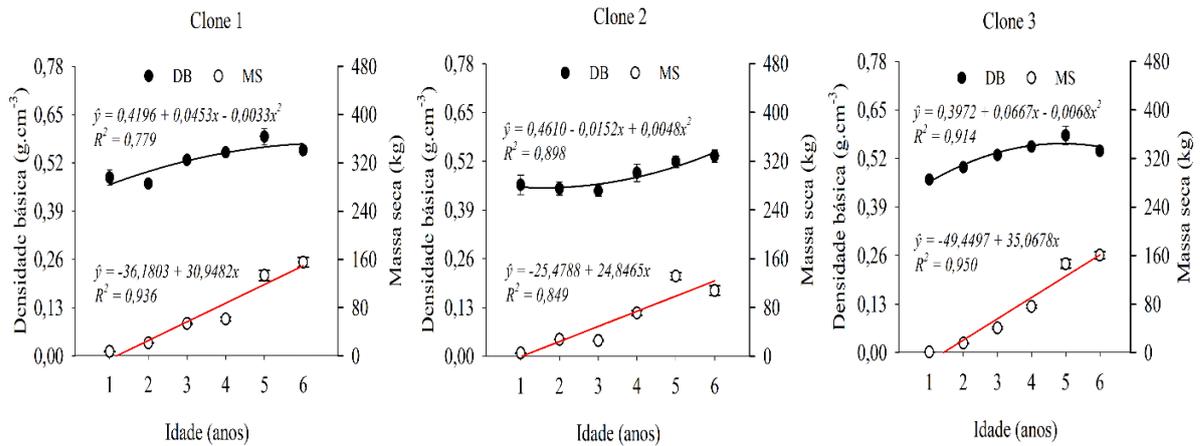
Os modelos quadrático e linear simples foram os que apresentaram os melhores ajustes e definiram o comportamento da densidade básica e da massa seca em função da idade, respectivamente (Figura 3).

Os clones 1 e 3 apresentaram comportamento similar, maiores valores médios de densidade básica e massa seca e tendência de aumento com a idade. O clone 2, apesar da tendência de aumento na densidade básica, apresentou leve redução da massa seca na idade de 6 anos, esse fato ocorreu devido à redução do volume, o que pode ser verificado na Tabela 16.

Este resultado indica que, enquanto os clones 1 e 3 podem ser colhidos em idade mais avançada (> 6 anos), o clone 2 deve ser colhido mais precocemente (< 6 anos). Essa tendência pode ser explicada pela amostragem do material, já que o material aos 6 anos dos clones 1 e 3 foram coletados posteriormente.

Nos três clones o maior incremento em massa seca ocorreu do quarto para o quinto ano e está relacionado com o aumento do incremento volumétrico e da densidade básica da madeira.

Figura 3 - Variação da densidade básica da madeira (DB) e massa seca (MS).



Fonte: Do Autor (2021).

De modo geral, ocorreu tendência de aumento da densidade básica da madeira com a idade das árvores. Este fato está associado às modificações progressivas nas estruturas celulares que compõem o lenho, especialmente pelo aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células (RESQUIN *et al.*, 2019; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996), o que influenciou diretamente na densidade energética (Figura 4) e, conseqüentemente, se espera impacto na mesma direção nas propriedades do carvão vegetal.

Diferenças significativas nos incrementos volumétricos das árvores resultam em grandes alterações nas estimativas de massa seca. Este fato contribui decisivamente para que as estimativas de incremento de massa seca sejam também muito variáveis entres as idades, apesar da ocorrência de diferenças nas densidades básicas da madeira, que geralmente acontecem em menor magnitude.

Como a siderurgia necessita de carvão mais denso, esses genótipos com grande incremento volumétrico e baixa densidade básica da madeira não são de interesse, porém, tais genótipos podem ser utilizados para a geração direta em termoeletricas.

Dessa forma, os resultados apresentados no presente trabalho confirmam, também, a influência da idade das árvores na melhoria da qualidade da madeira, em relação à densidade básica, com vistas à produção de carvão vegetal.

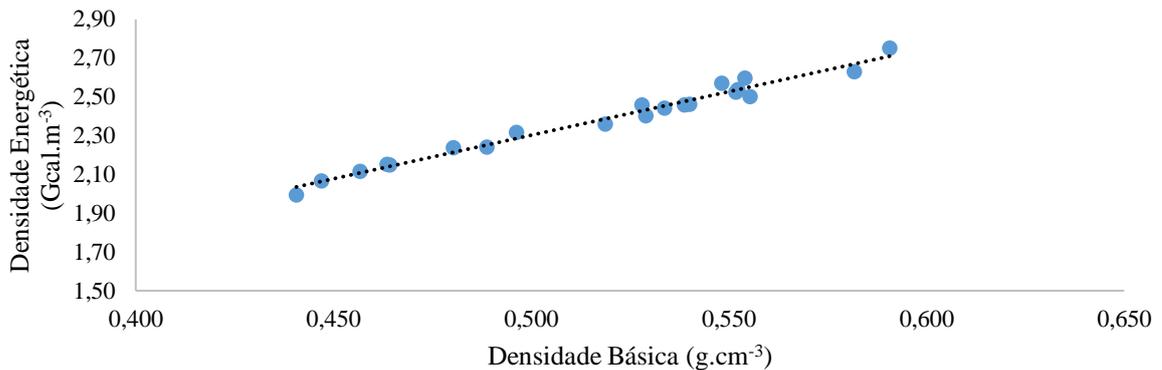
Para a produção de bioenergia, são recomendáveis maiores valores de densidade da madeira, uma vez que há relação direta entre essa propriedade e a produção de energia. Esse fator afeta os custos da operação, pois madeira de alta densidade gera carvão de alta densidade, reduzindo o custo de transporte e fornece maior rendimento, por exemplo (SANTOS *et al.*, 2012).

Associar a maturação da madeira em função da idade é uma etapa importante na seleção e avaliação de clones de *Eucalyptus*, visando a melhor escolha para otimizar a

produção bioenergética, especialmente para combustão direta, pois quanto maior for a densidade energética, maior será a disponibilidade de energia por volume.

A Figura 4 mostra a relação funcional entre a densidade básica e a densidade energética da madeira.

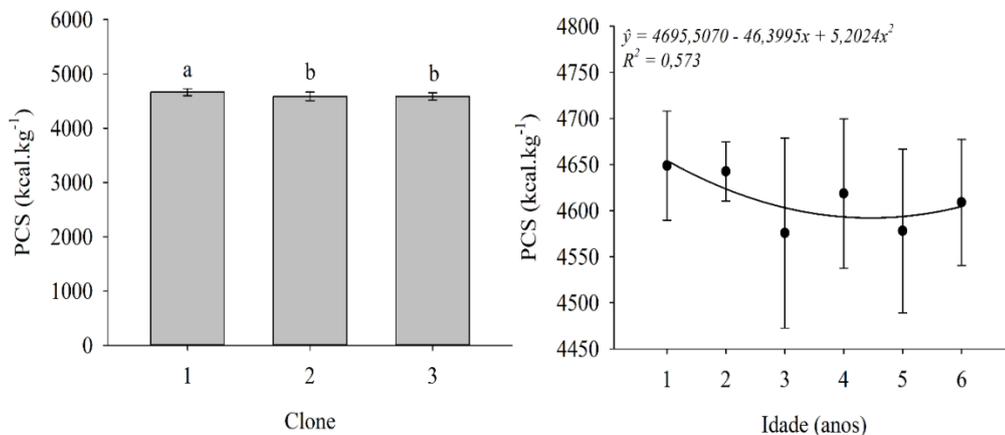
Figura 4 - Relação funcional entre densidade básica (DB) e energética (DE) da madeira.



Fonte: Do Autor (2021).

O PCS apresentou comportamento segundo o modelo linear quadrático ( $R^2 = 0,573$ ) em função da idade. De acordo com Santana *et al.* (2012) e Soares *et al.* (2015) há pouca influência da idade no PCS e esta característica apresenta pequena variação dentro de uma mesma espécie, o que também foi observado neste trabalho, pois a variação entre o menor e maior PCS foi de 4% (4503 a 4691 kcal.kg<sup>-1</sup>). Para o efeito da idade, foi possível o ajuste do modelo linear quadrático, que obteve  $R^2$  de magnitude mediana. O clone 1 apresentou o maior PCS, sendo diferente estatisticamente dos clones 2 e 3, que não diferiram entre si (Figura 5).

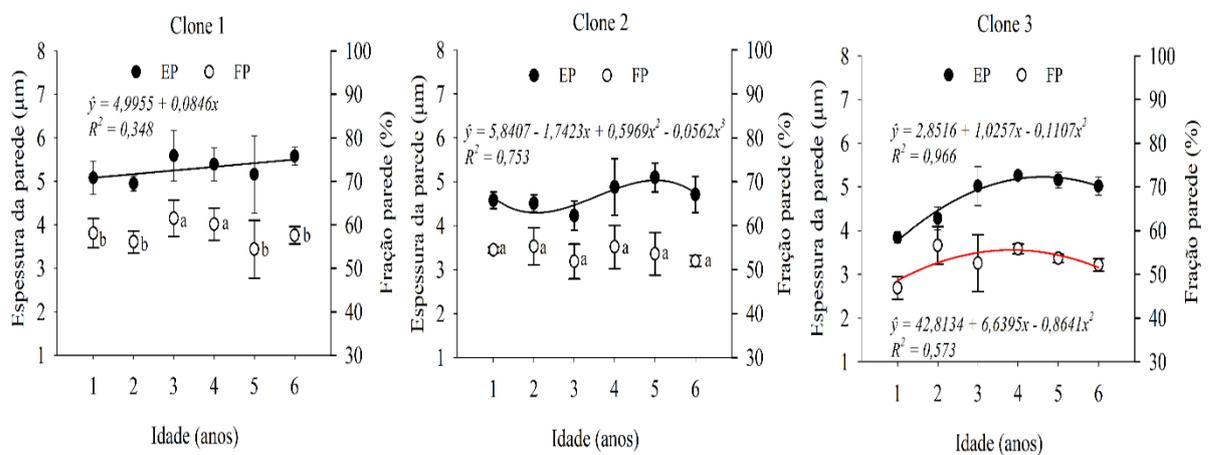
Figura 5 - Poder calorífico superior (PCS) da madeira em função do clone e da idade.



Fonte: Do Autor (2021).

A variação da espessura da parede celular das fibras (EP) em função da idade seguiu o modelo linear simples com ajuste de baixa magnitude ( $R^2 = 0,348$ ) no clone 1, enquanto nos clones 2 e 3 foram o linear cúbico ( $R^2 = 0,753$ ) e linear quadrático ( $R^2 = 0,862$ ), respectivamente. A fração parede (FP) seguiu o modelo linear quadrático com ajuste de magnitude mediana ( $R^2 = 0,573$ ) no clone 3. Nos clones 1 e 2 não foi possível o ajuste de nenhum dos modelos testados, indicando que a fração parede apresentou comportamento constante independentemente da idade da árvore (Figura 6).

Figura 6 - Variação da espessura da parede (EP) e fração parede (FP) das fibras.



Fonte: Do Autor (2021).

A EP em relação à idade foi mais evidente no clone 3, mostrando que o aumento da idade com a EP não ocorre da mesma forma para genótipos diferentes.

A espessura de parede das fibras age sobre a densidade básica e, assim, atua indiretamente nas propriedades energéticas da madeira, uma vez que a parede celular mais espessa promove maior volume de biomassa para manter a combustão duradoura (SANTOS *et al.*, 2011). Porém, a densidade básica da madeira apresentou maior tendência de aumento com a idade, se comparada com a EP.

A fração parede das fibras no clone 3 foi a única que apresentou efeito em função da idade. Madeiras caracterizadas pela presença de fibras com alto valor de fração parede são potenciais para a produção de carvão vegetal (BENITES *et al.*, 2018), apresentando maior quantidade de massa para sustentar a decomposição térmica da madeira, favorecendo o rendimento e a qualidade do carvão vegetal.

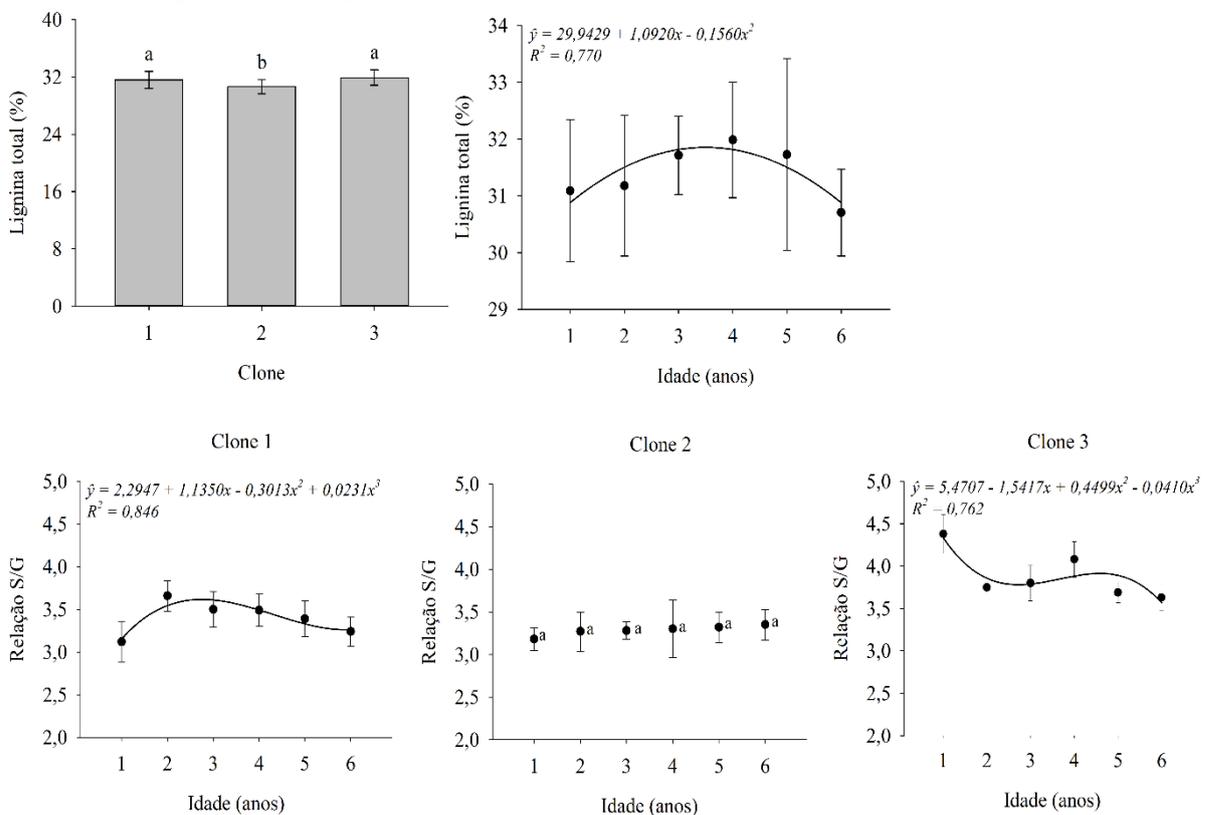
O comportamento dos clones e a variação do teor de lignina total em função da idade podem ser visualizados na Figura 7. O clone 2 apresentou o menor valor médio de lignina

total e diferiu estatisticamente dos clones 1 e 3. A variação do teor de lignina total em função da idade seguiu o modelo linear quadrático ( $R^2 = 0,77$ ). Esta função é negativa definida, que passa por ponto de máximo aos 3,5 anos.

Dentre os componentes químicos moleculares, a lignina é o que mais contribui para a formação do carvão vegetal quando comparada à celulose e hemiceluloses, por causa da sua elevada termorresistência atribuída à sua estrutura química complexa e ao seu alto grau de aromaticidade (PROTÁSIO *et al.*, 2017). Deste modo, o aumento no conteúdo de lignina pode influenciar positivamente a produção energética.

Os modelos ajustados para a relação S/G da lignina em função da idade foram o linear cúbico, para os clones 1 e 3. O clone 2 não apresentou ajustes significativos para os modelos testados, indicando que a característica possui tendência constante independentemente da idade da árvore. As funções ajustadas para os clones 1 e 3 apresentaram ponto de máximo aos 2,76 e 2,77 anos e mínimo nas idades de 5,94 e 4,63 anos, respectivamente (Figura 7). Deve ser destacado que os clones 1 e 2 apresentam intervalo de variação similar da relação S/G, enquanto no clone 3 esta foi mais ampla.

Figura 7 - Teor de lignina total (LIG) da madeira e a relação siringil/guaiacil (S/G) da lignina em função do clone e da idade.



Fonte: Do Autor (2021).

Autores como Castro *et al.* (2013) e Protásio *et al.* (2017) relataram valores maiores do que 31% para o teor de lignina total em diferentes clones de *Eucalyptus* cultivados com a finalidade energética. No presente trabalho, foi observado nos clones e em determinadas idades, valores que são considerados satisfatórios em que se pretende indicar um ou mais materiais genéticos com potencial para produção energética.

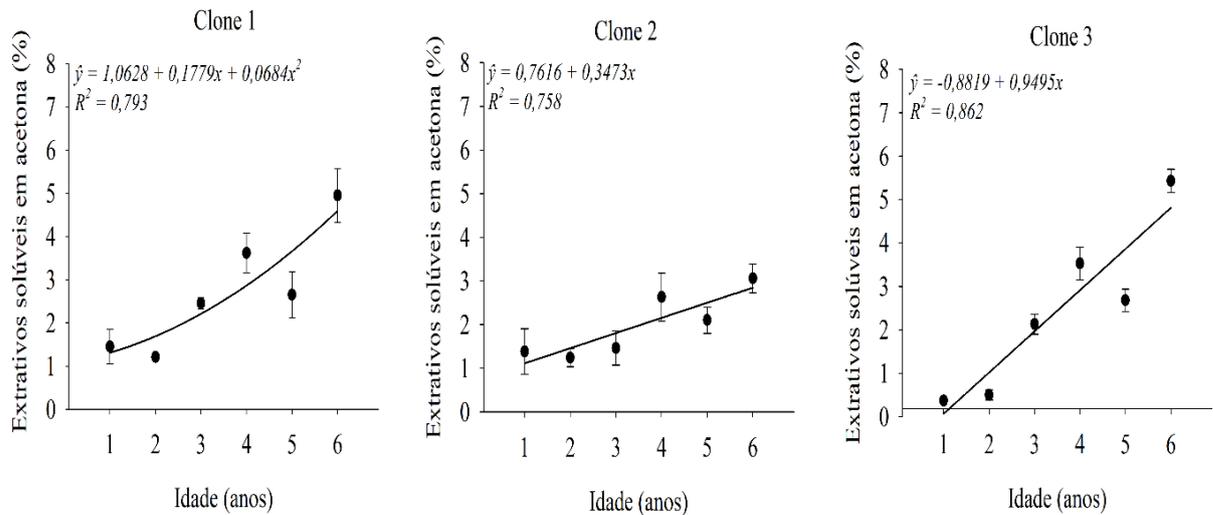
No entanto, alguns autores têm relatado a importância de avaliar a relação siringil/guaiacil desta macromolécula buscando melhor definir a qualidade da madeira para geração de energia (PEREIRA *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2016; SOARES *et al.*, 2015).

A diminuição da relação S/G com o aumento da idade nos clones 1 e 3 pode estar associada ao aumento da proporção do monômero G na macromolécula. Se este fato ocorrer, a madeira será mais adequada ao uso energético, pois G é mais termoresistente que S. Esta tendência de redução da relação S/G com o aumento da idade também foi observada por Castro *et al.* (2013) e Soares *et al.* (2015).

Deste modo, considerando o que ocorreu nos clones 1 e 3, deve ser mais vantajoso o uso de madeira em idade mais avançada no que diz respeito à qualidade da madeira, uma vez que a menor relação S/G ou maior proporção de unidades guaiacil, contribuirá para a obtenção de maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal (GOUVÊA *et al.*, 2015; PEREIRA *et al.*, 2013) e com previsão de liberação de mais energia no uso direto. Entretanto, é importante observar que o clone 3 apresentou valor menor de S/G e em idade inferior aos 5 anos, surgindo como uma opção no contexto de florestas de curta rotação.

O teor de extrativos em acetona em função da idade apresentou variação que seguiu o modelo linear quadrático ( $R^2 = 0,793$ ), no clone 1, e linear simples nos clones 2 e 3 ( $R^2 = 0,758$  e  $0,862$ , respectivamente). É importante destacar que o clone 2 apresentou os menores teores de extrativos solúveis em acetona, especialmente nas idades mais avançadas (Figura 8).

Figura 8 - Variação do teor de extrativos em acetona (EXTac) da madeira em função da idade.

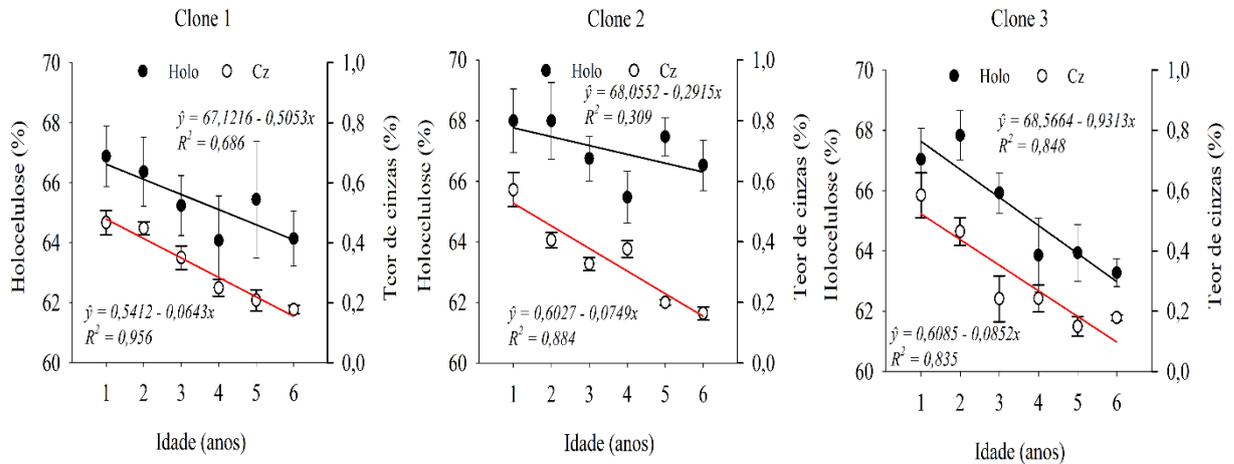


Fonte: Do Autor (2021).

Os extrativos solúveis em acetona são, também, relacionados com compostos lipídicos, que são resistentes à decomposição (DUNGAIT *et al.*, 2012). Para a produção de carvão vegetal, extrativos presentes na madeira que apresentam maior resistência à degradação térmica (por exemplo, compostos fenólicos) poderá colaborar positivamente para o aumento do rendimento gravimétrico de carvão, além de elevar o rendimento em carbono fixo, em função da natureza química dessas substâncias (SANTOS *et al.*, 2011; TELMO; LOUSADA, 2011).

Portanto, madeiras com alto teor de lignina e extrativos são mais propícias para uso energético (BRAND *et al.*, 2011; GOUVÊA *et al.*, 2015). Houve tendência de redução do teor de holocelulose da madeira dos clones em função da idade, de forma similar como ocorreu para o teor de cinzas. A tendência de variação seguiu o modelo linear simples para os três clones estudados, em que o melhor ajuste ocorreu no clone 3 ( $R^2 = 0,848$ ) para holocelulose e clone 1 ( $R^2 = 0,956$ ) para as cinzas (Figura 9).

Figura 9 - Variação do teor de holocelulose (HOLO) e cinzas (CIZm) da madeira em função da idade.



Fonte: Do Autor (2021).

A diminuição do teor de holocelulose com o aumento da idade do material, de maneira geral, observada neste trabalho, é benéfica para a produção de carvão vegetal, uma vez que a celulose e as hemiceluloses são mais instáveis termicamente e resultam em menor rendimento gravimétrico em carvão vegetal (NEVES *et al.*, 2013).

Vale destacar que o clone 3 apresentou os menores valores de holocelulose nas idades mais avançadas, que é reflexo do seu maior teor de lignina. Para a produção de carvão vegetal, busca-se madeira com menor teor de holocelulose e maior de lignina. A participação da holocelulose na formação do produto sólido é menor, enquanto a lignina, devido à sua maior estabilidade térmica, afeta diretamente a formação do produto sólido, o carvão vegetal (SANTOS *et al.*, 2011).

A redução do teor de cinzas com a idade da árvore pode estar associada à diminuição da atividade fisiológica da árvore e, conseqüentemente, menor exigência de minerais. Deste modo, a quantidade de componentes minerais em relação à massa seca da madeira diminui significativamente com a idade, apresentando, portanto, menores valores percentuais na madeira mais madura. Esse resultado é positivo, uma vez que os minerais são indesejáveis tanto na produção de carvão vegetal como na combustão direta, pois esses minerais são constituintes inorgânicos e não participam do processo de combustão da biomassa (BRAND, 2010).

A diminuição do teor de cinzas com a idade corrobora com resultado encontrado por Santana *et al.* (2012). Trugilho, Lima e Mendes (1996) observaram o mesmo comportamento para a madeira de *Eucalyptus saligna* nas idades de 12 a 48 meses, bem como Neves *et al.* (2013) para clones de *Eucalyptus* spp. nas idades de 55 e 67 meses.

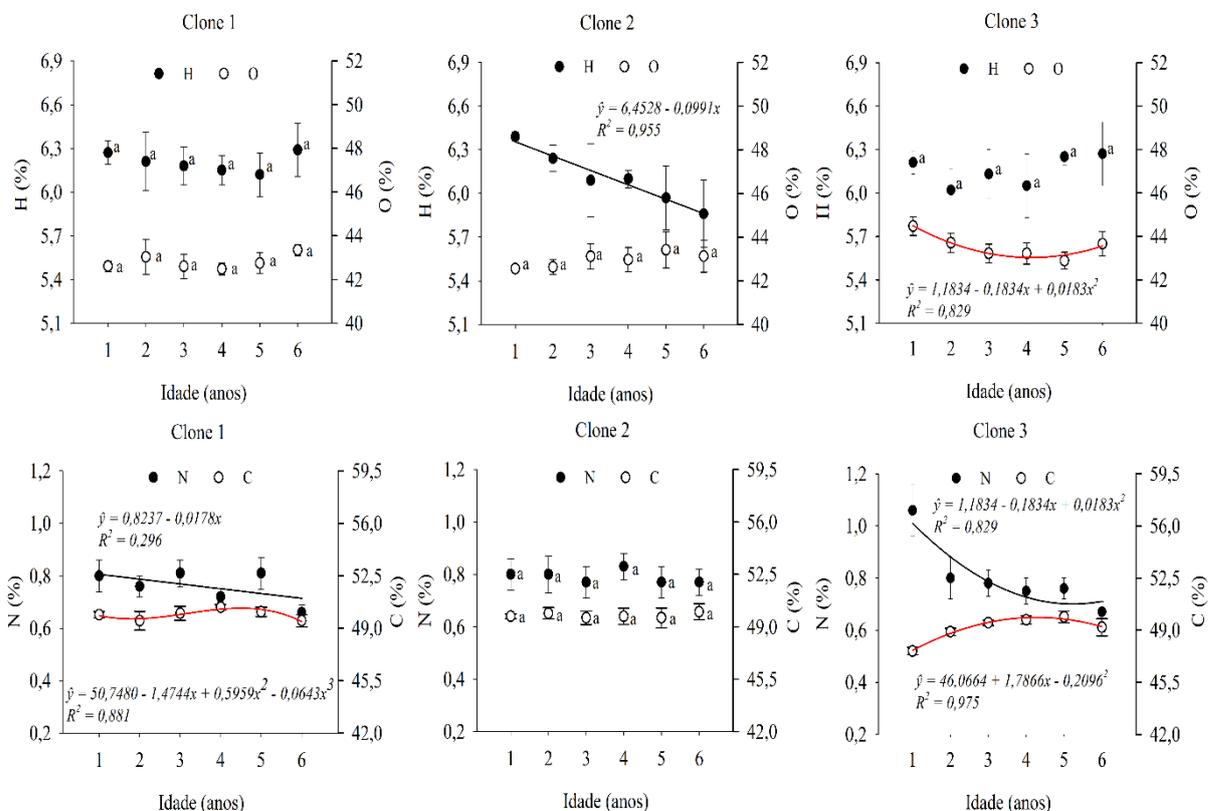
O teor de hidrogênio não apresentou ajustes significativos para nenhum dos modelos testados nos clones 1 e 3 (Figura 10), indicando que esta característica possui tendência constante

independentemente da idade do genótipo. Este mesmo resultado pode ser observado para o teor de oxigênio nos clones 1 e 2.

No clone 2, a variação do teor de hidrogênio seguiu o modelo linear simples, que apresentou tendência de redução com o aumento da idade. Este mesmo efeito foi também verificado por Protásio *et al.* (2014a) para o clone híbrido de *Eucalyptus* com 57 e 69 meses de idade. A tendência de variação do teor de oxigênio, no clone 3, seguiu o modelo linear quadrático, que passa por ponto mínimo aos 5,1 anos.

O teor de nitrogênio (Figura 10) apresentou tendência de variação e seguiu o modelo linear simples com ajuste de baixa magnitude ( $R^2 = 0,296$ ) e linear quadrático ( $R^2 = 0,829$ ), respectivamente, nos clones 1 e 3. A variação observada no teor de carbono, nos clones 1 e 3, foi definida pelo linear cúbico ( $R^2 = 0,881$ ) e linear quadrático ( $R^2 = 0,975$ ), respectivamente. O clone 2 não apresentou ajustes significativos para os modelos testados, indicando que os teores de nitrogênio e carbono foram constantes, independentemente da idade da árvore. O clone 3 apresentou, no geral, menor teor de carbono e maior de nitrogênio.

Figura 10 - Variação do teor de hidrogênio (H), oxigênio (O), carbono (C) e nitrogênio (N) da madeira em função da idade.



Fonte: Do Autor (2021).

O teor de hidrogênio contribui significativamente para o aumento do valor calórico do combustível (PAULA *et al.*, 2011). Logo, o clone 2 apresentou tendência de queda no valor de hidrogênio em função da idade, o que não é positivo para a finalidade energética, sendo que aos 6 anos apresentou o menor valor para essa propriedade da madeira.

Dessa forma, deve-se sempre considerar a proporção dos demais constituintes químicos para que se possa fazer com maior confiabilidade a avaliação da madeira e seleção dos genótipos nas idades consideradas, visando o seu uso bioenergético.

De modo geral, os resultados encontrados para o teor de oxigênio no presente estudo são menores que os valores obtidos por Santos *et al.* (2016) e Soares *et al.* (2015) para o gênero *Eucalyptus* destinados à produção de carvão vegetal. O elemento oxigênio, ao contrário do carbono e do hidrogênio, contribui negativamente para o poder calorífico, sendo assim, compostos com maiores teores de oxigênio implicam em menor energia armazenada, ou seja, aumento no teor de carbono e a diminuição do teor de oxigênio tende a aumentar o poder calorífico de combustíveis de biomassa vegetal (PAULA *et al.*, 2011).

Os clones 1 e 3 apresentaram tendência de redução do teor de nitrogênio (N) com o aumento da idade. Este mesmo efeito foi também verificado por Santana *et al.* (2012), para o clone híbrido de *Eucalyptus*. Este fato pode ser explicado devido os eucaliptos necessitarem inicialmente de elevada demanda de N para a formação da copa das árvores e, assim, necessitarem de teores mais altos de nitrogênio em materiais mais jovens, que diminuem com a maturidade da árvore (ROSA *et al.*, 2018) e altos teores de N são indesejáveis se a madeira for utilizada como fonte de bioenergia, especialmente por processos de conversão termoquímica. Nos processos termoquímicos, a presença de N leva à liberação na atmosfera de óxidos tóxicos (NO<sub>x</sub>), promovendo a poluição do ar, formação de chuva ácida, além de contribuir com a diminuição do valor calórico do combustível (PROTÁSIO *et al.*, 2014a). Assim, como acontece para o enxofre, a presença de N é prejudicial para o meio ambiente e para a saúde humana.

Substâncias ricas em carbono podem ser reflexo de maiores teores de lignina e extrativos. Vale destacar que o teor de extrativos em acetona aumentou em todos os clones com a idade da árvore (Figura 8), podendo causar aumento do teor de carbono com a maturidade do vegetal. Porém, para o teor de lignina a tendência de variação com a idade seguiu o modelo quadrático, cuja função passa por ponto máximo aos 3,5 anos.

Quando se objetiva a produção de carvão vegetal, maiores teores de carbono são desejáveis (VARGAS-MORENO *et al.*, 2012). Na produção de carvão vegetal, o carbono é convertido em carbono fixo e é o principal responsável pela energia estocada (SANTOS *et al.*, 2011).

A Tabela 7 apresenta as correlações obtidas entre as características determinadas na madeira independentemente da idade dos materiais.

Tabela 7 - Matriz de correlações entre as propriedades avaliadas na madeira.

	EXT	LIG	CIZ	HOLO	S/G	N	C	O	MS	DE	EP
DB	<b>0,68*</b>	0,37	<b>0,80*</b>	<b>-0,74*</b>	0,12	-0,41	0,35	-0,08	<b>0,79*</b>	<b>0,99*</b>	<b>0,69*</b>
EXT	-	0,04	0,76*	-0,84*	-0,14	<b>0,70*</b>	0,35	-0,08	0,80*	0,67*	0,68*
LIG		-	-0,13	<b>-0,57*</b>	<b>0,58*</b>	0,14	-0,04	0,03	0,03	0,35	0,21
CIZ			-	0,66*	0,11	<b>0,65*</b>	0,47*	0,08	-	-	-
HOLO				-	-0,21	0,49*	-0,24	0,04	0,65*	0,72*	0,67*
S/G					-	<b>0,47*</b>	<b>0,67*</b>	0,66*	-0,14	0,10	-0,27
N						-	0,64*	0,39	-	-0,40	-
C							-	0,90*	0,28	0,35	0,66*
O								-	0,05	-0,11	-
MS									-	0,75*	0,56*
DE										-	0,71*

\*significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Fonte: Do Autor (2021).

A densidade básica apresentou correlação positiva e significativa com o teor de extrativos em acetona, massa seca, densidade energética e espessura da parede celular das fibras, além de correlação negativa e significativa com o teor de cinzas e holocelulose. Relações semelhantes envolvendo densidade básica com a massa seca (ROCHA *et al.*, 2020), densidade energética (LIMA *et al.*, 2021), espessura da parede celular da fibra (LONGUI *et al.*, 2010), teor de cinzas (SOARES *et al.*, 2014) e holocelulose (VALE; DIAS; SANTANA, 2010) da madeira foram reportadas nas referidas pesquisas.

O teor de extrativos em acetona apresentou correlação negativa e significativa com o teor de nitrogênio, que está de acordo com o obtido por Soares *et al.* (2014). O teor de lignina apresentou correlação positiva e negativa, respectivamente, com a relação S/G e teor de holocelulose. Correlações similares da lignina com a relação S/G e teor de holocelulose foram reportados por Santos *et al.* (2016) e Soares *et al.* (2018), respectivamente. Os teores de cinzas e nitrogênio apresentaram correlação direta entre eles (SOARES *et al.*, 2014).

A relação S/G apresentou correlação significativa e positiva com o teor de nitrogênio e negativa com o teor de carbono (ARAÚJO *et al.*, 2016). Essa correlação negativa com o

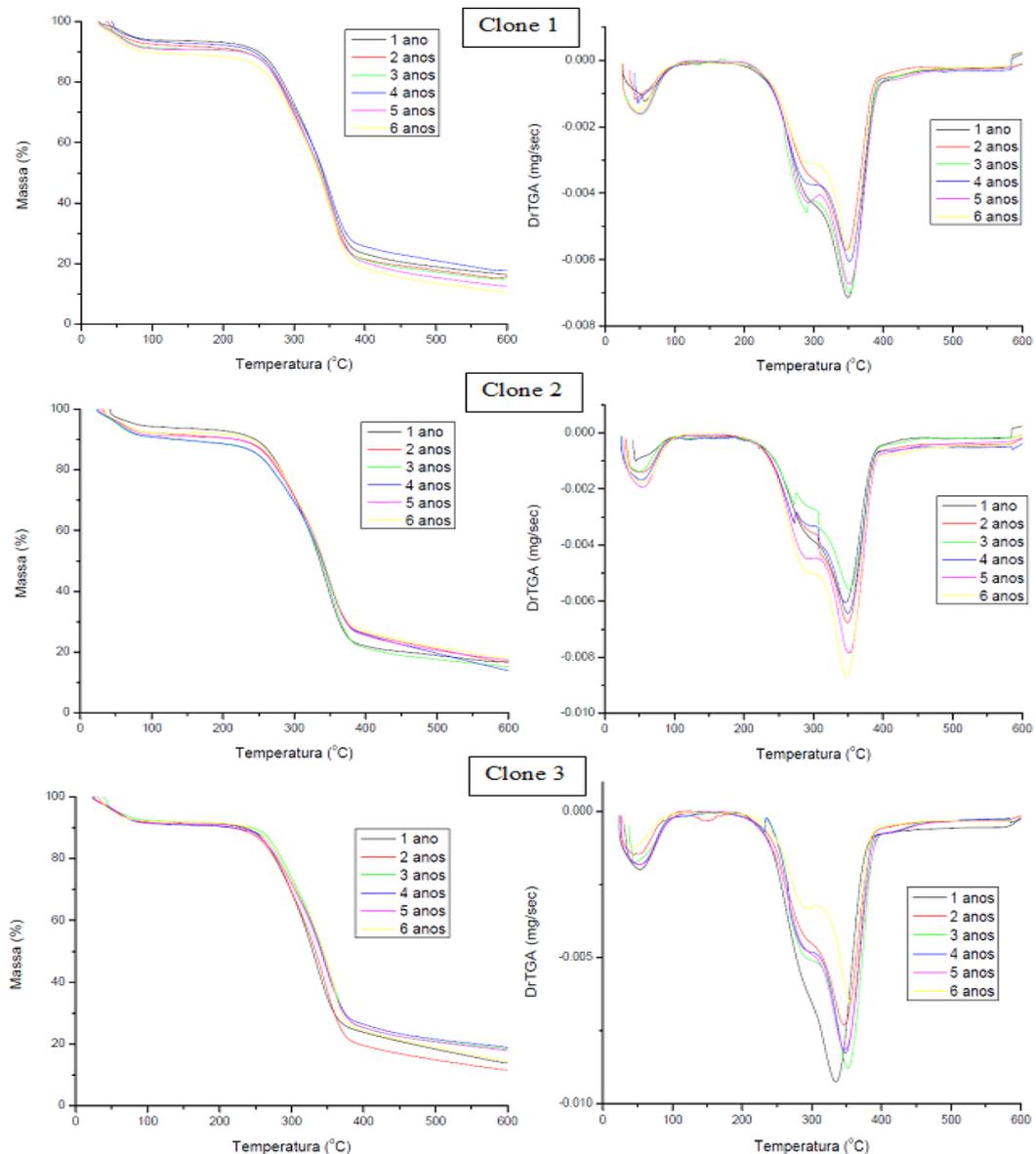
componente elementar carbono (C) pode ser explicada pela estrutura química das unidades siringil e guaiacil (SOARES *et al.*, 2014).

## 5.2 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

As curvas termogravimétricas (TG) representam a perda de massa, em porcentagem, em função da temperatura, enquanto as curvas DTG correspondem à derivada primeira das curvas TG e apresentam a variação da massa em relação ao tempo, registradas em função da temperatura.

Na Figura 11 estão representadas as curvas termogravimétricas (TG/DTG) da madeira para os três clones de *Eucalyptus urophylla* de 1 a 6 anos.

Figura 11 - Curvas termogravimétricas e derivadas da madeira em atmosfera de nitrogênio.



Fonte: Do Autor (2021).

As curvas de DTG evidenciam que todas as amostras apresentaram, de modo geral, três etapas de perda de massa, em que os picos de reação são semelhantes com diferença mínima de amplitude. Os picos podem ser destacados em relação à secagem da madeira e à decomposição das hemiceluloses e celulose, entretanto não foi detectado pico de degradação de lignina, em razão desta ocorrer em ampla faixa de temperatura (YANG *et al.*, 2007).

A segunda faixa corresponde à degradação térmica das hemiceluloses com pico máximo na faixa de temperatura de 291°C para os clones 1, 2 e 3. Para o clone 1, a idade de 6 anos apresentou comportamento diferente em sua amplitude em relação às outras idades e, a idade de 3 anos, atingiu a maior perda de massa na faixa de temperatura referente às hemiceluloses. O clone 2 exibiu comportamento em que a idade de 3 anos apresentou comportamento diferente em sua amplitude, assim como as idades de 1, 2 e 4 anos. No clone 3 destacam-se as idades 1 e 3, que tiveram tendência distinta das outras idades.

A terceira faixa de temperatura corresponde à degradação térmica da celulose com pico máximo entre 349,8; 349 e 334,6°C para os clones 1, 2 e 3, respectivamente. Nessa faixa de degradação, vale destacar as idades 1 e 6 para o clone 3, pois apresentaram comportamentos diferentes.

A partir de 400-450°C, verifica-se que degradação térmica da madeira se tornou menor, essa faixa é referente à degradação de lignina. As hemiceluloses e celulose, componentes químicos de maior proporção na madeira, já foram, em sua maioria, degradadas.

Na Tabela 8 encontra-se a perda de massa e a massa residual obtidas em função de diferentes faixas de temperaturas até 600°C para cada clone e idade dos materiais genéticos.

Tabela 8 - Valores médios da perda de massa dos clones de Eucalyptus em função das faixas de temperatura e massa residual, em porcentagem.

Clone 1							
Idade	Perda de massa (%) por faixa de temperatura (°C)						Massa Residual
	40-100	100-200	200-300	300-380	380-450	450-600	
1	6,061	0,868	20,307	46,914	5,026	4,157	16,714
2	7,432	1,335	20,778	46,387	3,981	3,636	16,501
3	8,663	0,678	21,593	45,403	4,945	3,608	15,014
4	6,452	1,286	20,603	42,854	4,824	5,025	18,839
5	9,018	0,459	21,150	45,892	5,865	4,719	12,890
6	10,229	1,410	20,554	46,702	5,497	4,780	<b>10,765</b>
Média da massa residual de 1 a 6 anos							15,121
Clone 2							
Idade	Perda de massa (%) por faixa de temperatura (°C)						Massa Residual
	40-100	100-200	200-300	300-380	380-450	450-600	
1	5,646	1,379	21,532	46,849	3,589	3,042	17,918
2	7,747	1,630	19,084	43,077	4,780	6,740	16,926
3	9,131	2,335	19,010	45,656	4,741	3,667	15,510
4	9,177	2,178	19,322	41,325	5,343	8,582	<b>13,810</b>
5	8,606	0,862	19,533	43,330	5,095	5,142	17,422
6	7,747	0,492	19,925	42,601	4,996	5,879	18,414
Média da massa residual de 1 a 6 anos							16,667
Clone 3							
Idade	Perda de massa (%) por faixa de temperatura (°C)						Massa Residual
	40-100	100-200	200-300	300-380	380-450	450-600	
1	8,493	0,412	21,758	43,801	4,389	6,988	14,093
2	8,026	1,546	21,192	47,579	4,525	5,270	<b>11,898</b>
3	7,504	0,905	17,559	45,544	5,176	4,093	19,122
4	8,476	0,974	17,896	43,836	5,027	4,408	19,334
5	8,405	0,557	19,144	43,847	5,272	4,549	18,414
6	7,824	0,701	18,634	46,223	4,772	6,762	15,084
Média da massa residual de 1 a 6 anos							16,324

Fonte: Do Autor (2021).

O clone 1 apresentou a maior perda de massa média entre as idades (84,88%), sendo, assim, o menos estável termicamente em relação aos demais. Espera-se que quanto mais estável termicamente a madeira, maior será seu rendimento em carvão vegetal, isso foi observado no presente trabalho, pois o clone 2 obteve maior massa residual e o maior rendimento gravimétrico médio (40,64%).

Na faixa inicial de degradação até 100°C, que corresponde à fase de secagem da madeira, observou-se perda de massa variando de 5,646% a 10,229% para os genótipos

avaliados. Nessa fase, ocorre perda da água de adesão presente na parede celular e que necessita de energia para ser retirada da madeira, sendo esta fase, portanto, endotérmica.

Constatou-se que, na faixa de temperatura compreendida entre 100 e 200°C, a perda de massa foi mínima, com o menor valor de 0,412% no clone 3 com 1 ano. Essa variação de temperatura representa uma zona de estabilidade térmica da madeira (RANDRIAMANTENA *et al.*, 2009). É importante destacar que os componentes da madeira são estáveis nessa faixa de temperatura apenas se não forem expostos ao calor por períodos prolongados (RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006).

Na faixa de temperatura entre 200 e 300°C ocorreu a segunda maior perda de massa; assim, pode-se inferir que esse fato é atribuído à degradação das hemiceluloses. Entre as temperaturas de 200 e 300°C, Santos *et al.* (2012) observaram perdas de massa entre 16 e 19%, e Pereira *et al.* (2013) constataram, em média, 19,73% de perda de massa, ambos para clones de *Eucalyptus* spp. aos 7 e 7,5 anos de idade, valores esses, de modo geral, inferiores aos verificados neste estudo.

Na faixa de temperatura de 300 a 380°C ocorreram as maiores perdas de massa nos três clones avaliados, com perdas de 45,69%, 43,81% e 45,14%, respectivamente, para os clones 1, 2 e 3. Valores semelhantes aos encontrados por Santos *et al.* (2012) e Pereira *et al.* (2013) na faixa de temperatura entre 300 e 400°C. Essa faixa de degradação está relacionada principalmente à celulose, já que sua maior degradação está entre 325 e 375°C (SANTOS *et al.*, 2012), o que elucida a baixa contribuição da celulose no rendimento em carvão vegetal.

A partir de 400°C há menor degradação térmica, o que pode ser observado na faixa de temperatura entre 450-600°C, verifica-se que ocorre maior degradação da lignina, pois nessa temperatura a celulose e as hemiceluloses, componentes químicos em maior proporção na madeira, já foram degradados (PEREIRA *et al.*, 2013).

### **5.3 Resumo da interação clone x idade nas propriedades da madeira**

Na Tabela 9 encontra-se o resumo da interação clone x idade nas propriedades da madeira.

Tabela 9 - Resumo da interação clone x idade nas propriedades da madeira.

Propriedades da madeira	Efeito da idade
Densidade básica	+
Massa seca	+
Poder calorífico superior	Não significativo
Densidade energética	+
Espessura da parede	Interação não expressiva
Fração parede	Interação não expressiva
Lignina	Não significativo
Relação S/G	Interação não expressiva
Extrativos acetona	+
Holocelulose	-
Cinzas	-
Nitrogênio	-
Carbono	Interação não expressiva
Hidrogênio	Interação não expressiva
Oxigênio	Interação não expressiva

Fonte: Do Autor (2021).

O efeito da interação idade x clone não foi significativa apenas para o poder calorífico superior e o teor de lignina. Observou-se, de maneira geral, o efeito positivo da idade sobre a qualidade da madeira. Os teores de holocelulose, cinzas e nitrogênio tenderam a diminuir com o aumento da idade, enquanto a densidade básica e energética, massa seca e o teor de extrativos apresentaram acréscimo com a idade dos clones. Não houve interação expressiva para a relação siringil / guaiacil da lignina, espessura e fração da parede, teores de carbono, hidrogênio e oxigênio da madeira.

A madeira apresentou correlação negativa entre a relação S/G da lignina com o teor de carbono.

A análise térmica da madeira (TG/DTG) não apresentou consideráveis variações entre as idades para os clones observados, sendo possível diferenciar duas etapas distintas de degradação (hemiceluloses e celulose), juntamente com a secagem da madeira.

#### 5.4 Interação clone x idade para o carvão vegetal

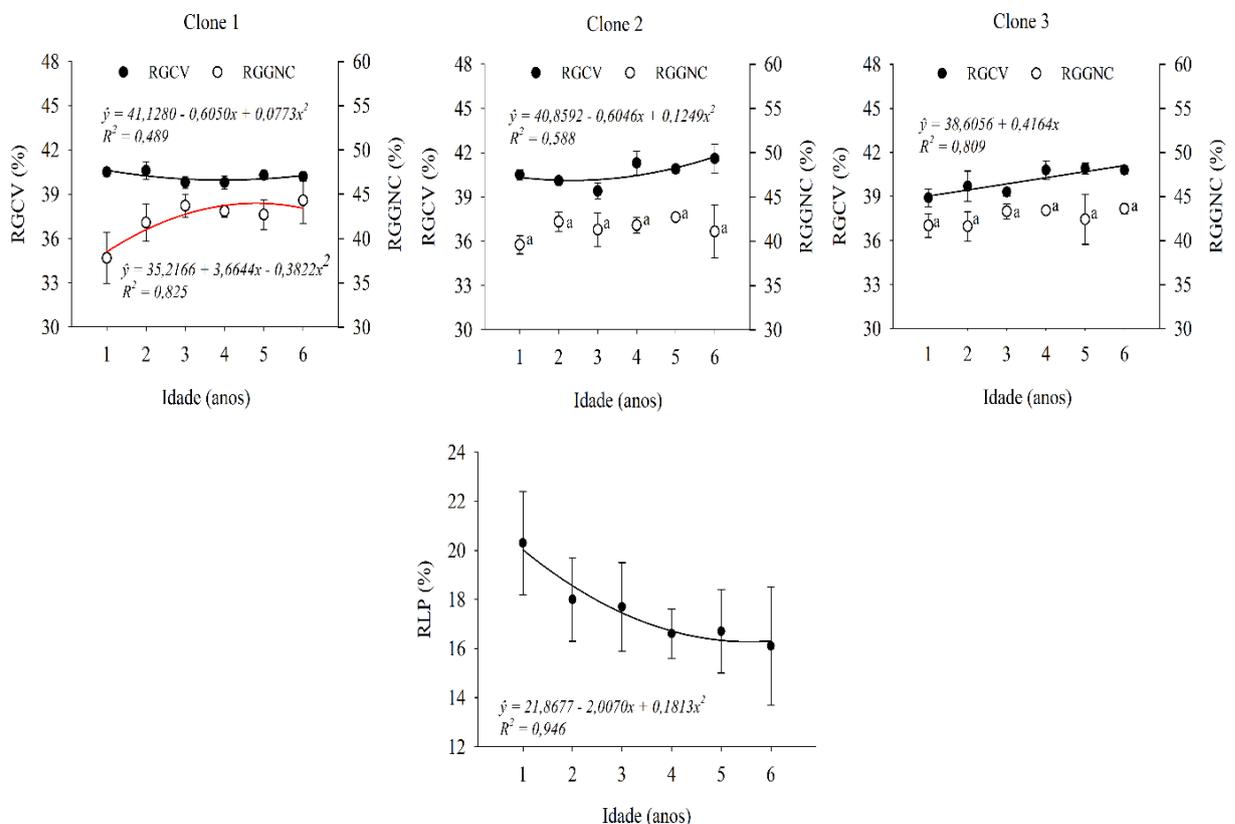
O resultado da análise de variância do delineamento adotado permitiu verificar que o efeito da interação material genético x idade foi não significativo para o rendimento em líquido pirolenhoso, os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio do carvão vegetal. Para as demais características houve dependência entre os fatores considerados, portanto, realizou-se o desdobramento da interação e a avaliação do efeito de idade dentro do clone (Tabelas 21, 22 e 23).

A variação do rendimento em líquido pirolenhoso (RLP) em função da idade seguiu o modelo linear quadrático com  $R^2$  de 0,946. Este modelo mostra que a tendência geral do RLP foi de redução com o avanço da idade, estabilizando em idades mais elevadas (Figura 12).

A variabilidade do rendimento gravimétrico em carvão seguiu o modelo linear quadrático em função da idade nos clones 1 e 2, que apresentou ajuste de baixa a moderada magnitude ( $R^2 = 0,489$  e  $R^2 = 0,588$ , respectivamente), enquanto no clone 3 foi o modelo linear simples com ajuste de alta magnitude ( $R^2 = 0,809$ ) (Figura 12).

Para o rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (RGGNC) em função da idade, o clone 1 apresentou modelo ajustado que seguiu o linear quadrático ( $R^2 = 0,825$ ). Neste clone, o RGGNC apresentou forte tendência inicial de acréscimo, com estabilização nas idades mais avançadas. Os clones 2 e 3 não apresentaram ajustes significativos para nenhum dos modelos testados, indicando que o rendimento gravimétrico em gases não condensáveis foi constante independentemente da idade da árvore (Figura 12).

Figura 12 - Variação do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV), em gases não condensáveis (RGGNC) e em líquido pirolenhoso (RLP) da carbonização em função da idade.



Fonte: Do Autor (2021).

O rendimento médio em carvão vegetal (RGCV) obtido nesse trabalho foi de 40,29%, maior que o verificado por outros pesquisadores para o gênero *Eucalyptus* encontrados na literatura utilizando mufla/laboratorial; esses autores obtiveram valores inferiores a 36% (ASSIS *et al.*, 2012; NEVES *et al.*, 2011; PEREIRA *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2021). Este fato pode ser explicado devido aos rendimentos gravimétricos serem fortemente influenciados tanto pela matéria-prima quanto pelos parâmetros do processo como, por exemplo, a temperatura e taxa de aquecimento (ELYOUNSSI *et al.*, 2012).

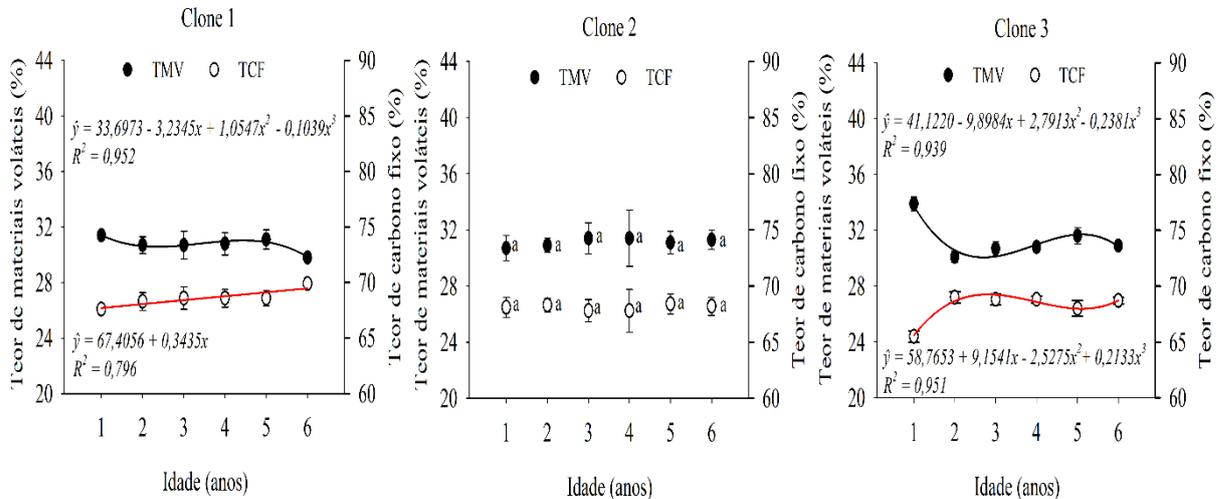
Ademais, quanto maior a temperatura final, menor o rendimento em massa, em razão do maior grau de volatilização da matéria orgânica, que resulta em menor rendimento em carvão vegetal e acréscimo nos rendimentos em líquido pirolenhoso (ELYOUNSSI; BLIN; HALIM, 2010; VIEIRA *et al.*, 2013). O que corrobora com a diferença no valor médio de RGCV do presente estudo com as pesquisas anteriormente mencionadas, uma vez que foi usado menor temperatura final e menor taxa de aquecimento e, assim, promoveu maior duração da carbonização.

De modo geral, há tendência de aumento do rendimento em carvão vegetal com o aumento da idade. O processo de lignificação tem relação com o desenvolvimento do tecido madeireiro (CASTRO *et al.*, 2013), além disso, pode ser explicado devido ao material apresentar aumento do teor de extrativos e redução da holocelulose com a idade (CASTRO *et al.*, 2013). Essa diferença pode resultar nos maiores rendimentos em carvão produzidos com madeira a partir de árvores mais velhas em relação às mais jovens.

Considerando-se os aspectos produtivos, geralmente é desejável obter elevado RGCV, devido ao maior aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e, conseqüentemente, maior produção de energia e menores rendimentos em líquido e em gases não condensáveis, pois esses são coprodutos do processo de pirólise (LOUREIRO *et al.*, 2021).

A variabilidade do teor de materiais voláteis e carbono fixo seguiu o modelo linear cúbico e simples para o clone 1 ( $R^2 = 0,952$  e  $R^2 = 0,796$ ) e modelo linear cúbico para o clone 3 ( $R^2 = 0,939$  e  $R^2 = 0,951$ ), enquanto que o clone 2 não apresentou ajuste significativo para nenhum dos modelos testados, o que indica a estabilidade independentemente da idade da árvore (Figura 13).

Figura 13 - Variação do teor de materiais voláteis (MV) e carbono fixo (CF) do carvão vegetal em função da idade.



Fonte: Do Autor (2021).

De acordo com Carneiro *et al.* (2016), o teor de materiais voláteis apresenta correlação negativa com o teor de carbono fixo. Essa mesma tendência foi observada no presente trabalho, especialmente se for considerando o que ocorreu nos clones 1 e 3. Este fato ocorre, pois, no processo de carbonização. A degradação térmica promove a eliminação dos voláteis o que, consequentemente, resultará na concentração dos teores dos demais compostos no carvão.

Espera-se que menores rendimentos gravimétricos, ou seja, maiores perdas de massa estejam associadas à redução nos teores de materiais voláteis e à consequente concentração dos teores de carbono fixo no carvão (CARNEIRO *et al.*, 2016). Fato observado no presente estudo, enquanto o teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico apresentaram aumento com a idade, o teor de materiais voláteis diminuiu.

A Figura 14 mostra a variação dos teores de carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e cinzas do carvão vegetal em função da idade dos clones.

O clone 1 apresentou o maior valor médio para os teores de carbono e hidrogênio, e o menor valor para o teor de oxigênio; diferindo estatisticamente dos clones 2 e 3. Portanto, o clone 1 se destacou para essas características, uma vez que a maior presença de carbono e hidrogênio, além de menor conteúdo de oxigênio elementar, são positivos na busca por genótipos com melhor potencial energético, pois estes elementos químicos (combustíveis) são oxidados durante a combustão por reações exotérmicas (intensa liberação de energia), que culmina na formação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008).

A variação do teor de carbono e oxigênio em função da idade seguiu o modelo linear cúbico com  $R^2 = 0,920$  e  $R^2 = 0,926$ , respectivamente, e demonstram serem inversamente

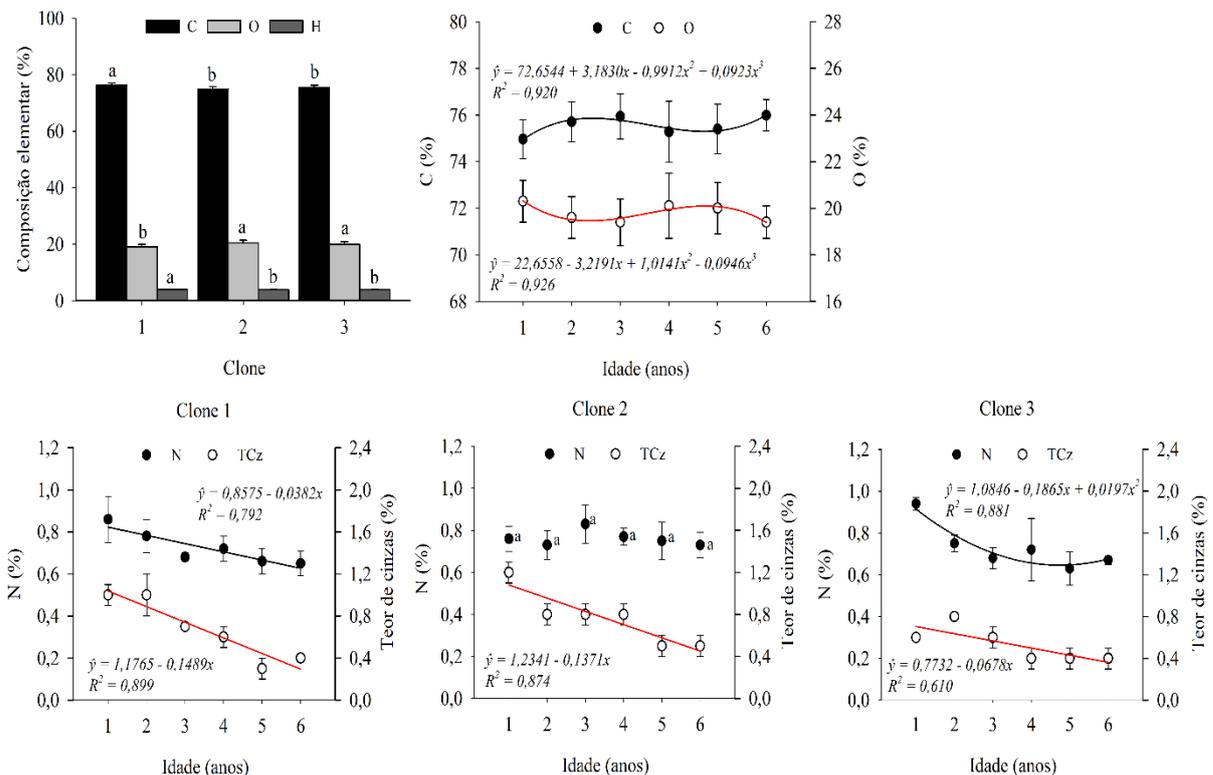
proporcionais. O teor de hidrogênio não apresentou ajustes significativos para nenhum dos modelos testados, indicando que esta característica foi constante independentemente da idade da árvore, desse modo, não afetou o valor calórico dos carvões produzidos.

Para o nitrogênio, os clones 1 e 3 apresentaram modelos ajustados que seguiram o linear simples ( $R^2$  de 0,792) e linear quadrático ( $R^2$  de 0,881), respectivamente. O clone 2 não apresentou ajustes significativos para os modelos testados, indicando que esta característica foi constante, independentemente da idade da árvore.

Houve a tendência geral de redução do teor de nitrogênio do carvão vegetal dos clones em função da idade, comportamento semelhante ao apresentado na madeira (Figura 10). Esses resultados podem ser considerados vantagens ambientais e tecnológicas do carvão vegetal em relação ao carvão mineral, pois está diretamente relacionado com a emissão de componentes  $\text{NO}_x$  (óxidos de nitrogênio tóxicos), corrosão e deposição de cinzas (DEMIRBAS, 2004).

A tendência de variação do teor de cinzas no carvão vegetal com a idade seguiu o modelo linear simples para os três clones estudados, em que o melhor ajuste ocorreu no clone 1 ( $R^2 = 0,899$ ). O teor de cinzas no carvão vegetal apresentou redução com a idade da árvore nos três clones avaliados, seguindo a mesma tendência para os minerais na madeira.

Figura 14 - Variação do teor de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e cinzas (CIZ) no carvão vegetal em função da idade

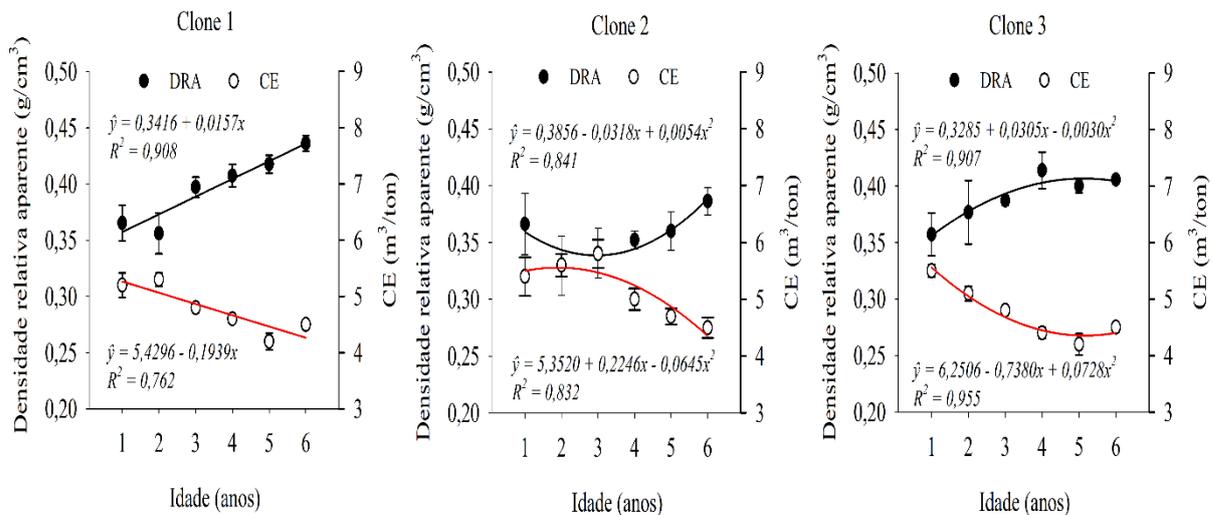


Fonte: Do Autor (2021).

É indicado na literatura que, para o uso siderúrgico, o teor de cinzas no carvão seja inferior a 1%, para evitar a redução do seu poder calorífico, desgaste no alto forno e contaminação que pode comprometer a qualidade do ferro gusa com consequentes formações de trincas e fissuras (JESUS *et al.*, 2017). Quanto aos valores observados para o teor de cinzas nos carvões vegetais, em todas as idades, pode-se considerar que foram reduzidos e não comprometem o uso industrial do carvão vegetal.

A variação da densidade relativa aparente (DRA) do carvão vegetal e o consumo específico (CE) de madeira em função da idade seguiu, no clone 1, o modelo linear simples ( $R^2 = 0,762$  e  $R^2 = 0,908$ , respectivamente), enquanto nos clones 2 e 3 foi o modelo linear quadrático ( $R^2 = 0,832$  e  $R^2 = 0,955$  para a DRA e  $R^2 = 0,841$  e  $R^2 = 0,907$  para o CE, respectivamente) (Figura 15). É possível observar que estas duas características apresentaram relação inversamente proporcional em todos os clones.

Figura 15 - Variação do consumo específico de madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal em função da idade.



Fonte: Do Autor (2021).

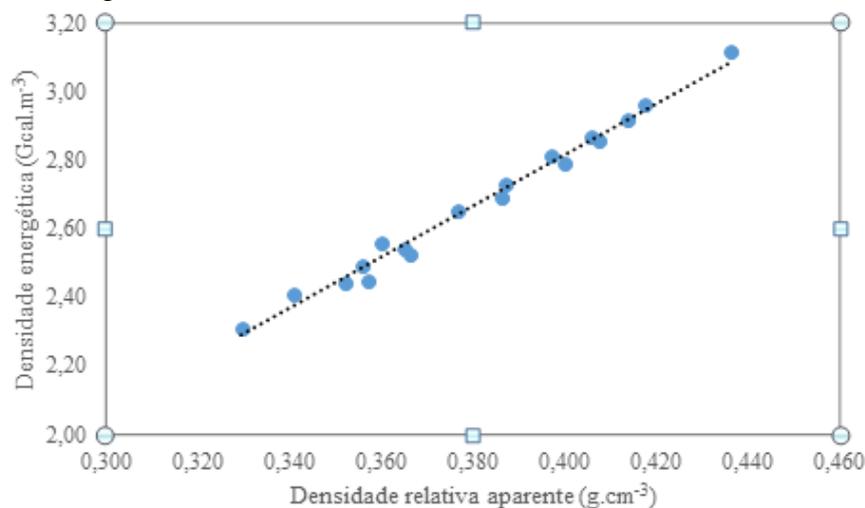
De modo geral, os três clones apresentaram tendência de redução do consumo específico de madeira em função do avanço da idade. Este fato ocorre devido esta propriedade estar relacionada com a densidade básica da madeira, que aumentou com a maturidade do material (Figura 3).

Deve ser ressaltado que é de interesse o menor consumo específico de madeira (m<sup>3</sup>/tcarvão) na produção de carvão vegetal, pois menores serão o consumo de madeira e área para atender a dada produção; por consequência, afeta o desempenho do carvão vegetal nos altos fornos e o custo/receita na cadeia do carvão vegetal.

Quanto maior a densidade aparente do carvão, maior será a sua resistência mecânica e maiores serão os estoques energéticos e de carbono fixo (PROTÁSIO *et al.*, 2013b). A densidade do carvão vegetal na faixa de 315 a 446 kg.m<sup>-3</sup>, juntamente com o aumento dos valores da DRA em função da idade, proporciona melhor desempenho de redução no alto forno e economia no consumo específico de carvão, portanto, há maior retorno financeiro quando comparado com o desempenho do carvão de menor densidade (ISBAEX, 2018; LOUREIRO *et al.*, 2019). O valor encontrado nesse estudo pode ser considerado satisfatório, pois a média geral foi de 0,381 g.cm<sup>-3</sup> e, também para a tendência entre as idades de 1 a 6 anos.

Embora a densidade energética não possa ser usada para prever, diretamente, o rendimento de carvão, entretanto pode ser um bom parâmetro a considerar, em decorrência da relação positiva com a DRA do carvão (LOUREIRO *et al.*, 2019). O elevado poder calorífico do combustível aliado à elevada densidade aparente, resulta na maximização da densidade energética (SILVA; FORTES; SETTE JUNIOR, 2018). A influência da DRA na densidade energética do carvão vegetal pode ser observada na Figura 16.

Figura 16 - Relação funcional entre densidade relativa aparente e densidade energética do carvão vegetal.



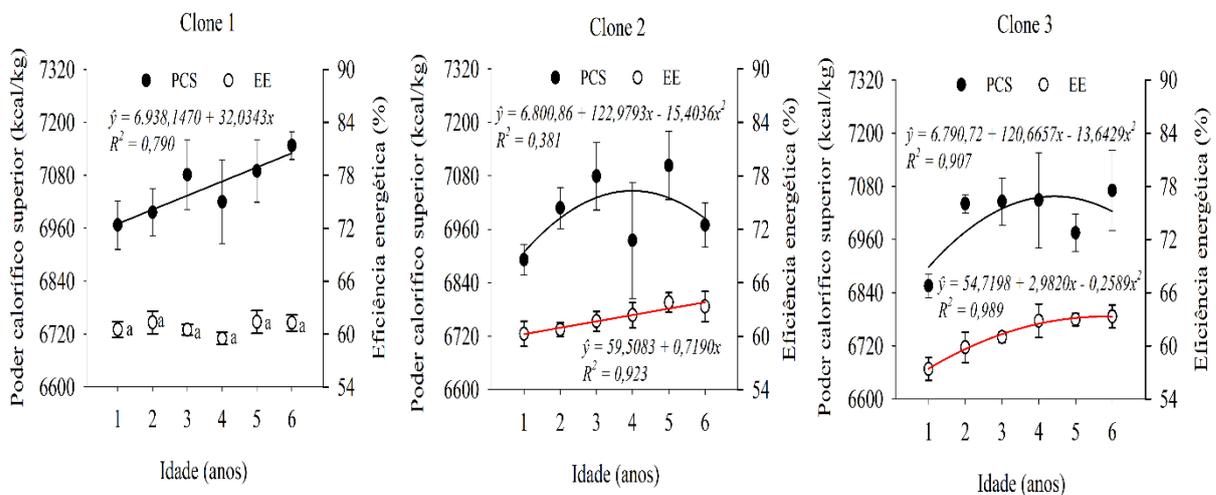
Fonte: Do Autor (2021).

A variação do poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal e a eficiência energética (EE) em função da idade dos materiais genéticos podem ser visualizadas na Figura 17. O PCS apresentou variação com a idade, que seguiu o modelo linear simples ( $R^2 = 0,790$ ), no clone 1, enquanto nos clones 2 e 3 foi o linear quadrático ( $R^2 = 0,381$  e  $R^2 = 0,907$ , respectivamente). Vale destacar o modelo ajustado no clone 2, que apresentou

baixa magnitude, o que evidencia a menor influência da idade sobre o PCS para este material genético.

Para a EE, no clone 1 não se obteve ajustes significativos para nenhum dos modelos testados, indicando que esta característica foi constante independentemente da idade da árvore. Nos clones 2 e 3 a variação da EE com a idade seguiu o modelo linear simples ( $R^2 = 0,923$ ) e linear quadrático ( $R^2 = 0,989$ ), respectivamente.

Figura 17 - Variação do poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal e da eficiência energética (EE) em função da idade.



Fonte: Do Autor (2021).

Segundo Du, Chen e Lucas (2014), o poder calorífico do carvão vegetal está diretamente correlacionado ao teor de carbono fixo e inversamente correlacionado aos teores de materiais voláteis e cinzas, o que, de modo geral, podemos observar no presente estudo, com destaque para o clone 1.

De modo geral, os clones 2 e 3 apresentaram tendência de aumento da EE com a idade da árvore. Embora a temperatura final de carbonização tenha sido a mesma para todos os clones, esse resultado pode ser explicado pelo comportamento do poder calorífico da madeira e carvão vegetal que estão diretamente ligados ao cálculo da eficiência energética, além do rendimento gravimétrico de carvão.

Dessa forma, árvores mais velhas tendem a apresentar maior eficiência na conversão energética, se comparadas às mais novas. Na carbonização é desejável reter no carvão, tanto quanto possível, a energia contida na madeira, ao invés de liberar quantidades significativas de subprodutos líquidos e gasosos (LIMA *et al.*, 2020).

As correlações obtidas entre os rendimentos gravimétricos e as características avaliadas no carvão vegetal produzido encontram-se na Tabela 10. A densidade relativa aparente do carvão apresentou correlação positiva significativa com o poder calorífico superior, teor de carbono fixo, carbono elementar e densidade energética, além de negativa e significativa com o teor de cinzas e consumo específico. Protásio *et al.* (2011b) também observaram correlação positiva entre a densidade relativa aparente com o teor de carbono fixo, enquanto Oliveira *et al.* (2019) com a densidade energética. Correlações negativas da densidade relativa aparente do carvão com o teor de cinzas e o consumo específico de madeira foram observadas nos estudos de Protásio *et al.* (2011b, 2021), respectivamente.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal apresentou correlação positiva com a eficiência energética. O poder calorífico superior correlacionou-se positivamente com o carbono fixo e o carbono elementar, e negativamente com o teor de cinzas e materiais voláteis, o que corrobora com os estudos de Ahmad e Subawi (2013), Oliveira *et al.* (2019) e Protásio *et al.* (2011b). O teor de materiais voláteis apresenta correlação negativa com o de carbono fixo porque são características inversamente proporcionais, assim como o observado por Protásio *et al.* (2011a).

Tabela 10 - Matriz de correlações entre as propriedades do carvão vegetal.

	RGCV	PCS	MV	CIZ	CF	C	H	DE	CE	EE
DRA	0,11	0,48*	-0,39	<b>-0,67*</b>	<b>0,57*</b>	<b>0,57*</b>	0,41	<b>0,99*</b>	<b>-0,85*</b>	0,18
RGCV	-	-0,04	-0,21	-0,12	0,24	-0,27	-0,17	0,10	-0,44	<b>0,78*</b>
PCS		-	<b>-0,64*</b>	<b>-0,49*</b>	<b>0,76*</b>	<b>0,52*</b>	0,34	<b>0,57*</b>	-0,42	0,40
MV			-	-0,05	-0,96*	-0,49*	-0,42	-0,44	0,30	-0,32
CIZ				-	-0,24	-0,24	-0,06	-0,69*	0,77*	-0,40
CF					-	0,55*	0,43	0,63*	-0,51*	0,42
C						-	0,89*	0,60*	-0,37	-0,15
H							-	0,42	-0,27	-0,19
DE								-	-0,85*	0,21
CE									-	-0,51*

\*significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Fonte: Do Autor (2021).

As correlações positivas entre o poder calorífico superior e os teores de carbono fixo e elementar para os clones de *Eucalyptus* são explicadas devido o carbono ser, junto ao hidrogênio, os elementos combustíveis da biomassa (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Dessa forma, quanto maior a sua concentração no carvão, maior será a liberação de energia na forma de calor durante a queima (REIS *et al.*, 2019). Os resultados também evidenciam que o teor de cinzas influencia negativamente o poder calorífico do carvão, uma vez que as cinzas são os resíduos inorgânicos

contabilizados na massa residual, que permanecem após a queima do carbono fixo (PROTÁSIO *et al.*, 2011a). Lima *et al.* (2020), avaliando o carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira, também observaram este mesmo comportamento.

As propriedades do carvão vegetal são parâmetros fundamentais para a avaliação e seleção de materiais genéticos superiores para produção de carvão vegetal. Estudar as características do carvão vegetal propicia a condução da escolha da madeira com propriedades desejáveis para sua conversão energética (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

### 5.5 Resumo da interação clone x idade para o carvão vegetal

Na Tabela 11 encontra-se o resumo da interação clone x idade para o carvão vegetal.

Tabela 11 - Resumo da interação clone x idade para o carvão vegetal.

Propriedades do carvão vegetal	Efeito da idade
Rendimento gravimétrico	+
Rendimento em gases não condensáveis	Interação não expressiva
Rendimento em líquido pirolenhoso	Não significativo
Carbono fixo	+
Materiais voláteis	-
Cinzas	-
Carbono	Não significativo
Hidrogênio	Não significativo
Oxigênio	Não significativo
Nitrogênio	-
Consumo específico de madeira	-
Poder calorífico superior	Interação não expressiva
Densidade relativa aparente	+
Densidade energética	+
Eficiência energética	+

Fonte: Do Autor (2021).

A interação idade x material genético foi não significativa apenas para o rendimento em líquido pirolenhoso e os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio. Observou-se, de maneira geral, efeito da idade na qualidade do carvão vegetal. Os teores de materiais voláteis, cinzas e nitrogênio, além do consumo específico de madeira tenderam a diminuir com o aumento da idade. Entretanto, o rendimento gravimétrico de carvão, teor de carbono fixo, densidade relativa aparente e energética, e a eficiência energética apresentaram tendência de aumento com a idade dos clones. Não houve interação expressiva para o rendimento gravimétrico em gases não condensáveis e o poder calorífico superior do carvão vegetal.

O carvão vegetal apontou correlação positiva entre o rendimento gravimétrico e a eficiência energética, além da correlação direta do poder calorífico com o carbono elementar e carbono fixo. O consumo específico de madeira correlacionou de forma negativa com a densidade relativa aparente do carvão vegetal.

## 5.6 Correlação canônica

Na Tabela 12 encontram-se as correlações canônicas e os pares canônicos estimados entre o carvão vegetal (grupo I) e a madeira (grupo II), além do teste estatístico de qui-quadrado realizado e o número de graus de liberdade. As correlações canônicas significativas, considerando o nível alfa de 15%, foram entre o primeiro, o segundo e o terceiro par canônico para as idades de 4 e 5 anos, enquanto na idade de 6 anos foram o primeiro e o segundo par canônico, em que todas ficaram acima de 0,9.

Tabela 12 - Estatísticas utilizadas na avaliação das seis primeiras variáveis canônicas.

Ordem (k)	Correlação	Qui-quadrado(*)	Graus de liberdade	Probabilidade(%)
4 anos				
1	1,017896	172,7034	42	.
2	0,998908	75,99482	30	0,000732
3	0,976578	33,10801	20	3,283113
4	0,8188	11,59911	12	47,83886
5	0,546648	3,829283	6	69,97662
6	0,418007	1,344311	2	51,06068
5 anos				
1	0,997972	97,11331	42	0,000296
2	0,994845	58,55204	30	0,137365
3	0,955653	26,51171	20	14,9569
4	0,783757	9,396835	12	66,87136
5	0,522577	2,728422	6	84,20788
6	0,261489	0,495786	2	78,04433
6 anos				
1	1,099798	171,681	42	.
2	0,999682	74,97239	30	0,001016
3	0,916946	23,45266	20	26,71182
4	0,824672	10,58993	12	56,43497
5	0,545772	2,612054	6	85,57223

(\*)  $H_0 : R(k) = R(k+1) = R(k+2) = \dots = 0$

Fonte: Do Autor (2021).

Na Tabela 13, 14 e 15 encontram-se as cargas canônicas da matriz estrutura para as idades de 4, 5 e 6 anos, respectivamente, sendo que quanto maior a carga, mais importante é a variável para a correlação canônica.

Tabela 13 - Cargas canônicas da matriz estrutural entre as variáveis do carvão vegetal (grupo I) e as variáveis da madeira de *E. urophylla* (grupo II) aos 4 anos.

Cargas canônicas das variáveis do grupo I						
Variável	U1	U2	U3	U4	U5	U6
DRA	0,60027	-0,04883	0,57346	-0,09978	0,19883	0,50887
RGCV	0,19486	0,60611	0,18717	-0,3021	0,65091	-0,21139
PCS	-0,31814	-0,60939	0,39999	0,4354	0,19913	0,37177
CF	0,13045	-0,63616	0,4978	0,42533	-0,34134	-0,18183
CEM	-0,11703	0,67843	-0,03113	0,61408	-0,32268	0,20941
EE	-0,32741	0,10625	0,69755	-0,35967	0,51526	-0,0087
Cargas canônicas das variáveis do grupo II						
Variável	V1	V2	V3	V4	V5	V6
EXT	-0,32985	-0,48304	-0,47576	-0,63307	-0,09424	0,12944
LIG	-0,47482	-0,18562	-0,28171	0,11859	0,76375	0,03502
S/G	0,7431	-0,23134	0,07774	0,00765	0,01541	0,60126
G	-0,3367	0,36073	-0,40471	0,09396	-0,09972	-0,57277
MS	-0,38164	-0,52024	0,25749	-0,25608	0,40753	0,46834
DE	0,17814	-0,9375	-0,29329	-0,01904	0,02846	0,04657
FP	0,13883	0,01105	0,11407	0,60698	-0,0336	0,71511

Fonte: Do Autor (2021).

Pela Tabela 13, verifica-se que os grupos não são independentes e as associações intergrupos são estabelecidas, principalmente, pelas influências de:

- 1) O primeiro par de fatores canônicos, com correlação de 1,0119, associa o carvão vegetal de alta densidade relativa aparente, baixo poder calorífico e menor eficiência energética com a madeira de baixos teores de extrativos e lignina, monômero guaiacil da lignina e massa seca, além da maior relação S/G;
- 2) O segundo par de fatores canônicos, com correlação de 0,9989, associa o elevado rendimento gravimétrico de carvão vegetal e consumo específico de madeira com a madeira de menor teor de extrativos, maior quantidade do monômero guaiacil da lignina, que produz menos massa seca e de menor densidade energética. Também associa o carvão de baixo poder calorífico superior e carbono fixo com a madeira que produz menos massa seca e de menor densidade energética; e
- 3) O terceiro par de fatores canônicos, com correlação de 0,9766, associa o carvão de alta densidade relativa aparente e eficiência energética com a madeira de baixo conteúdo de extrativos e de quantidade do monômero guaiacil da lignina.

Tabela 14 - Cargas canônicas da matriz estrutural entre as variáveis do carvão vegetal (grupo I) e as variáveis da madeira de *E. urophylla* (grupo II) aos 5 anos.

Cargas canônicas das variáveis do grupo I						
Variável	U1	U2	U3	U4	U5	U6
DRA	-0,2268	0,2361	0,9013	0,1681	0,0038	0,2283
RGCV	-0,0983	0,6001	-0,4692	0,3605	-0,5186	-0,1054
PCS	-0,2187	-0,4093	-0,1519	0,5421	0,6546	0,1981
CF	0,0969	-0,5303	0,1281	0,2962	0,4135	-0,6590
CEM	0,9690	-0,0780	0,2163	0,0660	-0,0564	0,0232
EE	-0,0349	0,7648	-0,3313	0,0925	0,5328	-0,1085
Cargas canônicas das variáveis do grupo II						
Variável	V1	V2	V3	V4	V5	V6
EXT	-0,2679	0,4203	0,3321	-0,2241	0,2858	-0,4297
LIG	-0,0972	0,6627	-0,6456	-0,0375	-0,0925	-0,2959
S/G	0,1029	-0,1930	-0,2059	-0,3964	0,1879	-0,7344
G	-0,1337	0,5312	0,3094	-0,2894	0,1117	0,4237
MS	-0,6085	0,1100	-0,6270	-0,1694	0,2666	0,3332
DE	-0,9467	-0,3092	-0,0488	-0,0028	-0,0050	0,0667
FP	-0,2971	0,3331	-0,4071	-0,6027	-0,1365	0,1201

Fonte: Do Autor (2021).

Pela Tabela 14 verifica-se que os grupos não são independentes e as associações intergrupos são estabelecidas, principalmente, pelas influências de:

- 1) O primeiro par de fatores canônicos, com correlação de 0,9980, associa o maior consumo específico de madeira com a madeira de menor massa seca e densidade energética.
- 2) O segundo par de fatores canônicos, com correlação de 0,9948, associa o carvão vegetal de elevado rendimento gravimétrico e eficiência energética com a madeira de alto teor de lignina, monômero guaiacil e fração parede das fibras. Associa, ainda, o carvão vegetal de baixo teor de carbono fixo e poder calorífico superior com a madeira de menor densidade energética e relação S/G da lignina.
- 3) O terceiro par de fatores canônicos, com correlação de 0,9557, associa o carvão vegetal de alta densidade relativa aparente, baixo rendimento gravimétrico e eficiência energética com a madeira de elevado teor de extrativos e monômero guaiacil, além do menor teor de lignina, massa seca e fração parede das fibras.

Tabela 15 - Cargas canônicas da matriz estrutural entre as variáveis do carvão vegetal (grupo I) e as variáveis da madeira de *E. urophylla* (grupo II) aos 6 anos

Cargas canônicas das variáveis do grupo I						
Variável	U1	U2	U3	U4	U5	U6
DRA	0,50905	-0,62234	0,15348	-0,29659	0,38998	-0,29995
RGCV	0,31792	0,11569	0,39287	0,50606	-0,66688	0,1743
PCS	-0,18898	-0,1683	0,76476	-0,18343	0,55587	0,092
CF	-0,04946	-0,301	-0,18731	-0,53461	0,64348	0,41473
CEM	-0,28019	0,62928	-0,43464	-0,18478	0,53726	-0,11748
EE	0,23027	0,15869	0,80689	0,16271	-0,45873	0,18386
Cargas canônicas das variáveis do grupo II						
Variável	V1	V2	V3	V4	V5	V6
EXT	0,00098	0,39239	-0,33549	0,56417	0,40705	0,10221
LIG	-0,58442	-0,21041	0,15747	-0,57963	0,41804	0,2529
S/G	0,59631	0,03003	0,19598	-0,0978	-0,68548	0,00469
G	-0,21971	-0,27913	-0,45856	-0,3796	-0,00459	0,72011
MS	0,18409	-0,69557	0,47097	-0,02035	-0,38892	0,17541
DE	0,03777	-0,99585	0,05205	0,01772	-0,01448	-0,0541
FP	-0,49644	-0,38618	-0,00078	0,22343	-0,34148	0,25104

Fonte: Do Autor (2021).

Pela Tabela 15 verifica-se que os grupos não são independentes e as associações intergrupos são estabelecidas, principalmente, pelas influências de:

- 1) O primeiro par de fatores canônicos, com correlação de 1,0998, associa o carvão vegetal de elevada densidade relativa aparente com a madeira de menor teor de lignina, monômero guaiacil e fração parede das fibras, além da alta relação S/G da lignina; e
- 2) O segundo par de fatores canônicos, com correlação de 0,9997, associa o menor teor de carbono fixo do carvão e o maior consumo específico de madeira com a madeira de menor massa seca, densidade energética e fração parede das fibras, além do maior conteúdo de extrativos.

Para todas as idades analisadas (4, 5 e 6 anos) o carvão com elevada densidade relacionou com a madeira de menor lignina. O poder calorífico do carvão em todas as idades associou positivamente com a massa seca e a densidade energética da madeira. O alto teor de carbono fixo do carvão associou, nas três idades analisadas, com a madeira de elevada densidade energética. O elevado consumo específico de madeira está associado à madeira de baixo teor de lignina, massa seca e densidade energética.

## 6 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que:

- a) A idade da árvore influenciou as propriedades da madeira, embora a maioria dos clones tenha apresentado propriedades satisfatórias para a produção de carvão vegetal para uso siderúrgico, em regra, o material mais maduro obteve melhor desempenho.
- b) As densidades básica e energética, massa seca e teor de extrativos aumentaram com a idade da árvore. Características da madeira, como teor de holocelulose, cinzas, e nitrogênio tiveram seus valores reduzidos com a idade da planta. O material mais maduro apresentou maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal, densidade relativa aparente e energética, teor de carbono fixo e eficiência energética. Os valores de consumo específico de madeira, teor de materiais voláteis, cinzas e nitrogênio no carvão vegetal diminuíram com a idade.
- c) As correlações canônicas foram elevadas, sendo que, nas idades 4 e 5 anos, o primeiro, segundo e terceiro pares foram significativos a 15% de probabilidade, ao passo que, aos 6 anos, os dois primeiros pares foram significativos a 15% de probabilidade.
- d) Na idade de 4 anos, o elevado rendimento gravimétrico e a eficiência energética estão associados à madeira de alto conteúdo de monômeros guaiacil da lignina. Aos 5 anos, o carvão vegetal de alto rendimento gravimétrico e eficiência energética está associado com a madeira de maior teor de lignina e monômeros guaiacil, além da fração parede das fibras. Para a idade de 6 anos, o teor de carbono fixo do carvão vegetal associou positivamente com a massa seca da madeira. Em todas as idades, o alto consumo específico de madeira e o baixo poder calorífico do carvão estão associados com a madeira de menor massa seca e densidade energética.
- e) A utilização de plantios de 4 anos para produção de energia se apresenta como alternativa ideal, visto que a sua madeira e o carvão produzido apresentam características similares ao material mais maduro (5 e 6 anos), podendo reduzir os custos de produção florestal. No entanto, o clone 1 se destaca pelo seu melhor desempenho energético em relação aos demais.

## REFERÊNCIAS

- AHMAD, M.; SUBAWI, H. New Van Krevelen diagram and its correlation with the heating value of biomass. **Research Journal of Agricultural and Environmental**, Ekaterinburg, v. 2, p. 295–301, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **D1762-84**: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Philadelphia: ASTM, 2007. 2 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **E711-87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. Philadelphia: ASTM, 2004. 8 p.
- ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.
- ARAÚJO, A. C.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BRAGA, P. P. C.; LIMA, R. V.; PROTÁSIO, T. P. Efeito da relaçãoiringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 405-414, 2016.
- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: papel, cartão, celulose e madeira – determinação de resíduo (cinzas) na ignição a 525°C. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- BENITES, P. K. R. M.; LOPES, A. D. S.; GOUVÊA, A. D. F. G.; SILVA, F. C. D.; SOUZA, C. C. B. D. Caracterização tecnológica da madeira de híbridos de eucalipto irrigados e fertirrigados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 4, p. 1716-1728, out./dez. 2018.
- BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, v. 85, n. 8, p. 776-785, 2008.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. D. S.; SILVA, J. R. M. D. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 8, p. 2581-2588, 2011.

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

BRITO, J. O. **Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Piracicaba: IFEP, 1993. (Circular Técnica, 181).

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. D. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 115-124, 2010.

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**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRÓ, C. G.; SILVA, C. M. SIMÕES, da. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, Curitiba, v. 46, n. 4, p. 473-480, 2016.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 6, p. 627-635, 2013.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. D. C. O.; SANTOS, R. C. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. D. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 40, n. 3, p. 551-560, 2016.

CHEN, L. C. Nitrobenzene and cupric oxide oxidations. In: DENCE, C. W.; LIN, S. Y.; TIMELL, T. E. **Methods in lignin chemistry**. New York: SpringerVerlag, 1992. p. 301-321.

DADSWELL, H. E. The anatomy of eucalypt woods. **Division of Applied Chemistry Technological Paper**, Melbourne, V. 66, p. 1-34, 1972.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004.

DOWNES, G. M.; HUDSON, I. L.; RAYMOND, C. A.; DEAN, G. H.; MICHELL, A. J.; SCHIMLECK, L. R.; MUNERI, A. **Sampling *Eucalyptus* for wood and fibre properties**. Melbourne: CSIRO, 1997. 132 p.

DUNGAIT, J. A. J.; HOPKINS, D. W.; GREGORY, A. S.; WHITMORE, A. P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. **Global Change Biology**, Oxford, v. 18, p. 1781-1796, 2012.

- DU, S.; CHEN, W.; LUCAS, J. A. Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. **Bioresource Technology**, Essex, v. 161, p. 333-339, 2014.
- ELYOUNSSI, K.; BLIN, J. L.; HALIM, M. Highyield charcoal production by two-step pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 87, n. 1, p. 138-143, 2010.
- ELYOUNSSI, K.; COLLARD, F.; MATEKE, J. N.; BLIN, J. Improvement of charcoal yield by two-step pyrolysis on eucalyptus wood: a thermogravimetric study. **Fuel**, Guildford, v. 96, p. 161-167, 2012.
- FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.
- GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. (ed.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: Wiley-Interscience, 1971. 916 p.
- GOMES, I. A. S. **Desenvolvimento de um reator de carbonização pressurizada para resíduos agroindustriais**. 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF, 2011.
- GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. de; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005.
- GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klarson modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.
- GOUVÊA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; ASSIS, C. O.; ASSIS, M. R.; COLODETTE, J. L.; GOMES, C. M. Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 6, n. 2, p. 71-78, 2015.
- HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, 2009.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores: ano base 2020**. Brasília, DF: IBÁ, 2021. 93 p.
- ISBAEX, Crismere. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa**. 2018. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/23568>. Acesso em: 3 jul. 2019.
- JESUS, M. S. de.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P. de.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta**, Curitiba, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017.

KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 3, p. 1339-1344, Mar. 2011.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JUNIOR, U. O.; SILVA, R. C. C.; BUFALINO, L.; NUMAZAWA, S.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. **Renewable Energy**, Oxford, v. 163, p. 792-806, 2021.

LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 142, p. 105804, 2020.

LIN, S. Y.; DENCE, C. W. **Methods in lignin chemistry**. Berlin: Springer Verlag, 1992. 578 p.

LONGUI, E. L.; LIMA, I. L.; SILVA JÚNIOR, F. G.; SUCKOW, I. M. S.; FLORSHEIM, S. M. B. Correlações entre algumas propriedades físicas, características químicas e anatômicas da madeira de *Luehea divaricata* Mart. Malvaceae (Tiliaceae). **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 177-187, 2010.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R. D.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 206-224, 2021.

LOUREIRO, B. A.; VIEIRA, T. A. S.; COSTA, L. J.; SILVA, A. B.; ASSIS, M. R. D.; TRUGILHO, P. F. Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepcion, v. 21, n. 4, p. 619-630, 2019.

MORAIS, P. H. D. D.; LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETTE, J. L.; MORAIS, E. H. D. C.; JARDIM, C. M. Influence of clone harvesting age of *Eucalyptus grandis* and hybrids of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* in the wood chemical composition and in Kraft pulpability. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 237-248, 2017.

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

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 Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 56, n. 2, p. 139148, 2013.  
OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

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

OLIVEIRA, J. B.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. *In*: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 62-73.

OLIVEIRA, R. S.; SILVA, L. F. F.; ANDRADE, F. W. C.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L. Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Revista Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 62, p. 1-9, 2019.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, Kurashiki, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; MAGALHÃES, M. A. D. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, Heidelberg, v. 2012, p. 1-8, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relation between higher heating value and elemental and mineral biomass plant components. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, p. 113-122, 2011a.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013b.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 97, 2013a.

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. R. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014b.

- PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. T. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, Oxford, v. 164, p. 34-45, 2021.
- PROTÁSIO, T. P.; NEVES, T. A.; REIS, A. A. D.; TRUGILHO, P. F. Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 465-477, 2014a.
- PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011b.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; ARAÚJO, A. C. C.; BASTOS, T. A.; ROSADO, S. C. S.; PINTO, J. F. N. Classificação de clones de *Eucalyptus* por meio da relação siringil/guaiacil e das características de crescimento para uso energético. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 327-341, 2017.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.
- QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; cete, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 89, p. 100-106, 2005.
- RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.
- RANDRIAMANANTENA, T.; RAZAFINDRAMISA, F. L.; RAMANANTSIZEHENA, G.; BERNES, A.; LACABANE, C. Thermal behavior of three woods of Madagascar by thermogravimetric analysis in inert atmosphere. In: HIGH-ENERGY PHYSICS INTERNATIONAL CONFERENCE, 4., 2009, Madagascar. **Anais [...]**. Madagascar, 2009.
- R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: <http://www.Rproject.org>. Acesso em: 21 nov. 2021.
- REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p.497-505, 2012.
- REIS, J. S.; ARAUJO, R. O.; LIMA, V. M. R.; QUEIROZ, L. S.; COSTA, C. E. F.; PARDAUIL, J. J. R.; CHAAR, J. S.; ROCHA FILHO, G. N.; SOUZA, L. K. C. Combustion properties of potential Amazon biomass waste for use as fuel. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Dordrecht, v. 138, p. 3535–3539, 2019.
- RESQUIN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; CARRASCO-LETELIER, L.; CASNATI, C. R. Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and

wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 438, p. 63-74, 2019.

ROCHA, S. M. G.; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, M. N. F.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C.; SCOLFORO, H. F.; ALVARES, C. A.; NEVES, J. C. L.; XAVIER, A. C.; FIGURA, M. A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 473, p. 118290, 2020.

RODRIGUES, J.; MEIER, D.; FAIX, O.; PEREIRA, H. Determination of tree to tree variation in syringyl: guaiacyl ratio of *Eucalyptus globulus* wood lignin by analytical pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 48, n. 2, p. 121-128, 1999.

RODRIGUEZ, L. C. E.; BUENO, A. R. S.; RODRIGUES, F. Rotações de eucaliptos mais longas: análise volumétrica e econômica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 51, p. 15-28, 1997.

ROSA, S. F.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; FLEIG, F. D.; RODRIGUES, M. F.; GELAIN, N. S. Propriedades físicas e químicas de um argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa Gaúcho. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 580-590, abr./jun. 2018.

ROSADO, A. M.; ROSADO, T. B.; ALVES, A. L.; LAVIOLA, B. G.; BHERING, L. L. Seleção simultânea de clones de eucalipto de acordo com produtividade, estabilidade e adaptabilidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 7, p. 966-973, 2012.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. New York: Taylor & Francis, 2005.

SALIBA, E. D. O. S.; RODRIGUEZ, N. M.; MORAIS, S. A. L. D.; PILÓ-VELOSO, D. Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 5, p. 917-928, dez. 2001.

SANTANA, W. M. S.; CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2012.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

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

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151, 2012.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

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

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

SILVA, M. F.; FORTES, M. M.; SETTE JUNIOR, C. R. Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 25, n. 3, 2018.

SOARES, A. K.; LOURENÇON, T. V.; DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A. Composição química e estabilidade dimensional da madeira de três eucaliptos. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 1-7, 2018.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOFLE, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

SOLOMONS, T. W. G. **Química orgânica**. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 7, p. 2634-2639, 2011.

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. 1-15, 1996.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

TRUGILHO, P. F.; REGAZZI, A. J.; VITAL, B. R.; GOMIDE, J. L. Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus* e seleção de genótipos superiores para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 113-130, 1997.

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**, Curitiba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALVES, J. C.; NOGUEIRA, M. Relação entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 89-95, 2001.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.

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**, Golden, v. 16, n. 5, p. 3065– 3083, 2012.

VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; SELVATTI, T. S.; BARAÚNA, E. E. P.; NAPOLI, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcory*. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 59-64, 2013.

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

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

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, Guildford, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

## ANEXOS

Tabela 16 - Resumo das análises de variância realizadas para o poder calorífico superior, densidade básica, massa seca e as características anatômicas da madeira.

FV	GL	Quadrado Médio				
		DB (g.cm <sup>-3</sup> )	MS (kg)	PCS (kcal.kg <sup>-1</sup> )	EP (μm)	FP (%)
Clone	2	0,021547*	1271*	60981*	3,3999*	218,229*
Erro na parcela	12	0,000150	19	5111	0,2041	20,632
Idade	5	0,023893*	51351*	14428*	1,3209*	33,125*
Clone x Idade	10	0,001942*	963*	7356	0,5525*	35,765*
Erro na subparcela	60	0,000245	20	3720	0,1408	12,689
Média geral	-	0,512	68,97	4612	4,91	54,88
CVe (%) na parcela	-	2,39	6,34	1,55	9,21	8,28
CVe (%) na subparcela	-	3,06	6,46	1,32	7,65	6,49

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental; PCS = Poder calorífico superior; DB = Densidade básica; MS = Massa Seca; EP = espessura da parede; FP = fração parede.

Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 17 - Resumo das análises de variância realizadas para a composição química estrutural da madeira.

FV	GL	Quadrado Médio				
		LIG (%)	S/G	EXTac (%)	HOLO (%)	CIZ (%)
Clone	2	13,5726*	3,08688*	4,2607*	29,0861*	0,007803*
Erro na parcela	12	0,5933	0,04669	0,1389	0,4916	0,000935
Idade	5	3,5387*	0,09141*	26,9856*	23,8209*	0,311173*
Clone x Idade	10	1,5994	0,26520*	1,9231*	2,7035*	0,013854*
Erro na subparcela	60	1,0418	0,03656	0,1317	1,2391	0,001673
Média geral	-	31,40	3,52	2,38	65,90	0,32
CVe (%) na parcela	-	2,45	6,13	15,66	1,06	9,49
CVe (%) na subparcela	-	3,25	5,43	15,25	1,69	12,69

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental; LIG = Lignina total; S/G = relação siringil/guaiacil da lignina; EXTac = Extrativos em acetona; HOLO = Holocelulose; e CIZ = Cinzas.

Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 18 - Resumo das análises de variância realizadas para a vanilina e siringaldeído da lignina.

FV	GL	Quadrado Médio	
		Vanilina (mmol.L <sup>-1</sup> )	Siringaldeído (mmol.L <sup>-1</sup> )
Clone	2	0,005389	0,242986*
Erro na parcela	12	0,003313	0,024366
Idade	6	0,007570	0,297191*
Clone x Idade	12	0,006122	0,048022
Erro na subparcela	72	0,003449	0,032929
Média geral	-	0,46	1,57
CVe (%) na parcela	-	12,56	9,96
CVe (%) na subparcela	-	12,82	11,58

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental.

Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 19 - Resumo das análises de variância realizadas para a análise química elementar da madeira.

FV	GL	Quadrado Médio			
		N (%)	C (%)	H (%)	O (%)
Clone	2	0,014098*	4,8734*	0,070218	4,2474*
Erro a	12	0,001332	0,1871	0,040435	0,3689
Idade	5	0,054426*	1,6067*	0,069991*	0,4778
Clone x Idade	10	0,028596*	1,2915*	0,093255*	1,0751*
Erro b	60	0,003396	0,1663	0,022904	0,2346
Média geral	-	0,78	49,60	6,16	43,10
CVe (%) na parcela	-	4,65	0,87	3,27	1,41
CVe (%) na subparcela	-	7,42	0,82	2,46	1,12

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental; N = Nitrogênio; C = Carbono; H = Hidrogênio; O = Oxigênio.

Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 20 - Resumo das análises de variância realizadas para estoque de carbono por massa seca (ECM) e índice de Runkel (IR) da madeira, além da Massa seca de carbono fixo (ECF) do carvão vegetal.

FV	GL	Quadrado Médio		
		ECM (kg)	IR	ECF (kg)
Clone	2	0,004623*	0,60598*	0,006921*
Erro na parcela	12	0,000062	0,05639	0,000084
Idade	6	0,006693*	0,08355*	0,003658*
Clone x Idade	12	0,000705*	0,08539*	0,000845*
Erro na subparcela	72	0,000074	0,03402	0,000150
Média geral	-	0,25	1,24	0,26
CVe (%) na parcela	-	3,10	19,13	3,52
CVe (%) na subparcela	-	3,39	14,86	4,70

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental.  
Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 21 - Resumo das análises de variância realizadas para os rendimentos da carbonização e os teores de materiais voláteis e carbono fixo.

FV	GL	Quadrado Médio				
		RGCV (%)	RGGNC (%)	RLP (%)	MV (%)	CF (%)
Material Genético (G)	2	2,7476*	11,4834*	3,126	2,6654	2,3497
Erro a	12	0,5675	2,8340	3,363	0,7993	0,7767
Idade (I)	5	3,9819*	23,1329*	34,134*	3,9518*	5,8792*
G x I	10	1,7612*	6,9554*	4,910	3,5356*	2,9859*
Erro b	60	0,2394	3,0191	3,155	0,6191	0,6202
Média geral	-	40,29	42,11	17,59	31,07	68,29
CVe a (%)	-	1,87	4,00	10,42	2,88	1,29
CVe b (%)	-	1,21	4,13	10,10	2,53	1,15

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental; RGCV = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RGGNC = Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis; RLP = Rendimento em líquido pirolenhoso; MV = Materiais voláteis; e CF = Carbono fixo.

Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 22 - Resumo das análises de variância realizadas para os constituintes elementares e o teor de cinzas da madeira.

FV	GL	Quadrado Médio				
		C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	CIZ (%)
Material Genético (G)	2	12,8490*	0,1083*	0,0117*	14,6130*	0,3586*
Erro a	12	0,8147	0,0109	0,0055	0,9074	0,0083
Idade (I)	5	2,4475*	0,0114	0,0599*	2,2473*	0,7699*
G x I	10	0,7493	0,0063	0,0211*	0,7450	0,0850*
Erro b	60	0,6117	0,0066	0,0052	0,6758	0,0107
Média geral	-	75,54	3,90	0,74	19,82	0,65
CVe a (%)	-	1,19	2,68	10,07	4,81	14,08
CVe b (%)	-	1,03	2,08	9,73	4,15	15,97

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental; C = Carbono; H = Hidrogênio; N = Nitrogênio; O = Oxigênio; e CIZ = Cinzas.

Fonte: Do Autor (2021).

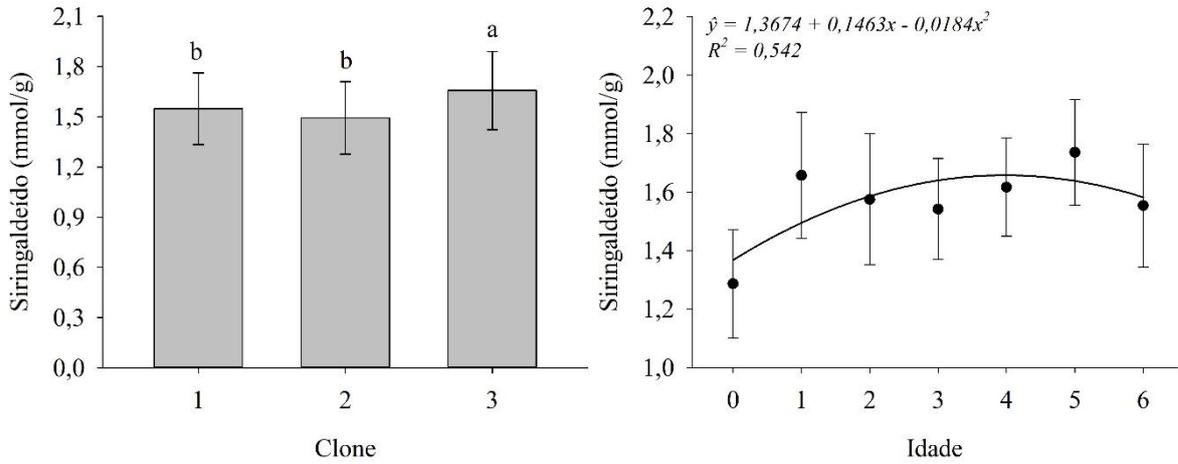
Tabela 23 - Resumo das análises de variância realizadas para o poder calorífico superior, densidade relativa aparente e energética, eficiência energética e consumo.

FV	GL	Quadrado Médio				
		CEM (m <sup>3</sup> .ton <sup>-1</sup> )	PCS (kcal.kg <sup>-1</sup> )	DRA (g.cm <sup>-3</sup> )	DE (Gcal.m <sup>-3</sup> )	EE (%)
Material Genético (G)	2	1,59501*	23931*	0,014392*	0,78877*	12,4968*
Erro a	12	0,01868	5586	0,000173	0,00822	2,6709
Idade (I)	5	2,76833*	57276*	0,006373*	0,37862*	24,0503*
G x I	10	0,26484*	15830*	0,001265*	0,07204*	7,5862*
Erro b	60	0,02876	4680	0,000283	0,01556	1,2382
Média geral	-	4,89	7018,02	0,381	2,67	61,33
CVe a (%)	-	2,79	1,06	3,45	3,39	2,66
CVe b (%)	-	3,46	0,97	4,42	4,66	1,81

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; CVe = Coeficiente de variação experimental; DRA = Densidade relativa aparente; DE = Densidade energética; PCS = Poder calorífico superior; EE = Eficiência energética; CEM = Consumo específico de madeira.

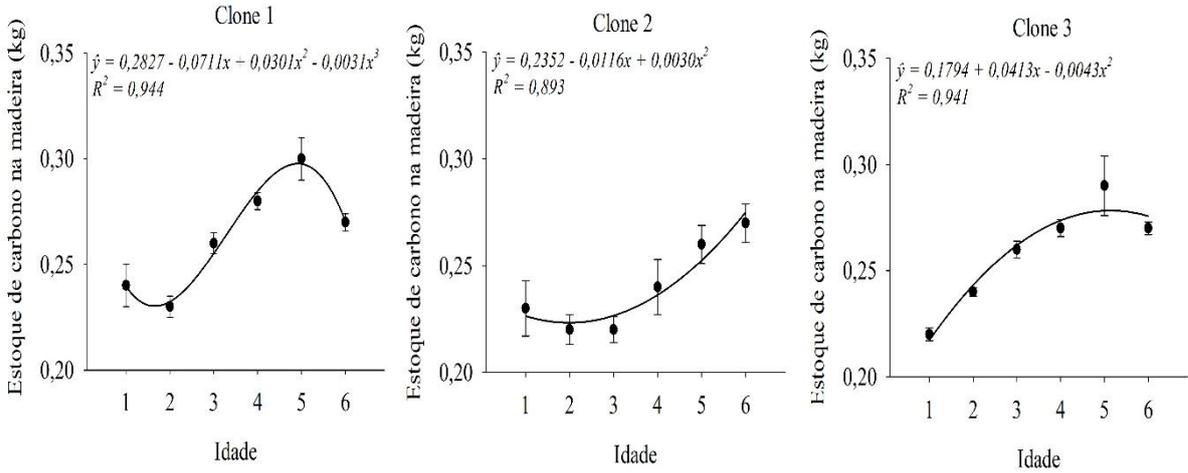
Fonte: Do Autor (2021).

Figura 18 - Conteúdo de siringaldeído da lignina na madeira em função do clone e da idade (anos).



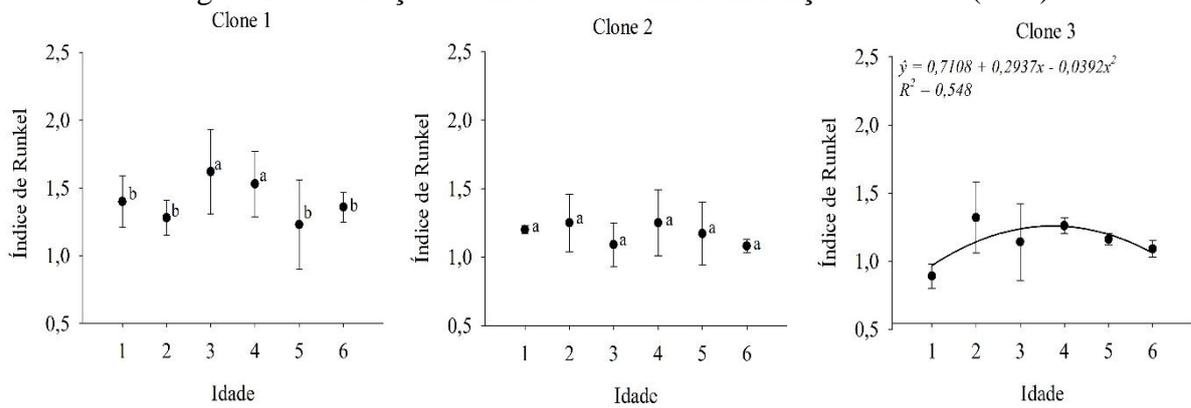
Fonte: Do Autor (2021).

Figura 19 - Variação do estoque de carbono na massa seca em função da idade (anos).



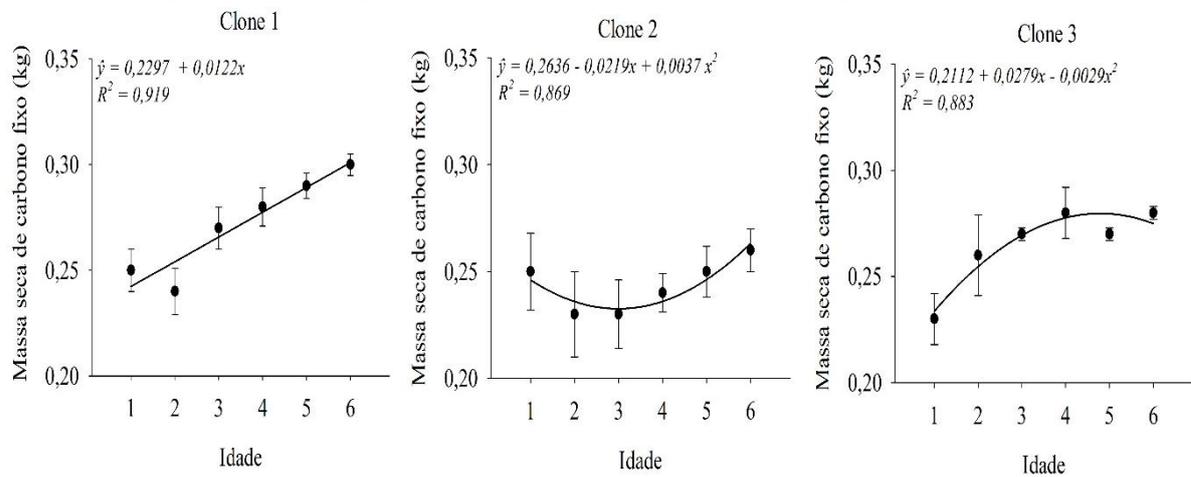
Fonte: Do Autor (2021).

Figura 20 - Variação do índice de Runkel em função da idade (anos).



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 21 - Variação de massa de carbono fixo em função da idade (anos).



Fonte: Do Autor (2021).