



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**UDSON DE OLIVEIRA BARROS JUNIOR**

**QUALIDADE DA MADEIRA DE PROGÊNIES E CLONES HÍBRIDOS DE *Corymbia*  
PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL SIDERÚRGICO**

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2025

UDSON DE OLIVEIRA BARROS JUNIOR

**QUALIDADE DA MADEIRA DE PROGÊNIES E CLONES HÍBRIDOS DE *Corymbia*  
PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL SIDERÚRGICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais, na Área de Concentração Ciências Florestais.  
Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre  
Coorientadores: João Gabriel Missia da Silva e Thiago de Paula Protásio

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2025

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

B277q Barros Junior, Udson de Oliveira, 1993-  
Qualidade da madeira de progênies e clones híbridos de Corymbia para a produção de carvão vegetal siderúrgico / Udson de Oliveira Barros Junior. - 2025.  
110 f. : il.

Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre.

Coorientadores: João Gabriel Missia da Silva, Thiago de Paula Protásio.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

I. Vidaurre, Graziela Baptista. II. da Silva, João Gabriel Missia. III. Protásio, Thiago de Paula. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

---

CDU: 630\*38

**QUALIDADE DA MADEIRA DE PROGÊNEIS E CLONES HÍBRIDOS DE *Corymbia*  
PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL SIDERÚRGICO**

**Udson de Oliveira Barros Junior**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais, na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 24 de março de 2025.



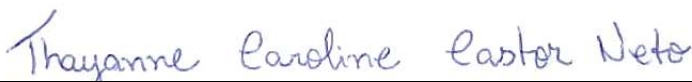
---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro** (Examinadora externa)  
Universidade Federal de Viçosa



---

**Prof. Dr. Dalton Longue Júnior** (Examinador externo)  
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia



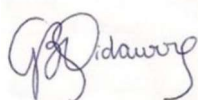
---

**Dr<sup>a</sup>. Thayanne Caroline Castor Neto** (Examinadora externa)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

**Prof. Dr. Jordão Cabral Moulin** (Examinador interno)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Graziela Baptista Vidaurre Dambroz** (Orientadora)  
Universidade Federal do Espírito Santo

Aos meus pais, Udson de Oliveira Barros (*in memoriam*) e Eunice de Brito Santos, pelo apoio, carinho e confiança no meu sucesso durante toda a minha trajetória acadêmica e de vida.

Dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela vida.

À minha família por todo o amor de sempre.

Aos amigos que fiz em Jerônimo Monteiro durante o período em que vivi na cidade.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) por ter me acolhido durante o período do curso de doutorado, bem como todo o seu corpo docente, técnicos, seguranças e terceirizados.

Em relação ao corpo técnico da UFES, agradeço em especial ao marceneiro, o Senhor Elecy Palacio Constantino e ao técnico do laboratório de anatomia, o Senhor José Geraldo Lima de Oliveira.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais (PPGCFL/UFES) pela oportunidade de obter o título de doutor.

À professora Dr<sup>a</sup>. Graziela Baptista Vidaurre por ter sido minha orientadora durante os 4 anos de doutorado e por todos os ensinamentos, aprendizados, experiências e parcerias de pesquisa. Meu muito obrigado, Grazi!

Ao Dr. João Gabriel Missia da Silva pela coorientação desta tese de doutorado, pela amizade e todos os ensinamentos e conselhos. Obrigado, João!

Ao professor Dr. Thiago de Paula Protásio (UFLA) por aceitar participar do comitê de orientação desta tese de doutorado como coorientador e pelas contribuições na minha banca de Qualificação de Doutorado.

Ao meu amigo Paulo Roberto Correia Marcelino pela amizade conquistada e por ter me auxiliado na etapa inicial da minha tese de doutorado.

Ao Núcleo de Pesquisa em Qualidade da Madeira (NUQMAD), grupo do qual fiz parte e que me proporcionou toda a estrutura física para a realização das análises de qualidade da madeira.

A todos com quem convivi no NUQMAD, João Gabriel Missia da Silva, Maria Naruna Félix Almeida, Nauan Ribeiro Marques Cirilo, Gustavo Jaske da Conceição, Vaniele Bento dos Santos, Thayanne Caroline Castor Neto, Stéffany Lima de Araujo, Sâmara Magdalene Vieira Nunes, Bruno Sangali Arantes, Renata Guilherme Candido da Silva, Natielly Cristine Gomes de Medeiros, Érica Patrícia Pinto Queiroz, Glaycianne Christine Vieira dos Santos, Aguinaldo José de Souza, e a todos os alunos de

graduação que atuam/atuaram como estagiários, em especial à Hérika Fontes de Almeida por ter atuado dentro do projeto de pesquisa da minha tese como bolsista de iniciação científica.

Ao Laboratório Multiusuário de Energia da Biomassa (LEB) na pessoa do professor Dr. Ananias Francisco Dias Júnior (UFES) pela oportunidade de realização das carbonizações e análises do carvão vegetal.

Ao Laboratório de Química da Madeira, na pessoa do técnico de laboratório Luciano da Costa Dias, pela estrutura para a realização das análises do teor de extrativos totais e de lignina total.

À Dr<sup>a</sup>. Sofia Maria Gonçalves Rocha (Eldorado Brasil) pelas contribuições na minha banca de Qualificação de Doutorado e pelas parcerias de pesquisa.

Aos professores Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Jordão Moulin Cabral, Dalton Longue Júnior e à Dr<sup>a</sup>. Thayanne Caroline Castor Neto por aceitar compor a minha banca de defesa de tese de doutorado e pelas contribuições ao trabalho.

Ao professor Demetrius Profeti pela estrutura para as análises de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier no Departamento de Química e Física da UFES/Alegre, e pelas contribuições na minha banca de Qualificação de Doutorado.

À professora Dr<sup>a</sup>. Damaris Guimarães pela estrutura para as análises de termogravimetria e de difração de raios-X no Departamento de Engenharia Rural da UFES/Alegre.

Aos professores Dr. Fabricio Gomes Gonçalves (UFES), e Dr<sup>a</sup>. Maria Naruna Félix Almeida (UEPA) e ao pesquisador Dr. Fernando Nunes Gouveia (LPF/SFB) pelas contribuições na minha banca de Projeto de Tese de Doutorado.

Ao professor Dr. Michel Picanço Oliveira (UFES) pelo auxílio no tratamento de dados e confecção de gráficos das análises de termogravimetria e difração de raios-X da madeira.

À empresa ArcelorMittal S.A. pela parceria de pesquisa no âmbito do projeto *UFES/ArcelorMittal-Bioflorestas Etapa 2* que proporcionou a realização da pesquisa da minha tese de doutorado na pessoa do pesquisador Atus Ventura Lemos.

Ao Engenheiro Florestal Caio Varonil de Almada Oliveira pelas contribuições no âmbito da parceria *UFES/ArcelorMittal-Bioflorestas Etapa 2*.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelos diversos financiamentos de projetos.

Muito obrigado!

## RESUMO

BARROS JUNIOR, Udson de Oliveira. **Qualidade da madeira de progênies e clones híbridos de *Corymbia* para a produção de carvão vegetal siderúrgico**. 2025. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador (a): Profa. Dr<sup>a</sup>. Graziela Baptista Vidaurre. Coorientadores: Dr. João Gabriel Missia da Silva e Dr. Thiago de Paula Protásio.

Na seleção de genótipos superiores para a produção de carvão vegetal, um dos principais desafios é definir quais propriedades da madeira exercem maior influência sobre a qualidade final do produto. Nesse contexto, torna-se essencial estabelecer relações entre propriedades da madeira e do carvão vegetal, utilizando ferramentas estatísticas que permitam quantificar essas associações. Tais abordagens possibilitam a identificação das propriedades mais relevantes e a seleção de materiais genéticos com maior aptidão para fins energéticos, principalmente quando se trata do gênero *Corymbia*, de grande interesse industrial e ainda pouco estudado para produção de carvão vegetal. O presente trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades da madeira e do carvão vegetal de 11 genótipos de *Corymbia*, com o intuito de identificar os materiais mais promissores para a produção de carvão vegetal. Para isso, foram empregadas duas metodologias de seleção de genótipos: matriz de importância e análise de agrupamento multivariado. A matriz de importância demonstrou-se uma ferramenta eficiente para a seleção de genótipos, destacando-se pela praticidade na escolha das propriedades e pela alta reprodutibilidade dos resultados. Já a análise de agrupamento, conduzida com base em propriedades previamente selecionadas, apresentou alta explicação da variabilidade total dos dados, evidenciando boa capacidade de agrupamento dos genótipos avaliados. Dentre as propriedades analisadas, as que mais contribuíram para a seleção dos materiais foram a densidade básica da madeira, densidade relativa aparente, densidade a granel e rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Com base nos resultados obtidos pelas duas metodologias, os genótipos mais aptos e indicados para uso em programas de melhoramento genético voltados à produção de carvão vegetal foram os clones CTC2 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), CTCM (*C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata*), e a progênie PTM (*C. torelliana* x *C. maculata*). Esses materiais

apresentaram desempenho superior em relação às principais propriedades de interesse, reunindo alta qualidade da madeira e elevada eficiência na conversão em carvão vegetal. Os resultados deste estudo reforçam a importância da seleção criteriosa de propriedades tecnológicas da madeira e demonstraram a viabilidade de aplicar metodologias multivariadas como ferramentas complementares na tomada de decisão para o melhoramento de espécies florestais voltadas à produção de carvão vegetal.

**Palavras-chave:** Melhoramento genético, qualidade da madeira, bioenergia.

## ABSTRACT

BARROS JUNIOR, Udson de Oliveira. **Wood quality of progenies and clones of *Corymbia* for the production of steel charcoal**. 2025. Thesis (Doctorate in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor (a): Profa. Dr<sup>a</sup>. Graziela Baptista Vidaurre. Co-advisors: Dr. João Gabriel Missia da Silva e Dr. Thiago de Paula Protásio.

In the selection of superior genotypes for charcoal production, one of the main challenges is determining which wood properties have the greatest influence on the final quality of the product. In this context, it becomes essential to establish relationships between wood and charcoal properties using statistical tools that allow for the quantification of these associations. Such approaches make it possible to identify the most relevant properties and to select genetic materials with the greatest suitability for energy purposes, especially in the case of the *Corymbia* genus, which holds significant industrial interest but has been little studied for charcoal production. This study aimed to evaluate the wood and charcoal properties of 11 *Corymbia* genotypes, with the aim of identifying the most promising materials for charcoal production. To achieve this, two genotype selection methodologies were employed: importance matrix and multivariate cluster analysis. The importance matrix proved to be an efficient tool for genotype selection, notable for its practicality in selecting properties and the high reproducibility of results. Cluster analysis, based on previously selected properties, showed a high explanation of the total variability in the data, demonstrating strong clustering capability of the evaluated genotypes. Among the analyzed properties, the ones that contributed most to material selection were basic wood density, apparent relative density, bulk density, and gravimetric yield in charcoal. Based on the results from both methodologies, the genotypes most suitable and recommended for use in breeding programs aimed at charcoal production were the clones CTC2 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), CTCM (*C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata*), and the progeny PTM (*C. torelliana* x *C. maculata*). These materials showed superior performance in key properties of interest, combining high wood quality with high efficiency in charcoal conversion. The results of this study reinforce the importance of careful selection of technological wood properties and demonstrated the

feasibility of applying multivariate methodologies as complementary tools in decision-making for the genetic improvement of forest species targeted at charcoal production.

**Keywords:** Breeding, wood quality, bioenergy.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	16
2. OBJETIVOS .....	19
2.1. Objetivo geral .....	19
2.2. Objetivos específicos .....	19
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	19
3.1. Aspectos genéticos e tecnológicos sobre o gênero <i>Corymbia</i> .....	19
3.2. Propriedades do carvão vegetal para a termo redução do minério de ferro .....	24
3.3. Critérios de qualidade da madeira para a seleção de genótipos no setor de carvão vegetal siderúrgico.....	26
3.4. Metodologias para seleção de genótipos jovens de <i>Corymbia</i> no setor de carvão vegetal siderúrgico .....	30
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	31
4.1. Área de estudo e detalhamento dos genótipos de <i>Corymbia</i> .....	31
4.2. Amostragem e coleta da madeira .....	34
4.3. Análise das propriedades da madeira .....	34
4.3.1. Densidade básica da madeira (DBM) e da casca (DBC) .....	34
4.3.2. Propriedades macroscópicas da casca e do lenho .....	35
4.3.3. Anatomia descritiva dos vasos e das fibras .....	37
4.3.4. Preparo das amostras para as análises químicas .....	38
4.3.5. Composição química estrutural e não estrutural .....	39
4.3.6. Composição química imediata .....	39
4.3.7. Avaliações energéticas .....	40
4.3.8. Análises termogravimétricas .....	40
4.3.9. Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) .....	41
4.3.10. Difração de raios X (DRX) .....	41

4.4. Processos e balanços da carbonização e consumo específico de madeira .....	41
4.5. Caracterização do carvão vegetal .....	43
4.5.1. Densidade relativa aparente (DRA) e densidade à granel (DG) .....	43
4.5.2. Índice de friabilidade .....	43
4.5.3. Composição química imediata .....	44
4.5.4. Avaliações energéticas .....	44
4.6. Análises estatísticas .....	44
4.7. Avaliação das propriedades da madeira e do carvão vegetal para seleção dos genótipos de <i>Corymbia</i> .....	45
4.8. Agrupamento multivariado para a seleção dos genótipos de <i>Corymbia</i> .....	47
5. RESULTADOS .....	48
5.1. Efeito do genótipo sobre as propriedades da madeira .....	48
5.1.1. Densidade básica da madeira (DBM) e da casca (DBC) .....	48
5.1.2. Propriedades macroscópicas da casca e do lenho .....	49
5.1.3. Anatomia descritiva dos vasos e das fibras .....	51
5.1.4. Composição química estrutural e não estrutural .....	53
5.1.5. Composição química imediata .....	54
5.1.6. Avaliações energéticas .....	55
5.1.7. Decomposição termogravimétrica .....	56
5.1.8. Grupos químicos funcionais .....	58
5.1.9. Cristalinidade da celulose .....	59
5.2. Balanços da carbonização e consumo específico de madeira .....	61
5.3. Caracterização do carvão vegetal .....	62
5.3.1. Densidades relativa aparente (DRA) e densidade a granel (DG) .....	62
5.3.2. Índice de friabilidade .....	64
5.3.3. Composição química imediata .....	65

5.3.4. Avaliações energéticas .....	65
5.4. Avaliação das propriedades da madeira e do carvão vegetal para seleção dos genótipos de <i>Corymbia</i> .....	66
5.5. Agrupamento multivariado para a seleção dos genótipos de <i>Corymbia</i> .....	71
6. DISCUSSÃO .....	78
6.1. Efeito do genótipo sobre as propriedades da madeira .....	78
6.1.1. Densidade básica da madeira (DBM) e da casca (DBC) .....	78
6.1.2. Propriedades macroscópicas da casca e do lenho .....	79
6.1.3. Anatomia descritiva dos vasos e das fibras .....	82
6.1.4. Composição química estrutural e não estrutural .....	83
6.1.5. Composição química imediata .....	84
6.1.6. Avaliações energéticas .....	85
6.1.7. Decomposição termogravimétrica .....	87
6.1.8. Grupos químicos funcionais .....	88
6.1.9. Cristalinidade da celulose .....	89
6.2. Balanços da carbonização e consumo específico de madeira .....	90
6.3. Caracterização do carvão vegetal .....	91
6.3.1. Densidades relativa aparente (DRA) e densidade a granel (DG) .....	91
6.3.2. Índice de friabilidade .....	92
6.3.3. Composição química imediata .....	92
6.3.4. Avaliações energéticas .....	93
6.4. Avaliação das propriedades da madeira e do carvão vegetal para seleção dos genótipos de <i>Corymbia</i> .....	93
6.5. Agrupamento multivariado para a seleção dos genótipos de <i>Corymbia</i> .....	96
CONCLUSÃO .....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como o maior produtor mundial de carvão vegetal e o único país a empregá-lo em larga escala como fonte termo redutora na fabricação de ferro-gusa, aço, ferro-ligas e silício metálico. O carvão vegetal é uma fonte renovável de energia que substitui os combustíveis fósseis, principalmente nos setores doméstico e comercial, e como fonte de carbono, extensivamente utilizado pelas indústrias siderúrgicas, principalmente em substituição ao carvão mineral.

A sua utilização como fonte de energia e carbono de balanço neutro reduz drasticamente as emissões de gases de efeito estufa da atmosfera, principalmente o SO<sub>2</sub> e o CO<sub>2</sub>, mitigando os efeitos desses gases nas mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global, uma contribuição significativa e uma prática altamente sustentável.

Em 2023, pela primeira vez, a área total coberta por cultivos florestais no Brasil ultrapassou 10 milhões de hectares, dos quais 7,8 milhões de hectares são cobertos por cultivos com espécies de *Eucalyptus*, correspondente a 76% da área total plantada (IBÁ, 2024). Desse plantel florestal, 6,7 milhões de toneladas de carvão vegetal foram produzidos em 2023 no Brasil, quase a totalidade proveniente de cultivos florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* (IBÁ, 2024).

A importância deste gênero para os cultivos se deve a várias razões, dentre elas ao amplo e contínuo trabalho de melhoramento genético que garante ótima adaptabilidade ambiental a diversos gradientes edafoclimáticos, à produção de madeira de elevada qualidade, que atende às exigências de diversos segmentos do setor florestal, e à ótima relação custo-benefício no processo de transformação da madeira em carvão vegetal, que atrai produtores independentes de madeira e a construção de mais fornos de carbonização.

Apesar da importância deste gênero para o setor florestal brasileiro, existe a necessidade de expansão das áreas cultivadas e adaptação de novas espécies de elevada produtividade, para atender as previsões de aumento da demanda por madeira legal. Isso permitirá aliviar os efeitos das perdas de produtividade de alguns cultivos de *Eucalyptus* em áreas específicas e dos aumentos nos custos de produção do carvão vegetal. Para isso, as espécies que forem selecionadas deverão produzir

madeira com custos operacionais iguais ou menores, bem como de qualidade igual ou superior aos praticados na produção da madeira do gênero *Eucalyptus*.

Essa realidade é especialmente importante no atual cenário de mudanças climáticas que ameaçam a produtividade dos atuais cultivos florestais. Considerando a complexidade e a imprevisibilidade de eventos climáticos cada vez mais intensos, como o *El Niño* e a *La Niña*, é essencial estudar, conhecer e explorar novas espécies que combinem ampla adaptabilidade ambiental e produtividade de madeira de qualidade desejável, principalmente em locais onde os cultivos de *Eucalyptus* já se mostram menos produtivos. O melhoramento e a seleção genética de novas espécies devem atrelar características de rápido crescimento, elevada produtividade volumétrica e alta qualidade da madeira, a fim de desenvolver materiais superiores destinados à produção de carvão vegetal.

Nesse contexto, as espécies do gênero *Corymbia* se destacam por combinar simultaneamente tolerância a estresses ambientais e produção de madeira de qualidade desejável para diferentes aplicações. Quanto à produção de carvão vegetal, as espécies de *Corymbia* já são utilizadas em escala industrial, sendo apontadas como promissoras para a substituição parcial das espécies de *Eucalyptus* no setor de carvão vegetal.

Além das vantagens já discutidas, outra característica que favorece a utilização das espécies de *Corymbia* é a capacidade de propagação e hibridação de genótipos com potencial reprodutivo e de desenvolvimento superior em comparação com espécies puras. Isso facilita e acelera a produção de novos clones/materiais genéticos para testes em campo, já que o setor florestal demanda longos tempos de avaliação da qualidade da madeira para ter respostas mais assertivas.

Isso é particularmente importante para o gênero *Corymbia*, cuja capacidade de reprodução assexuada via enraizamento é muito reduzida. Por esta razão, os plantios comerciais de *Corymbia* no Brasil foram tradicionalmente estabelecidos por via seminal. É sabido que a propagação sexuada gera inúmeros problemas, tais como alta variabilidade genética, baixa produtividade volumétrica e baixa produção de biomassa. Os cruzamentos que ocorrem de forma espontânea em algumas espécies do gênero, favorecem a formação de híbridos interespecíficos mais vigorosos, com alta produtividade e elevada qualidade da madeira.

O principal cruzamento que tem sido estabelecido é entre as espécies de *C. torelliana* e *C. citriodora*, apesar de espécies como *C. maculata*, *C. henryi* e outras também terem sido cruzadas com sucesso. O foco nas duas primeiras espécies se deve ao fato de que a primeira é considerada estratégica para o melhoramento genético do gênero pela alta capacidade de enraizamento, enquanto que a segunda produz madeira de alta densidade, gerando ganhos genéticos em termos de maior crescimento, facilitada propagação vegetativa e melhoria da qualidade da madeira.

Dada a importância dos cruzamentos entre diferentes genótipos para a formação de híbridos superiores, é indispensável a avaliação destes materiais do ponto de vista dos parâmetros genéticos, de crescimento em campo, da produção de madeira e do ponto de vista dos critérios de qualidade da madeira. Isso ocorre visto que há significativa variação da madeira entre diferentes genótipos, especialmente entre aqueles de menores idades (indivíduos mais jovens). A avaliação da qualidade da madeira mais jovem fornece subsídios importantes e precisos para os programas de melhoramento florestal, auxilia na seleção de genótipos superiores de forma mais rápida e gera informações para a sua utilização precoce na indústria siderúrgica.

As avaliações de qualidade da madeira pelas empresas da indústria siderúrgica costumam ser realizadas considerando um número reduzido de critérios de qualidade da madeira, geralmente critérios de fácil obtenção, como a densidade da madeira e a densidade a granel do carvão vegetal. No entanto, outros critérios de qualidade da madeira, como as propriedades físicas, anatômicas, químicas e estimativas energéticas podem ser consideradas durante o processo de seleção dos genótipos. Para isso, é importante que estes critérios sejam avaliados de modo a se definir quais são mais importantes e significativos para a qualidade final da madeira para a produção do carvão vegetal de elevada qualidade.

Desse modo, esta pesquisa busca definir os critérios de qualidade da madeira que mais contribuem para a seleção de genótipos de *Corymbia* mais indicados para a produção de carvão de uso vegetal siderúrgico.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

- ✓ Selecionar genótipos de *Corymbia* mais indicados para a produção de carvão vegetal siderúrgico com base em critérios de qualidade da madeira.

### 2.2. Objetivos específicos

- ✓ Indicar as propriedades da madeira e do carvão vegetal que mais contribuem para a seleção de genótipos de *Corymbia* para a produção de carvão vegetal siderúrgico.
- ✓ Ranquear os genótipos cujos critérios de qualidade da madeira mais se relacionam com os critérios de qualidade do carvão vegetal.
- ✓ Apresentar de forma adequada e efetiva, metodologias de seleção dos critérios de qualidade da madeira e dos genótipos de *Corymbia*.

## 3. REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1. Aspectos genéticos e tecnológicos sobre o gênero *Corymbia*

A partir dos anos 1970, após décadas de estudos e trabalhos científicos, alguns relatos morfológicos e moleculares apontaram que o gênero botânico conhecido como *Eucalyptus* não era um agrupamento taxonômico puro (ROZEFELDS, 1996). Essa descoberta trouxe a necessidade de reclassificação deste importante gênero, a qual se baseava na existência de duas diferentes linhagens, a primeira incluindo os até então subgêneros *Angophora* e *Corymbia*, e a segunda compreendendo o subgênero *Eucalyptus*.

Assim, nos anos 1990, o gênero *Eucalyptus* foi reagrupado, o que culminou com a criação de dois novos gêneros, *Angophora* e *Corymbia* (HILL & JOHNSON, 1995). Os estudos que propuseram a criação desses dois novos gêneros se basearam, principalmente, na diferenciação da morfologia das suas flores. Nas espécies do gênero *Eucalyptus*, as sépalas e pétalas são fundidas em um ou dois opérculos que cobrem os estames e o ovário, enquanto que no gênero *Angophora* as sépalas e pétalas são livres. Já no gênero *Corymbia*, os opérculos também existem, porém são individualizados, diferente do que acontece no *Eucalyptus*, onde eles estão agrupados em número de dois ou três (ROZEFELDS, 1996).

Desta forma, surgiu a partir de 1995, o gênero botânico *Corymbia*, pertencente à família Myrtaceae, e que compreende cerca de 113 espécies e 23 subespécies originárias da Austrália, Papua-Nova Guiné e Tasmânia. Dentre as espécies antes classificadas dentro do gênero *Eucalyptus*, as reclassificações mais importantes foram das espécies de *C. citriodora* (Hook) K. D. Hill & L. A. S. Johnson (1995), cuja classificação antiga se dava com o nome de *E. citriodora*, por Hooker, em 1846, e *C. torelliana* (F. Muell.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson (1995), anteriormente classificada como *E. torelliana*, por Mueller, em 1877.

Além dessas duas espécies, *C. maculata*, *C. henryi*, *C. calophylla*, *C. ficifolia*, *C. blakei* e *C. oocarpa* são outras espécies reclassificadas que merecem destaque dentro do gênero (HILL & JOHNSON, 1995).

*C. citriodora* é uma espécie nativa de Queensland e New South Wales, na Austrália, e apresenta como características principais o crescimento em altura de até 40 metros, folhas aromáticas, casca lisa e decídua e madeira de alta densidade (LORENZI et al., 2003). Já a espécie *C. torelliana*, também nativa de Queensland, tem como características principais o elevado enraizamento, crescimento em altura de até 30 metros, casca de coloração esverdeada, madeira dura e forte, utilizada na construção civil, além da resistência a danos causados por ventos fortes e pragas (LORENZI et al., 2003).

*C. maculata* se distribui naturalmente também na Austrália, se caracteriza pela presença de fuste de aspecto manchado em virtude de a casca apresentar tons creme-esverdeado à mistura de amarelo, marrom e cinza, retilíneo, com boa forma, e madeira que forma veias de resinas denominadas de *kinos*, de alta durabilidade, empregada para produtos sólidos e produção de carvão vegetal (LORENZI et al., 2003). *C. henryi*, por sua vez, possui menor crescimento em altura em relação às demais espécies destacadas, casca lisa, de coloração cinza a marrom-avermelhada ou rosa, madeira de alta durabilidade e fuste com a presença de *lignotuber*, um engrossamento lenhoso do colo da raiz (HILL & JOHNSON, 1995).

Após a reclassificação, mais recentemente, as espécies do gênero *Corymbia* têm se destacado como alternativa às espécies de *Eucalyptus* na produção de matéria-prima para as indústrias de base florestal, especialmente para o setor de carvão vegetal (DAMACENA et al., 2021). Essa nova tendência está relacionada a diversas razões, a citar suas características de rápido crescimento, resistência a

maioria dos estresses bióticos e abióticos, como a seca, geada, ventos fortes, pragas e doenças, alta densidade da madeira e produção de carvão de alta densidade, alta granulometria e alta resistência mecânica (LEE, 2007; RODHES & STEPHENS, 2014; MOUTINHO et al., 2017).

A importância comercial da madeira destas espécies se explica pelas características de alta densidade, geralmente superior a  $600 \text{ kg m}^{-3}$  (ARAUJO et al., 2023), elevada porcentagem de extrativos na madeira (BARROS JUNIOR et al., 2024), secagem mais rápida das toras (ROCHA et al., 2024) e alta taxa de impregnação por produtos preservativos (QUINTILHAN et al., 2021). Além do uso para produção de carvão vegetal, as espécies de *Corymbia* podem ser indicadas para a extração de óleos essenciais das folhas, madeira serrada para a construção civil, fabricação de móveis, cabos de ferramentas, esquadrias, estacas, mourões, pisos, postes, etc. (SEGURA, 2015).

Até o início da década de 1980, cultivava-se *C. citriodora* para a produção de carvão vegetal, devido às características da sua madeira que favoreciam a produção de carvão de alta qualidade siderúrgica. No entanto, a espécie perdeu espaço nas empresas do setor de carvão vegetal para clones de maior produtividade de *E. urophylla* x *E. grandis* (ASSIS, 2013). Essa desvantagem foi atribuída ao baixo índice de enraizamento (10-30%) das espécies de *Corymbia*, o que dificultava a sua propagação vegetativa (REIS et al., 2014). De fato, um dos grandes desafios do melhoramento genético de espécies do gênero é melhorar a propagação através do aumento dos níveis de enraizamento (DAMACENA, 2019).

Quando a espécie *C. torelliana* foi introduzida, na década de 1970, observou-se coincidência de florescimento e afinidade entre esta espécie e *C. citriodora*, e vários híbridos espontâneos começaram a aparecer nos plantios de ambas as espécies. Esses híbridos apresentavam alto vigor, o que chamou a atenção dos melhoristas para o processo de hibridação entre as espécies, por polinização controlada (ASSIS, 2013). Apesar do alto crescimento dos híbridos, a propagação clonal em escala operacional era inviável, devido aos baixos níveis de enraizamento.

No entanto, com os avanços atuais nas técnicas de clonagem, o interesse pelos híbridos de *Corymbia* tem crescido consideravelmente (ASSIS, 2013). Técnicas como a miniestaquia e o resgate de brotações de *lignotubers* têm tornado a clonagem desses híbridos uma realidade em escala operacional nas empresas do setor florestal.

O híbrido de maior capacidade de hibridação explorado pelos programas de melhoramento genético é formado pelas espécies de *C. torelliana* e *C. citriodora* (REIS et al., 2014). A primeira espécie é importante pelos altos níveis de enraizamento e pela resistência a danos causados por ventos fortes e pragas, enquanto que a segunda se destaca pela alta densidade da madeira. Híbridos destas duas espécies podem atingir valores de densidade de  $660 \text{ kg m}^{-3}$ , além de alto crescimento e alta produção de biomassa (GARCIA et al., 2014).

Apesar dos clones híbridos mais conhecidos serem provenientes do cruzamento entre *C. torelliana* e *C. citriodora*, outras espécies apresentam potencial para hibridação, inclusive superior ao *C. citriodora*. Resultados de combinações têm demonstrado que o crescimento das espécies *C. maculata*, *C. henryi* e *C. variegata* é significativamente superior ao de *C. citriodora*, revelando a possibilidade de novos cruzamentos com características superiores (ASSIS, 2013).

De acordo com Assis (1996), na estrutura básica de um programa de melhoramento florestal, deve-se considerar a população base e a população de melhoramento. A população base, ou progênie, constitui-se das plantas que serão manipuladas para promover o melhoramento genético, sendo o teste de progênies realizado quando se deseja testar a superioridade visual que certo material genético apresenta. Através deste teste, é possível definir se a aparente superioridade do material é de base genética ou de alguma condição ambiental favorável.

Ainda segundo Assis (1996), as progênies são, portanto, indispensáveis para a formação dos pomares clonais para determinar a superioridade genética das árvores selecionadas e, a partir dos resultados, proceder ao desbaste seletivo, eliminando-se os clones geneticamente inferiores. Os testes clonais servem para avaliar o melhoramento de características desejáveis, sobretudo na uniformização de atributos tecnológicos da madeira, sendo definidos os clones a serem plantados em escala comercial.

Atualmente, o Brasil conta com alguns programas de melhoramento genético de *Corymbia*, como o Projeto *Corymbia* – Desenvolvimento de Genótipos de *Corymbia* para a Indústria Florestal, em parceria entre a Universidade Federal de Viçosa (UFV) e a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAP II), de acordo com Lorenzoni et al. (2022), Projeto Cooperativo Conserva a Diversidade Genética, que reúne a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), a Sociedade de Investigações Florestais

(SIF), e o Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais (IPEF), de acordo com IBÁ (2024).

Outras iniciativas como o *Programa de Melhoramento Genético de clones de Corymbia para a indústria de celulose*, da Sociedade de Investigações Florestais (SIF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) em parceria com a empresa Aperam BioEnergia (COSTA et al., 2021) e a *Base de Melhoramento de Eucalyptus e Corymbia* em parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e a *Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano (COMIGO)*, conforme mencionado por Paludzyszyn Filho et al. (2014) têm contribuído para o melhoramento genético do gênero no país.

Estes programas de melhoramento genético reúnem empresas do setor florestal, universidades e instituições de pesquisa no esforço de garantir avanços no melhoramento das características silviculturais de híbridos formados entre espécies de *Corymbia*, bem como associar e melhorar características de qualidade da madeira e dos produtos finais desejáveis para os mais diversos segmentos do setor florestal brasileiro.

Apesar da importância da procedência, qualidade e uniformidade da madeira para a qualidade final dos produtos, ainda se observa poucos estudos e aplicação técnica das propriedades da madeira (em associação ou não com as propriedades dos produtos finais) pelos programas de melhoramento florestal durante a classificação e seleção de genótipos de *Corymbia*, cujos parâmetros estão baseados em aspectos genéticos, de crescimento e de produtividade volumétrica.

Logo, para que o gênero *Eucalyptus* possa ser substituído em locais de baixa produtividade ou para que novos plantios do gênero *Corymbia* sejam implantados alternativamente, por suas propriedades superiores, estudos de caracterização precisam ser realizados, tanto para estabelecer mais comparações quanto para serem instrumentos de informação para tomada de decisão tecnicamente assertiva quando da seleção de genótipos.

Por fim, para que a qualidade da madeira seja confirmada como uma ferramenta de classificação e seleção de genótipos de *Corymbia* para a produção de carvão vegetal, é necessário conhecer e avaliar as suas propriedades tecnológicas em associação com a qualidade do carvão vegetal.

### **3.2. Propriedades do carvão vegetal para a termo redução do minério de ferro**

A carbonização ou pirólise lenta é um processo de decomposição térmica da madeira, em temperaturas acima de 300 °C, que ocorre na ausência ou na presença controlada de oxigênio, resultando em frações gasosa (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), líquida (líquido pirolenhoso) e sólida (carvão vegetal), conforme Protásio et al. (2021a). As características finais do carvão vegetal, que indicam a sua qualidade, dependerão das variáveis do processo de carbonização, como temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de carbonização, bem como das propriedades intrínsecas à madeira de origem.

Entretanto, o controle das variáveis de processo é limitado, principalmente nos fornos de maior capacidade, e por isso, conhecer as propriedades físico-químicas da madeira é fundamental para obter melhores resultados de eficiência nos altos fornos e redução dos custos de produção do ferro gusa (DUFURNY et al., 2019).

As propriedades físico-químicas do carvão vegetal e do processo de carbonização, como o rendimento gravimétrico, a densidade aparente, o poder calorífico, a resistência mecânica e a composição química imediata determinam a qualidade final do carvão vegetal destinado à aplicação na indústria siderúrgica (LOUREIRO et al., 2021).

É desejável que altos rendimentos gravimétricos em carvão sejam alcançados, mantendo uma qualidade satisfatória do redutor (carvão), o que gera maior aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e, conseqüentemente, maior produção de energia e menores rendimentos em líquido pirolenhoso e em gases condensáveis (PROTÁSIO et al., 2011).

Dentre as propriedades do carvão vegetal que estão associadas à sua qualidade final, a densidade aparente é considerada a propriedade física de maior destaque por afetar diretamente o volume útil ocupado no alto-forno, o tempo de residência da carga metálica, o consumo do termoredutor e a eficiência de redução (SANTOS et al., 2016).

A utilização de carvão de baixa densidade aumenta o volume do termoredutor no interior do alto-forno, reduz o peso da carga metálica, que gera aumento da força ascendente no alto-forno, e diminui a velocidade de redução do minério de ferro, gerando queda de produção e aumento no consumo de carvão vegetal para a redução (PEREIRA et al., 2016).

Quanto à densidade a granel, é desejável que o carvão vegetal tenha valores acima de  $250 \text{ kg m}^{-3}$  (COSTA, 2020). De acordo com Isbaex (2018), que estudou diferentes faixas de densidade a granel em relação ao processo de produção de ferro-gusa em altos-fornos, há incremento de 6% na produção entre as faixas de baixa densidade ( $190$  a  $210 \text{ kg m}^{-3}$ ) para alta densidade a granel ( $250$  a  $280 \text{ kg m}^{-3}$ ).

Outros resultados desse estudo indicaram que o aumento da densidade a granel contribuiu para a melhor permeabilidade do alto forno e melhoria da eficiência operacional do processo. Além da influência sobre a qualidade do ferro-gusa, a densidade a granel é uma propriedade indispensável nos pátios de produção de carvão vegetal por ser a medida utilizada para as operações de compra e venda do produto.

O carvão vegetal utilizado como termoreductor nos altos-fornos deve apresentar resistência mecânica, principalmente em termos de friabilidade, suficiente para suportar a camada de minério de ferro sem prejuízos à permeabilidade do leito (ASSIS et al., 2016). O índice de friabilidade é um dos testes de resistência mecânica que mede a capacidade do carvão em gerar finos quando submetido a esforços que levam a quebras, abrasão e choques mecânicos, sendo influenciado pelas diferentes operações industriais, como o transporte, o manuseio, a carga e a descarga, e os impactos gerados pela compactação, abrasão e ação da temperatura em que o termoreductor é submetido no alto-forno (BRITO, 1993).

A composição química imediata é outro grupo de propriedades indispensável para a avaliação da qualidade do carvão vegetal para a indústria siderúrgica. O carvão vegetal é composto por três frações com características distintas: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas (COSTA, 2020). O teor de carbono fixo deve estar acima de 70% para garantir maior eficiência energética do carvão vegetal durante a termoredução (NEVES et al., 2011).

Os teores de materiais voláteis devem estar abaixo de 25%, de modo que altas concentrações desses compostos prejudicam a permeabilidade do leito através da formação de películas de carbono pirolítico que queimam sobre a superfície da carga, afetando a reatividade do carvão vegetal e o fluxo gasoso presente no interior do alto-forno (GLADYSZ & KARBOWNICZEK, 2008).

As cinzas são substâncias inorgânicas indesejáveis que diminuem o poder calorífico, já que a fração mineral não participa do processo de combustão, e dificultam

a gaseificação devido à interação da fração inorgânica com a matéria combustível, resultando na formação de uma camada protetora, ao redor da partícula de carvão, reduzindo ou impedindo a sua gaseificação (LIN; HIRATO; HORIO, 1994).

Por fim, tem-se o poder calorífico, definido como a quantidade de calor liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume de carvão vegetal, geralmente expresso em MJ kg<sup>-1</sup> ou kcal kg<sup>-1</sup> (PROTÁSIO et al., 2011). Os valores médios de poder calorífico para o carvão vegetal relatados na literatura estão entre 7170 a 7650 kcal kg<sup>-1</sup> ou 30 a 32 MJ kg<sup>-1</sup>, de modo que quanto maior for este valor, maior será a concentração de energia contida no carvão vegetal e maior a eficiência de termoredução do minério de ferro em ferro gusa (SUOPAJARVI et al., 2017).

A caracterização do carvão vegetal a partir das variáveis dos processos de carbonização ou das diferentes madeiras/progênes não é suficiente para hierarquizar ou agrupar os materiais em termos de qualidade. Por isso, após uma caracterização completa e precisa, é importante aplicar metodologias com base nos valores e nos critérios que cada empresa busca na qualidade do carvão vegetal. Trata-se de um trabalho bastante complexo e subjetivo, que deve ser realizado em função das variáveis do processo e da qualidade da madeira dos genótipos.

### **3.3. Critérios de qualidade da madeira para a seleção de genótipos no setor de carvão vegetal siderúrgico**

A produção e qualidade final do carvão vegetal para uso siderúrgico é diretamente influenciada pelas propriedades físicas, anatômicas, químicas e energéticas da madeira (SANTOS, 2021). Após a caracterização da madeira, inicia-se um processo complexo e importante de seleção dessas características para categorização das madeiras e agrupamento visando maior uniformidade do material, para serem enforçadas com maior possibilidade de obtenção de um maior rendimento e um produto final mais adequado ao seu setor de destino.

Outro aspecto a se considerar em estudos de qualidade da madeira é com relação a amostragem, complexidade das análises e a quantidade de características que serão avaliadas, se essas características realmente refletem a variabilidade observada no carvão vegetal. Por isso, conhecer as propriedades tecnológicas da madeira e do carvão vegetal orienta para uma melhor avaliação da qualidade total,

menor custo e tempo com as análises, o que pode acelerar o processo de obtenção de informação para tomada de decisão.

Nesse contexto, a densidade básica é considerada uma das propriedades mais relevantes para avaliações qualitativas da madeira, sendo comumente utilizada pelos programas de melhoramento das empresas do setor florestal como critério de qualidade visando à seleção de materiais genéticos superiores (PROTÁSIO, 2016).

A grande aceitação dessa propriedade se deve ao fato da sua fácil obtenção e baixo custo e sua forte influência sobre outras propriedades da madeira e, conseqüentemente, do carvão vegetal (RAMOS et al., 2024). Para a produção de carvão vegetal, a densidade básica influencia na densidade aparente e na quantidade de massa de madeira por volume disponível nos fornos de carbonização (BRITO, 1993). Além disso, afeta positivamente a capacidade produtiva das unidades de carvão vegetal, a resistência mecânica e, conseqüentemente, a qualidade final do carvão vegetal (PEREIRA et al., 2012).

A densidade básica da madeira é fortemente influenciada pelas dimensões dos elementos anatômicos do lenho, especialmente a espessura da parede das fibras, bem como a proporção, distribuição e quantidades de vasos (PEREIRA et al., 2016). De modo geral, o aumento da densidade é influenciado pelo aumento da espessura da parede das fibras ou aumento da proporção delas, em que se deseja valores de fração parede acima de 60% em relação à proporção de vasos, resultando no aumento da densidade e conseqüente aumento dos rendimentos em carvão vegetal (PAULA, 2005).

Outra propriedade importante é o teor de casca da madeira, considerada um resíduo industrial que causa problemas relevantes aos equipamentos de queima e ao carvão vegetal, sendo desconsiderado nas avaliações de qualidade na maioria dos estudos científicos e nos programas de melhoramento genético. A madeira enfiada normalmente não é descascada, como parte do processamento da madeira, e por isso espécies com menores teores de casca são mais indicadas.

Por essa razão, a casca é um critério de qualidade de ampla variabilidade que pode ser alterado via manipulação genética. O desafio é selecionar materiais genéticos que apresentam menores proporções de casca (ASSIS, 2013). Logo, é interessante estudar a influência de características desse resíduo sobre a qualidade final do carvão.

Outro critério importante para avaliações qualitativas da madeira e pouco explorado pelos programas de melhoramento é a quantificação das porcentagens de cerne e alburno. Espera-se que a proporção cerne/alburno seja a menor possível, de modo que maiores teores de alburno facilitarão a secagem da madeira pelo transporte de água e saída gases da parte mais interna para a parte mais externa da madeira (PEREIRA et al., 2012). Do ponto de vista prático, a maior relação cerne/alburno contribui negativamente para o aumento da geração de finos, produzindo carvão vegetal de menor granulometria e menor resistência mecânica (ROCHA et al., 2024).

Além das propriedades físicas e anatômicas da madeira, a sua composição química estrutural tem forte influência sobre a qualidade do carvão vegetal. Para a produção de carvão vegetal, é indicado que a madeira tenha alto teor de lignina e menor teor de holocelulose, visto que a primeira possui alta estabilidade térmica e tem maior concentração de carbono em sua estrutura, enquanto que a segunda compõe a fração mais instável da madeira (YANG et al., 2007).

Quanto aos componentes não estruturais ou acidentais da madeira, ou seja, os extrativos e os minerais, apesar de presentes em pequenas quantidades, também afetam a qualidade da madeira para o processo de carbonização. Sobre os extrativos, a depender de sua natureza química e estabilidade térmica, deseja-se que os seus valores sejam os mais altos possíveis para garantir maiores rendimentos em carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2011).

Os minerais ou inorgânicos são absorvidos do solo pelas raízes das plantas e acumulados nos tecidos vegetais, inclusive na madeira. Quando a madeira passa pelo processo de carbonização, um dos produtos é a uma fração mineral/inorgânica, que se acumula na estrutura do carvão vegetal e, conseqüentemente, nas ligas metálicas resultantes do processo de termo redução. Os elementos minerais, especialmente o fósforo, tornam as ligas quebradiças, menos maleáveis e mais propensas à propagação de trincas e fissuras (VITAL et al., 1989).

A composição química imediata se destaca nas avaliações de qualidade da madeira por influenciar propriedades importantes como o poder calorífico e, conseqüentemente, os rendimentos em carvão vegetal. De modo geral, altos teores de cinzas reduzem o poder calorífico da madeira e se acumulam nos altos-fornos gerando problemas de entupimento, incrustações e corrosões dos aparelhos de queima (SOUZA et al., 2016). O teor de carbono fixo deve ser o maior possível, visto

a sua forte relação com os valores caloríficos da madeira (PROTÁSIO et al., 2011). Já os materiais voláteis, em altas concentrações, diminuem o teor de carbono fixo, aumentando a reatividade no processo de carbonização (OLIVEIRA et al., 2010).

O poder calorífico é um dos indicadores mais utilizados nos estudos de qualidade da madeira e pelas empresas do setor de carvão vegetal, pois representa a quantidade de energia que a madeira pode liberar durante a sua queima, e é dividido em três tipos, o superior (PCS), o inferior (PCI) e o líquido (PCL), cuja diferença está na forma de obtenção e consideração ou não do calor latente do vapor d'água formado pela combustão do hidrogênio elementar e umidade da madeira (TRUGILHO et al., 2017).

Os seus valores, geralmente entre 4600 a 4800 kcal kg<sup>-1</sup> ou 19 a 20 MJ kg<sup>-1</sup>, estão intimamente relacionados à composição química da madeira, especialmente à lignina e aos extrativos, além de terem forte correlação com o teor de carbono fixo (HUANG et al., 2009; PROTÁSIO et al., 2011).

Além de indicar o potencial energético da madeira, a avaliação do poder calorífico é importante para a estimativa de outras propriedades de interesse, como o poder calorífico inferior e líquido, a densidade energética (poder calorífico x densidade da madeira), que indica a quantidade de energia por volume de madeira, e a eficiência energética da carbonização, cujo cálculo considera o poder calorífico (madeira e carvão vegetal) e o rendimento em carvão vegetal (JESUS et al., 2017).

Estas características obtidas pela associação de propriedades são importantes tanto do ponto de vista tecnológico, por garantirem um monitoramento mais amplo da qualidade da madeira e das variáveis do processo produtivo, quanto do ponto de vista econômico, já que são obtidos por estimativas e não por análises que envolvam custos operacionais.

De posse de tantas propriedades importantes da madeira e do carvão vegetal que influenciam na qualidade do carvão vegetal, é importante a seleção de apenas algumas que apresentam maior e melhor relação com as características da qualidade final do carvão vegetal. Dessa forma, é importante criar metodologias que visem observar a pertinência na avaliação das propriedades da madeira/carvão vegetal, em um menor número possível, sob o ponto de vista da sua influência na qualidade do carvão vegetal.

### **3.4. Metodologias para seleção de genótipos jovens de *Corymbia* no setor de carvão vegetal siderúrgico**

É comum nos estudos que envolvem a seleção de genótipos, realizados em escala laboratorial, serem avaliadas diversas propriedades da madeira e do carvão vegetal, e suas associações, enquanto que em escala industrial, onde as limitações operacionais são maiores, o número de análises é consideravelmente menor. O problema em se utilizar inúmeras propriedades está na complexidade e nos altos custos das análises, e ao longo tempo para obtenção dos resultados, tornando o efeito na operação economicamente inviável, especialmente quando se avalia um elevado número de genótipos (TEIXEIRA et al., 2024).

Um grande número de propriedades da madeira e do carvão vegetal, especialmente daquelas que estão intimamente relacionadas entre si, dificulta as interpretações e nem sempre colabora para a melhoria do efeito estatístico das análises. Por exemplo, é comum que uma maior quantidade de propriedades avaliadas, unidas às características estimadas a partir de outras, sejam analisadas conjuntamente em análises estatísticas de agrupamento multivariado, gerando o fenômeno conhecido como “sobreposição”, que no final, subestima o efeito das propriedades para o agrupamento dos genótipos.

Fialho et al. (2022) destacam que as ferramentas estatísticas são uma das principais abordagens utilizadas para auxiliar na interpretação das propriedades de importância para determinada avaliação, nesse caso de genótipos. Além disso, as escolhas das análises estatísticas a serem utilizadas, assim como as medidas da magnitude das diferenças entre as observações das propriedades, são essenciais para a obtenção de resultados confiáveis da amostragem/população estudada.

Para sanar esse problema, algumas propriedades podem ser avaliadas isoladamente, por teste de médias e da variabilidade dos resultados, permitindo avaliações mais simples sobre a relação entre variáveis e variabilidade dos resultados.

Outra forma de avaliação das propriedades de forma mais completa, é a avaliação dos experimentos fatoriais, que permite a combinação de fatores (propriedades) para avaliar uma propriedade do carvão vegetal, por exemplo. Entretanto, os arranjos fatoriais são limitados e não permitem uma visão mais completa do que está contribuindo ou não para a seleção/agrupamento de indivíduos por propriedades.

Dessa forma, a utilização de diferentes métodos de análises estatísticas é uma alternativa para minimizar os problemas decorrentes das interpretações equivocadas, tais como as análises de agrupamento multivariado combinando as análises de componentes principais e de *cluster*, que permitem a divisão dos materiais genéticos em grupos distintos e a interpretação da relação entre as propriedades estudadas e a redução da dimensão dos dados (FIALHO et al., 2022).

Na seleção de propriedades da madeira de diferentes genótipos para a produção de carvão vegetal, é desafiador definir os critérios de qualidade mais importantes e quantificar esse impacto. Nesse sentido, é importante associar propriedades da madeira dos genótipos com as propriedades do carvão vegetal, e pontuar a importância dessas relações por meios estatísticos. As ferramentas estatísticas podem auxiliar nessa missão, de modo a identificar as propriedades de maior importância e os materiais genéticos mais aptos para a produção de carvão vegetal.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1. Área de estudo e detalhamento dos genótipos de *Corymbia***

O estudo foi realizado em plantios experimentais nas idades de 3 e 4 anos estabelecidos em talhões localizados nos municípios de Bom Despacho e Martinho Campos, região Leste do Estado de Minas Gerais, Brasil, pertencentes à empresa ArcelorMittal S.A. (Tabela 1).

Os talhões foram plantados sob a densidade de 7,5 m<sup>2</sup> por árvore em um Latossolo Vermelho Distrófico, com os seguintes manejos: subsolagem (0,3% boro + 0,2% zinco + 0,2% cobre), aplicação de calcário dolomítico (poder neutralizante relativo > 90%), primeira adubação (NPK 18-00-18 + 4% enxofre + 1% boro) e segunda adubação (NPK 08-00-32 + 3% enxofre + 0,7% boro).

O clima da região é do tipo *Cwa*, subtropical caracterizado por inverno seco e temperatura moderada (temperatura média anual de 22,5 °C) e verão quente e chuvoso (precipitação média anual de 1.275 mm), segundo a classificação de *Köppen* (ALVARES et al., 2013), conforme a Tabela 1.

Com relação aos materiais genéticos, foram avaliados onze genótipos de *Corymbia*, ou seja, duas progênies e nove clones. Todos os genótipos são híbridos

formados por polinização controlada, dos quais há um tri clone formado pelo cruzamento entre as espécies *C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata* (CTCM). É importante ressaltar que os clones de *C. torelliana* x *C. maculata* (CTM1 e CTM2) não foram formados pela progênie resultante do cruzamento de *C. torelliana* x *C. maculata* (PTM), conforme apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Detalhamento dos genótipos de *Corymbia* e características da área de estudo.

<b>Genótipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Código</b>	<b>DAP</b>	<b>Idade</b>	<b>Espaçamento</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Altitude</b>	<b>Local</b>
<i>C. torelliana</i> x <i>C. henryi</i>	Progénie	PTH	15,3	3	3 x 2,5	19°34'35"S	45°20'27"W	754	Bom Despacho
<i>C. torelliana</i> x <i>C. maculata</i>	Progénie	PTM	16,1	4	6 x 1,25	19°33'41"S	45°20'8"W	763	Bom Despacho
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> x <i>C. maculata</i>	Tri-clone	CTCM	13,5	3	3 x 2,5	19°25'43"S	45°20'27"W	754	Bom Despacho
<i>C. torelliana</i> x <i>C. maculata</i>	Clone	CTM1	12,6	3	3 x 2,5	19°25'43"S	45°20'27"W	754	Bom Despacho
<i>C. torelliana</i> x <i>C. maculata</i>	Clone	CTM2	12,9	3	3 x 2,5	19°25'43"S	45°20'27"W	754	Bom Despacho
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	Clone	CTC1	12	3	3 x 2,5	19°25'43"S	45°20'27"W	754	Bom Despacho
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	Clone	CTC2	12,1	3	3 x 2,5	19°25'43"S	45°20'27"W	754	Bom Despacho
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	Clone	CTC3	12,6	3	3 x 2,5	19°25'43"S	45°20'27"W	754	Bom Despacho
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	Clone	CTC4	16,1	4	6 x 1,25	19°25'43"S	45°8'44"W	740	Martinho Campos
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	Clone	CTC5	12,9	4	6 x 1,25	19°25'43"S	45°8'44"W	740	Martinho Campos
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	Clone	CTC6	15,5	4	6 x 1,25	19°25'43"S	45°8'44"W	740	Martinho Campos

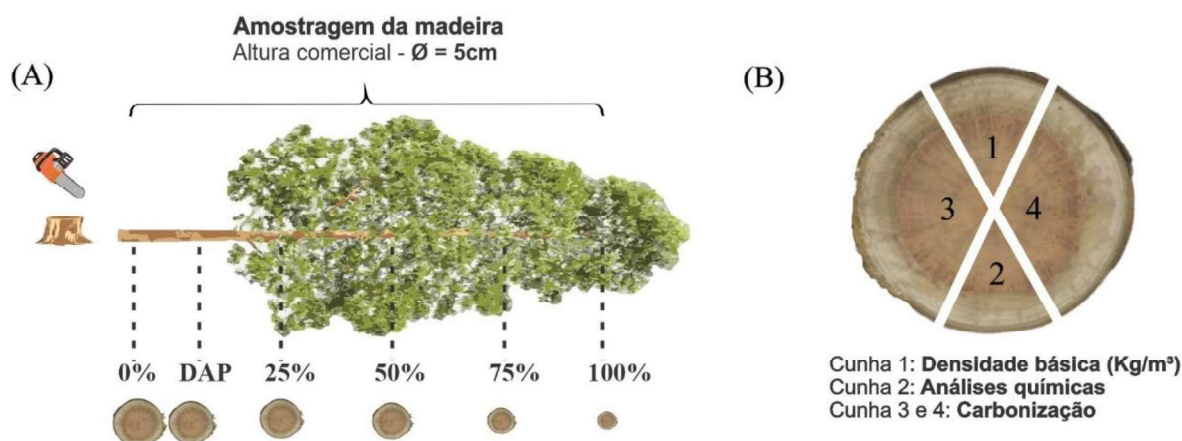
Onde: DAP é o diâmetro à altura do peito (cm); Idade (anos); Espaçamento (m) e Latitude, Longitude e Altitude (m). Na identificação dos genótipos, a inicial em P significa progénie, enquanto que a inicial em C significa clone. As letras subsequentes representam os progenitores feminino e masculino, respectivamente. Por exemplo: PTH é uma progénie formada pelas espécies *torelliana* (progenitor feminino) e *henryi* (progenitor masculino).

## 4.2. Amostragem e coleta da madeira

Para avaliar as propriedades físicas, anatômicas e químicas da madeira, foram amostradas 3 árvores de diâmetro médio por genótipo (centro de classe), totalizando 33 árvores. As árvores localizadas nas bordas dos plantios ou que apresentassem sinais de doenças foram excluídas da amostragem.

Após a derrubada das árvores, um disco de 5 cm de espessura, incluindo a casca, foi retirado de diferentes posições ao longo do fuste: na base da árvore (0%), no DAP, bem como em 25%, 50%, 75%, e 100% da altura comercial, considerando o diâmetro mínimo de 5 cm, totalizando 6 discos por árvore (Figura 1A).

Cada disco foi seccionado em quatro cunhas opostas, sendo uma utilizada para a determinação da densidade básica, uma para as análises químicas e as demais para as carbonizações (Figura 1B).



**Figura 1.** Esquema de amostragem e coleta da madeira (A) e seccionamento dos discos para as avaliações da madeira e do carvão vegetal.

## 4.3. Análise das propriedades da madeira

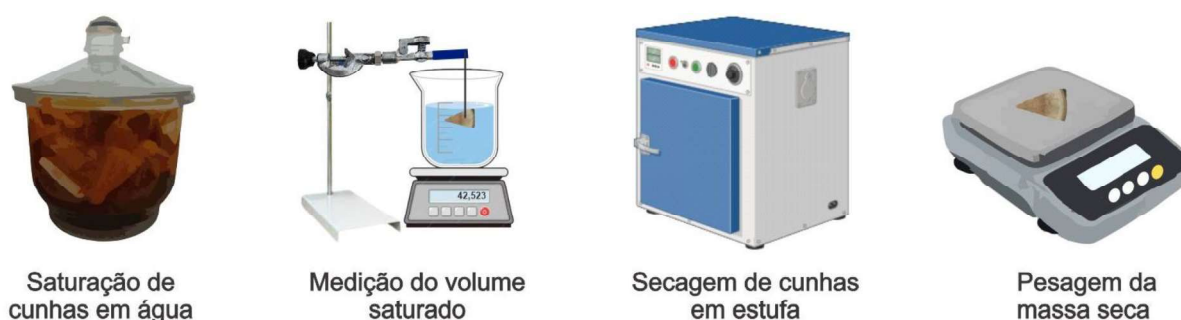
### 4.3.1. Densidade básica da madeira (DBM) e da casca (DBC)

Para a determinação da DBM e da DBC, uma cunha de cada posição do fuste foi orientada em 45° passando pela medula, de modo a evitar regiões defeituosas do disco, tais como nós, rachaduras e lenho de reação.

Após o corte das cunhas, as cascas foram removidas, e ambos os materiais (cunhas e cascas) foram separadamente submersos em água em dessecadores de

vidro para saturação. Diariamente, por 20 minutos, os dessecadores receberam aplicação de pressão negativa, com o auxílio de uma bomba à vácuo, até a total saturação das amostras. As amostras foram consideradas saturadas quando a variação da massa úmida foi inferior a 5% em, pelo menos, três pesagens seguidas (Figura 2).

### (A) Determinação da densidade básica da madeira



**Figura 2.** Sequência da determinação da densidade básica da madeira.

Uma vez saturadas, as amostras tiveram seus volumes determinados pelo método da balança hidrostática. Em seguida, foram secas em estufa de circulação de ar, a  $105 \pm 5$  °C, por 24 horas, para a obtenção da massa seca, segundo as recomendações da norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

Em seguida, a densidade básica de cada amostra foi determinada e a densidade básica média de cada árvore foi calculada considerando a média aritmética da densidade de cada posição do fuste.

#### 4.3.2. Propriedades macroscópicas da casca e do lenho

A avaliação macroscópica da madeira consistiu das medições da espessura da casca (EC), da porcentagem de casca (PCa) e da porcentagem de cerne (PCe). Os discos foram inicialmente lixados com lixadeira de cinta (50 grãos) e depois manualmente em lixadeira de 80 grãos para melhorar a visualização da superfície, conforme ilustrado na Figura 3.

### (A) Mensuração do cerne e da casca



**Figura 3.** Sequência do processo de mensuração das propriedades macroscópicas da casca e do lenho.

As medições foram realizadas com o auxílio de régua de precisão de 10 mm, conforme Equação 1 para a  $EC$ , Equação 2 para a  $PCa$ , e Equação 3 para a  $PCe$ , de acordo com a metodologia de Brito et al. (2019).

$$EC = \frac{(D - d)}{2} \quad (1)$$

No qual:  $EC$  é a espessura da casca (cm);  $D$  é o diâmetro externo do disco com casca (cm) e  $d$  é o diâmetro do xilema-madeira (cm).

$$PCa = \frac{(Acc - Asc)}{(Acc)} \times 100 \quad (2)$$

No qual:  $PCa$  é a porcentagem de casca (%);  $Acc$  é a área do disco de madeira com casca (cm<sup>2</sup>) e  $Asc$  é a área do disco de madeira sem casca (cm<sup>2</sup>).

Para a obtenção dos valores de  $PCe$ , os discos lixados foram aspergidos com água na sua superfície para melhorar a visualização do contraste de cor entre as regiões do alburno e do cerne e tornar as medições mais precisas.

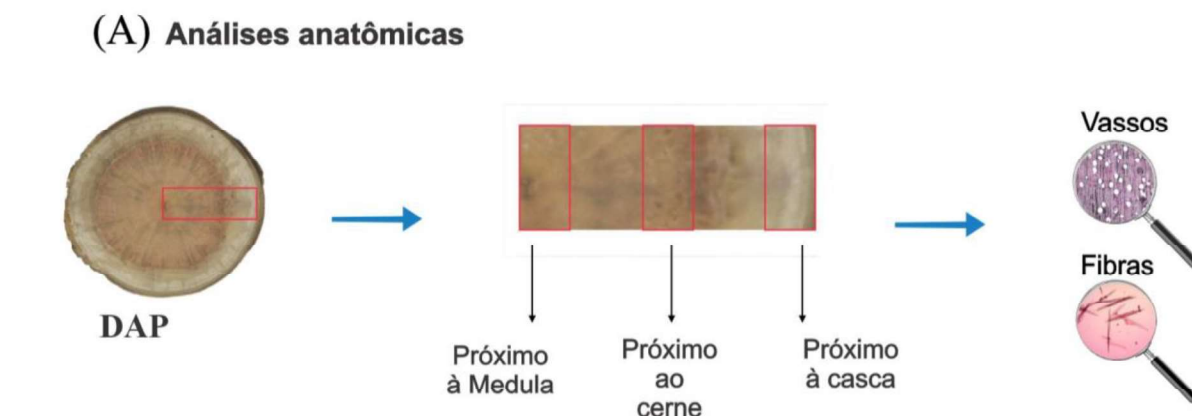
Para os discos nas posições longitudinais de 75% e 100% do fuste, onde a visualização da região do cerne era praticamente impossível, empregou-se um método alternativo. Esses discos foram cortados transversalmente em duas partes, sendo uma parte tratada com *Dimethyl Yellow* diluído na concentração de 0,2% em etanol (solução padrão obtida da Sigma-Aldrich, St. Louis, EUA). Após a aplicação e secagem ao ar livre, as camadas de cerne e alburno dos discos foram então medidas.

$$PCe = \frac{(Ace)}{(Atotal)} \times 100 \quad (3)$$

No qual: *PCe* é a porcentagem de cerne (%); *Ace* é a área de cerne determinada pela equação do cilindro (cm<sup>2</sup>); *Atotal* é a área total do disco de madeira sem casca (cm<sup>2</sup>).

#### 4.3.3. Anatomia descritiva dos vasos e das fibras

As dimensões dos vasos e das fibras da madeira foram medidas em corpos de prova medindo 1,0 x 1,5 x 2,0 cm (largura x comprimento x espessura) em três posições ao longo do raio dos discos do DAP: 1) região próxima à casca, 2) região próxima ao cerne – região intermediária e 3) região próxima à medula, coletadas em intervalos de 1,5 mm (Figura 4).



**Figura 4.** Disco e regiões do raio utilizadas para a mensuração das dimensões dos vasos e fibras.

Para cada amostra das 3 posições no sentido medula-casca, foram realizadas 25 medições, seguindo as orientações recomendadas pela COPANT (1974). A frequência (FV) (unidade mm<sup>2</sup>) e o diâmetro dos vasos (DV) (μm), foram medidas em cortes histológicos transversais de 20 μm de espessura. Em seguida, foram removidas lascas para preparação do macerado, conforme estabelecido por Ramalho (1987).

Após a obtenção do macerado, foram montadas lâminas anatômicas, que foram fotomicrografadas com câmera digital acoplada ao microscópio. Com o auxílio do software Axivision® versão 4.5, o comprimento (CF), a largura (LF) e o diâmetro do lúmen das fibras (DL), ambos em μm, foram medidos diretamente a partir das fotomicrografias.

A espessura da parede das fibras (EPF) e a fração parede das fibras (FPF) foram calculadas indiretamente utilizando as Equações 4 e 5.

$$EPF = \frac{(LF - DL)}{2} \quad (4)$$

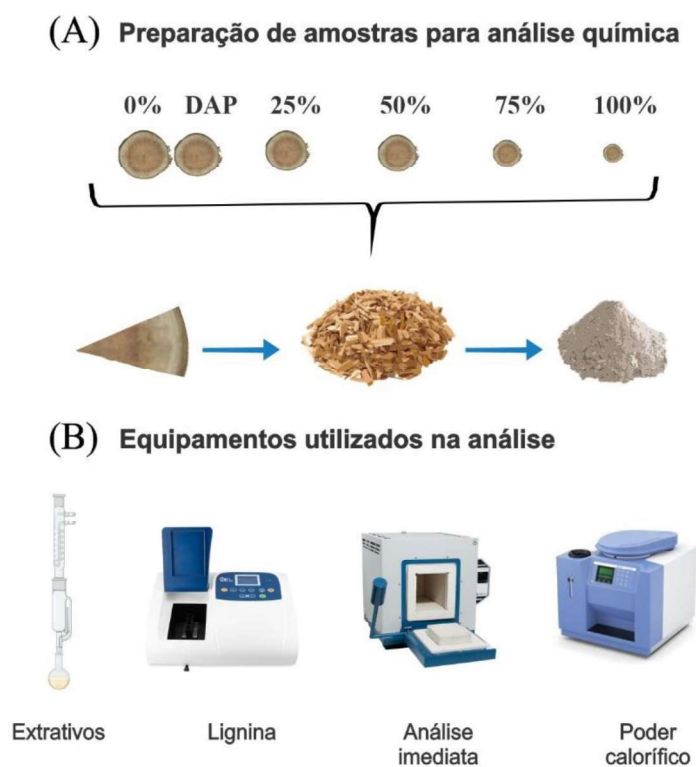
No qual: *EPF* é a espessura da parede das fibras ( $\mu\text{m}$ ); *LF* é a largura das fibras ( $\mu\text{m}$ ) e *DL* é o diâmetro do lúmen das fibras ( $\mu\text{m}$ ).

$$FPF = \frac{(EPF)}{LF} \times 100 \quad (5)$$

No qual: *FPF* é a fração parede das fibras (%) e *LF* é a largura das fibras ( $\mu\text{m}$ ).

#### 4.3.4. Preparo das amostras para as análises químicas

As análises de composição química da madeira foram realizadas com amostras compostas dos discos de todas as posições do fuste. As amostras de madeira foram transformadas em cavacos e em seguida moídas em moinho de faca do tipo *Willey* até a obtenção de serragem (Figura 5A).



**Figura 5.** Preparo das amostras e equipamentos utilizados nas análises químicas da madeira.

A serragem obtida foi peneirada e classificada, de acordo com a análise: em peneiras sobrepostas de 40 e 60 *mesh* com a fração retida na peneira de 60 *mesh* utilizada para as análises de composição química estrutural, não estrutural, imediata e poder calorífico, e em peneiras sobrepostas de 200 e 270 *mesh* com a fração retida na peneira de 270 *mesh* utilizada para as análises de termogravimetria (TG), de espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e de difração de raios-X (DRX), conforme ilustrado na Figura 5A.

#### 4.3.5. Composição química estrutural e não estrutural

A determinação do teor de extrativos (TExt) seguiu a norma T 264 cm-97 (TAPPI, 1997). A extração envolveu três sequências: álcool-tolueno na proporção de 1:2 por 5 h, álcool por 4 h, e água quente (100 °C) por 1 h (Figura 5B).

O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método modificado de Klason, seguindo os procedimentos de Gomide & Demuner (1986). O teor de lignina solúvel foi medido usando um espectrofotômetro, conforme proposto por Goldschimid (1971) (Figura 5B).

O teor de lignina total (TLig) foi calculado pela soma dos teores de lignina insolúvel e solúvel. O teor de holocelulose (THol) foi obtido pela diferença entre os demais componentes químicos da madeira, como descrito na Equação 6:

$$THol = 100 - (TLig + TExt + TCz) \quad (6)$$

No qual: *THol* é o teor de holocelulose (%); *TLig* é o teor de lignina total (%); *TExt* é o teor de extrativos totais (%); *TCz* é o teor de cinzas, baseado na massa seca de madeira (%).

#### 4.3.6. Composição química imediata

A determinação da composição química imediata da madeira foi realizada de acordo com a norma D1762-84 (ASTM, 2021). Os teores de cinzas (TCz) e de materiais voláteis (TMV) foram determinados após as amostras serem inseridas em forno elétrico do tipo mufla aquecido a 600 °C e 900 °C, respectivamente, conforme Figura 5B. O teor de carbono fixo (TCF) foi calculado utilizando a Equação 7:

$$TCF = 100 - (TCz + TMV) \quad (7)$$

No qual: *TCF* é o teor de carbono fixo (%); *TCz* é o teor de cinzas (%); *TMV* é o teor de materiais voláteis (%), baseado na massa seca de madeira (%).

#### 4.3.7. Avaliações energéticas

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado usando uma bomba calorimétrica adiabática, modelo IKA C-200, seguindo a norma E711-87 (ASTM, 1996), conforme a Figura 5B. O poder calorífico inferior (PCI) foi estimado considerando o teor de hidrogênio da madeira de 6%, conforme especificado pela norma EN 14918 (DIN, 2010), utilizando-se a Equação 8:

$$PCI = PCS - (206 * H) \quad (8)$$

No qual: *PCI* é o poder calorífico inferior (MJ kg<sup>-1</sup>); *PCS* é o poder calorífico superior (MJ kg<sup>-1</sup>); *H* é o teor de hidrogênio da madeira (%), baseado na massa seca de madeira (%).

A densidade energética da madeira (DE) foi calculada através da Equação 9:

$$DE = \frac{(DBM * PCS)}{1000} \quad (9)$$

No qual: *DE* é a densidade energética da madeira (GJ m<sup>-3</sup>); *DBM* é a densidade básica da madeira (kg m<sup>-3</sup>); *PCS* é o poder calorífico superior (MJ kg<sup>-1</sup>), baseado na massa seca de madeira (%).

#### 4.3.8. Análises termogravimétricas

As análises termogravimétricas (TG/DTG) foram realizadas utilizando um analisador térmico DTG-60H (Shimadzu, Kyoto, Japão). As análises foram realizadas em atmosfera inerte de gás nitrogênio (N<sub>2</sub>) de alta pureza (99,99%) com taxa de vazão de 60 mL min<sup>-1</sup>.

A temperatura variou de ambiente (20-35 °C) até a temperatura final de 800 °C, com taxa de aquecimento de 15,5 °C min<sup>-1</sup>. A primeira derivada da curva TG foi utilizada para identificar a taxa de perda de massa por minuto com o aumento da temperatura e os estágios de combustão em termos de termogravimetria diferencial (DTG).

#### 4.3.9. Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR para cada amostra de madeira foram coletados usando um espectrômetro Tensor 27 do tipo Bruker. A aquisição foi realizada utilizando acessório ATR com 32 scans, resolução de 4 cm<sup>-1</sup> na região entre 600 e 4000 cm<sup>-1</sup>.

#### 4.3.10. Difração de raios X (DRX)

A cristalinidade da celulose foi analisada por difração de raios X (DRX), que permite identificar o seu índice de cristalinidade (IC). As análises foram realizadas utilizando um difratômetro Rigaku MiniFlex 600 (Tóquio, Japão) com radiação K $\alpha$  de cobre ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ).

As amostras foram escaneadas em uma faixa de 2 $\theta$  de 3° a 90°, com tamanho de passo e taxa de varredura de 0,05° e 2 $\theta$  min<sup>-1</sup>, respectivamente. Os principais picos de cristalinidade foram identificados e o IC foi calculado utilizando o método empírico proposto por Segal et al. (1959), segundo a Equação 10:

$$IC = \frac{I(002) - I(am)}{I(002)} \times 100 \quad (10)$$

No qual: IC é o índice de cristalinidade da celulose (%),  $I_{(002)}$  é a intensidade máxima do pico principal de difração relacionado ao plano cristalino em 2 $\theta$ =22° e 20°, e  $I_{(am)}$  representa o halo amorfo em 2 $\theta$ =18° para a celulose I.

#### 4.4. Processos e balanços da carbonização e consumo específico de madeira

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico do tipo mufla, conectado a um condensador resfriado por água e a um frasco coletor de gases condensáveis. As amostras, compostas de cunhas dos discos de madeira amostrados ao longo do fuste, de aproximadamente 400 g, foram secas em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 105  $\pm$  5 °C até atingirem massa constante e colocadas em um reator metálico (32 cm de altura x 11 cm de diâmetro), conforme Figura 6.

## (A) Carbonização



**Figura 6.** Equipamentos utilizados na carbonização e caracterização do carvão vegetal.

O forno mufla foi configurado de acordo com as seguintes condições: temperatura inicial de 100 °C, temperatura máxima de 450 °C, taxa de aquecimento de 1,67 °C min<sup>-1</sup> (100 °C h<sup>-1</sup>) e tempo de residência de 30 minutos, totalizando 4,5 h de carbonização. Ao final do processo, o forno foi desligado para resfriamento por 24 horas até a retirada das amostras para o cálculo dos rendimentos gravimétricos.

O balanço da carbonização foi realizado com base nos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGCV – Equação 11), em líquido pirolenhoso (RGLP – Equação 12), em gases não condensáveis (RGGNC – Equação 13), e em carbono fixo (RGCF – Equação 14), obtidos em relação à massa seca de madeira.

$$RGCV = \left( \frac{M_{cv}}{M_m} \right) * 100 \quad (11)$$

No qual: *RGCV* é rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); *M<sub>cv</sub>* é a massa seca de carvão vegetal (g); *M<sub>m</sub>* é a massa seca de madeira (g).

$$RGLP = \left( \frac{M_l}{M_m} \right) * 100 \quad (12)$$

No qual: *RGLP* é rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso (%); *M<sub>l</sub>* é a massa do líquido pirolenhoso (g); *M<sub>m</sub>* é a massa seca de madeira (g).

$$RGGNC = 100 - (RGCV - RGLP) \quad (13)$$

No qual: *RGGNC* é rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (%); *RGCV* é rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); *RGLP* é rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso (%).

$$RGCF = \left( \frac{TCF}{RGCV} \right) * 10 \quad (14)$$

No qual: *RGCF* é rendimento gravimétrico em carbono fixo (%); *TCF* é o teor de carbono fixo (%); *RGCV* é rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%).

As estimativas de consumo específico de madeira (*CE*) foram realizadas considerando a densidade básica da madeira e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, conforme a Equação 15:

$$CE = \frac{1}{DBM * \left[ \frac{RGCV}{100} \right]} \quad (15)$$

No qual: *CE* é o consumo específico de madeira ( $m^3 t^{-1}$ ); *DBM* é a densidade básica da madeira ( $kg m^{-3}$ ); *RGCV* é rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%).

#### 4.5. Caracterização do carvão vegetal

##### 4.5.1. Densidade relativa aparente (DRA) e densidade à granel (DG)

A DRA foi determinada pelo método hidrostático por meio da imersão em água, conforme adaptação da norma NBR 11941 (ABNT, 2003). A DG foi calculada pela relação da massa de carvão pelo volume de uma caixa de madeira medindo  $0,000125 m^3$  de volume (0,05 m de comprimento x 0,05 m de largura x 0,05 de m altura), com adaptações da norma NBR 6922 (ABNT, 1981), conforme a Figura 6.

##### 4.5.2. Índice de friabilidade (IF)

Para a determinação do IF, utilizou-se o método do tamboramento, segundo a norma NBR 1375/80 (ABNT, 1983), no qual foram utilizadas amostras de carvão vegetal que passaram pela peneira de 60 mm e ficaram retidas na peneira de 30 mm.

Amostras de aproximadamente 40 g de carvão vegetal foram levadas a um tambor rotatório por 30 minutos a 30 rotações por minuto (rpm), conforme a Figura 6. Após esse período, o carvão vegetal foi novamente peneirado, determinando-se a massa que ficou retida na peneira de 3 mm e, então, calculado o IF conforme a Equação 16:

$$IF = \left( \frac{M1 - M2}{M1} \right) \quad (16)$$

No qual: *IF* é o índice de friabilidade (%); *M1* é o peso do carvão vegetal na peneira de 3 mm após o tamboramento (g); *M2* é o peso de carvão vegetal entre as peneiras de 60 e 30 mm (g).

#### 4.5.3. Composição química imediata

Amostras representativas dos carvões foram moídas e classificadas nas peneiras de 40 e 60 *mesh* para a realização da análise química imediata, de acordo com a norma D1762-84 (ASTM, 2021). O teor de cinzas (TCz) foi obtido em forno elétrico mufla aquecido a 750 °C, enquanto que o teor de materiais voláteis (TMV) foi determinado a 950 °C (Figura 6). O teor de carbono fixo (TCF) foi calculado por diferença entre o TCz e o TCF.

#### 4.5.4. Avaliações energéticas

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado usando uma bomba calorimétrica adiabática, modelo IKA C-200 (Figura 6), seguindo a norma E711-87 (ASTM, 1996). As estimativas de densidade energética (DE) e de eficiência energética da carbonização (EEC) foram determinadas conforme as Equações 17 e 18:

$$DE = \frac{(DRA * PCS \text{ do carvão vegetal})}{1000} \quad (17)$$

No qual: *DE* é a densidade energética do carvão vegetal (GJ m<sup>-3</sup>); *DRA* é a densidade relativa aparente do carvão vegetal (kg m<sup>-3</sup>); *PCS* é o poder calorífico superior do carvão vegetal (MJ kg<sup>-1</sup>).

$$EEC = RGCV * \frac{PCS \text{ do carvão vegetal}}{PCS \text{ da madeira}} \quad (18)$$

No qual: *RGCV* é rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); *PCS* do carvão e da madeira (MJ kg<sup>-1</sup>).

#### 4.6. Análises estatísticas

Os dados qualitativos de cada propriedade da madeira e do carvão vegetal foram submetidos aos testes de Bartlett (homogeneidade de variâncias) e de Shapiro-

Wilk (normalidade dos resíduos), considerando um delineamento inteiramente casualizado (DIC).

A análise de variância (ANAVA) foi conduzida ao nível de 5% de significância para testar o efeito do genótipo sobre as propriedades da madeira e do carvão vegetal. Em caso de efeito significativo, o teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ) foi utilizado para a comparação das médias e identificação dos materiais com maiores similaridades.

Os resultados foram apresentados em gráficos com médias seguidas de letras significando as similaridades entre os genótipos, e com barras de variância para mostrar a homogeneidade dos resultados de cada propriedade avaliada dentro do mesmo genótipo.

Não foram considerados a idade e o local de plantio como fontes de variação porque a diferença de idade é de apenas um ano, considerada irrelevante para as variações da madeira, e porque os locais dos plantios são muito próximos, portanto considerados sem alterações significativas das condições de precipitação e temperatura.

#### **4.7. Avaliação das propriedades da madeira e do carvão vegetal para seleção dos genótipos de *Corymbia***

Para a seleção dos genótipos de *Corymbia*, algumas propriedades da madeira e do carvão vegetal foram selecionadas. A escolha levou em consideração os seguintes critérios: praticidade da análise (facilidade de realização), tempo de resposta (menor tempo para o resultado), significância dos resultados (variação dos resultados em grupos com variação) e conhecimento prévio sobre a importância da propriedade para estudos de qualidade da madeira e do carvão vegetal (conforme leitura em referencial bibliográfico).

Na seleção das propriedades da madeira, vinte e uma propriedades qualitativas foram analisadas neste estudo, dentre elas a densidade básica da madeira (DBM) e da casca (DBC), espessura da casca (EC), porcentagem de casca (PCa) e porcentagem de cerne (PCe), frequência (FV) e diâmetro dos vasos (DV), comprimento (CF), largura (LF) e diâmetro do lúmen das fibras (DL), espessura da parede das fibras (EPF) e a fração parede das fibras (FPF), teor de extrativos totais (TExt), teor de lignina total (TLig), teor de holocelulose (THol), teor de cinzas

(TCz), teor de materiais voláteis (TMV) e teor de carbono fixo (TCF), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e densidade energética (DE).

Em termos da qualidade da madeira, as propriedades da madeira selecionadas foram: densidade básica (DBM), porcentagem de casca (PCa), porcentagem de cerne (PCe), teor de lignina (TLig) e densidade energética (DE).

Em relação ao processo de carbonização, foi selecionado apenas o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV).

Na seleção das propriedades do carvão vegetal, dez propriedades qualitativas foram analisadas, dentre elas o consumo específico de madeira (CE), densidade relativa aparente (DRA) e densidade a granel (DG), índice de friabilidade (IF), teor de cinzas (TCz), teor de materiais voláteis (TMV) e teor de carbono fixo (TCF), poder calorífico superior (PCS), densidade energética (DE) e eficiência energética da carbonização (EEC).

Em termos da qualidade do carvão vegetal, as propriedades selecionadas foram: densidade relativa aparente (DRA) e densidade a granel (DG), índice de friabilidade (IF), teor de cinzas (TCz) e densidade energética (DE).

Para a indicação das propriedades da madeira de maior importância para a produção e qualidade do carvão vegetal, utilizou-se a Matriz de Importância que atribui “notas” e “pesos” à cada propriedade da madeira e do carvão de acordo com as médias formadas pelo teste de Scott-Knott, sendo nota 10 para o melhor grupo de médias, representado pela letra a.

As notas foram atribuídas em função do número de grupos indicados pelo teste de Scott-Knott. Ou seja, quando o teste de Scott-Knott informou a existência de quatro grupos diferentes, o melhor grupo recebeu nota 10 e o pior grupo recebeu nota 2,5 (10/4). De forma similar, quando houve três grupos distintos, o melhor recebeu nota 10 e o pior nota 3,3 (10/3), e assim por diante.

Além da nota, também foi atribuído um peso de 1 a 5 em função da importância do indicador para a qualidade final do carvão vegetal, sendo peso 5 para um indicador considerado muito importante.

Por fim, foi realizada a somatória das notas atribuídas a cada indicador, e pela nota total, foram informados os genótipos de *Corymbia* mais indicados para a produção de carvão vegetal.

É importante ressaltar que essa planilha pode ser alterada/adaptada para outros estudos a fim de selecionar materiais genéticos/madeiras para a produção de carvão vegetal, de acordo com as propriedades de interesse.

#### **4.8. Agrupamento multivariado para a seleção dos genótipos de *Corymbia***

A segunda abordagem envolveu o agrupamento multivariado pela Análise de Componentes Principais (ACP) que foi empregada para agrupar os genótipos e identificar as propriedades da madeira de maior contribuição para a formação dos componentes principais (CP's).

Todas as análises estatísticas foram realizadas no Software R versão 4.2.2 (R CORE TEAM, 2023) empregando os pacotes *ExpDes* (FERREIRA et al., 2014) para a ANAVA e o pacote *MultivariateAnalysis* (FERREIRA et al., 2018) para a ACP. Os gráficos foram criados utilizando-se o Software SigmaPlot versão 14.0.

Inicialmente foi realizada uma análise de agrupamento multivariado utilizando todas as vinte e uma propriedades da madeira, quatro variáveis do processo de carbonização (rendimento gravimétrico em carvão, em líquido pirolenhoso, em gases não condensáveis e em carbono fixo) e as dez propriedades do carvão vegetal.

Em seguida, foram realizadas novas ACP's dentro de grupos específicos de propriedades, sendo selecionadas de duas a três propriedades de cada grupo. A seleção das propriedades considerou o critério da correlação entre cada propriedade e os CP's, sendo escolhidas as propriedades com valores maiores ou iguais a 0,7, conforme sugerido por Dong & Qin (2018). No caso de propriedades consideradas estratégicas para a produção de carvão vegetal, como a densidade da madeira, por exemplo, mesmo que o valor fosse inferior a 0,7, as propriedades foram escolhidas em detrimento daquelas com valores maiores ou iguais a 0,7.

O primeiro grupo foi constituído pelas variáveis físicas, macroscópicas da casca e do lenho e anatômicas: densidade básica da madeira (DBM) e da casca (DBC), espessura (EC) e porcentagem de casca (PCa), porcentagem de cerne (PCe), frequência (FV) e diâmetro de vaso (DV), comprimento (CF) e largura das fibras (LF), diâmetro do lúmen das fibras (DL), espessura (EPF) e fração da parede das fibras (FPF).

O segundo grupo foi formado pelas propriedades químicas estrutural e não estrutural e imediata da madeira e propriedades de avaliação energética: teor de extrativos totais (TExt.), teor de lignina (TLig.), teor de holocelulose (THol.), teor de cinzas (TCz), teor de materiais voláteis (TMV) e teor de carbono fixo (TCF), poder calorífico superior (PCS), densidade energética (DE) e o índice de cristalinidade (IC).

O terceiro grupo reuniu as variáveis do processo de carbonização: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV), em líquido pirolenhoso (RGLP), em gases não condensáveis (RGGNC) e em carbono fixo (RGCF) e consumo específico de madeira (CE).

No quarto grupo foram reunidas as propriedades do carvão vegetal: densidade relativa aparente (DRA) e a granel (DG), índice de friabilidade (IF), teores de cinzas (TCz), de materiais voláteis (TMV) e de carbono fixo (TCF), poder calorífico superior (PCS), densidade energética (DE) e eficiência energética da carbonização (EEC).

Ao final, uma nova ACP foi realizada considerando as propriedades selecionadas de cada grupo específico, tendo sido feito ainda um ajuste na análise para verificar se a retirada de alguma propriedade colaboraria para o aumento da explicação do agrupamento.

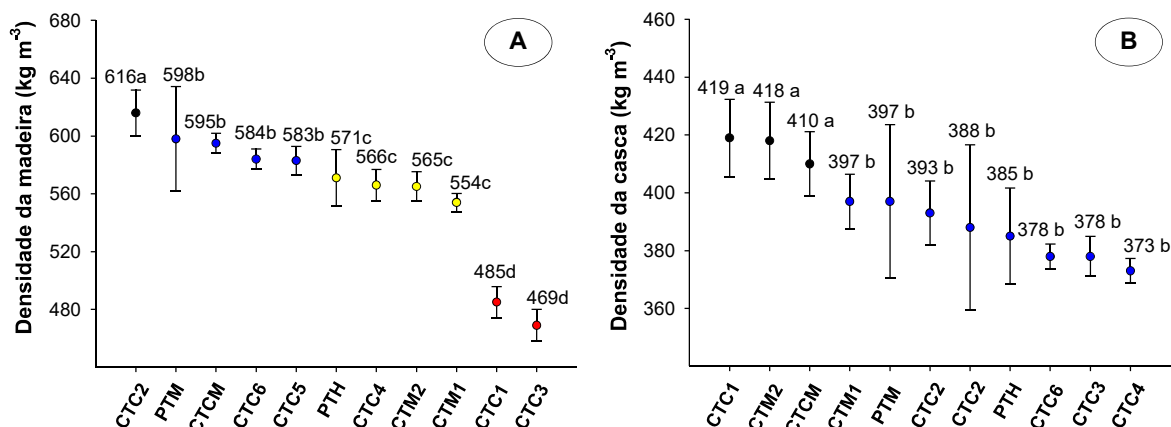
Desta forma, ao comparar a análise de componentes principais realizadas com diferentes propriedades da madeira, do carvão e do processo, foi possível perceber a importância de selecionar adequadamente as informações.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Efeito do genótipo sobre as propriedades da madeira

#### 5.1.1. Densidade básica da madeira (DBM) e da casca (DBC)

Diferenças significativas sobre a DBM, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), foram observadas entre os genótipos, sendo formados quatro grupos de densidade (Figura 7A). O grupo 1, de maior DBM, foi composto apenas pelo clone CTC2 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), o qual apresenta valor de densidade superior a  $600 \text{ kg m}^{-3}$ . O grupo 2 incluiu a progênie PTM (*C. torelliana* x *C. maculata*) e os clones CTCM (tri clone), CTC6 e CTC5, todos apresentando densidade superior a  $580 \text{ kg m}^{-3}$ .



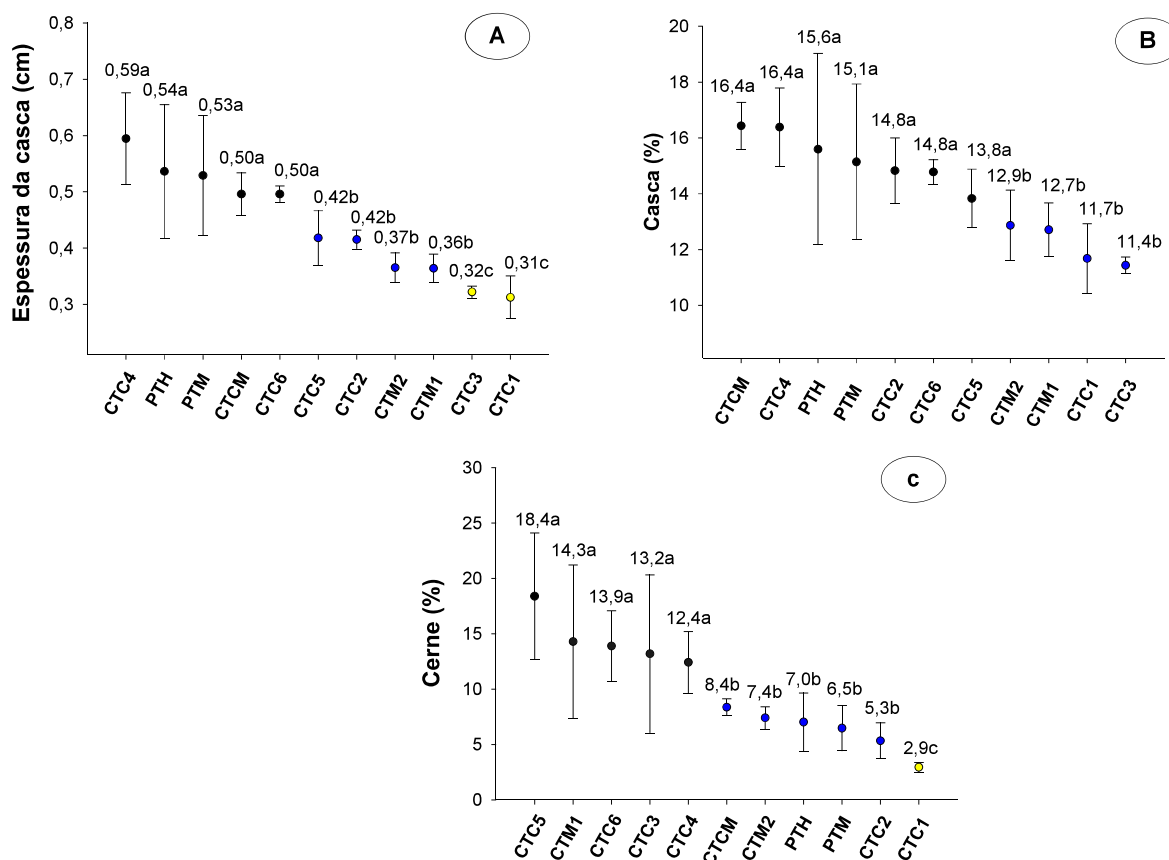
**Figura 7.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com a densidade básica da madeira (A) e densidade básica da casca (B). Diferentes cores representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

O grupo 3, composto pela progênie PTH (*C. torelliana* x *C. henryi*) e pelos clones CTC4 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), CTM2 e CTM1 (*C. torelliana* x *C. maculata*), teve densidade variando de 554 a 571 kg m<sup>-3</sup>, enquanto que os clones CTC1 e CTC3, ambos de *C. torelliana* x *C. citriodora*, formaram o grupo 4, de menor DBM, caracterizado por valores de densidade inferiores a 500 kg m<sup>-3</sup>.

A DBC também foi significativamente influenciada pelo genótipo, pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância, e foi dividida em dois grupos de densidade (Figura 7B). O grupo 1 se diferenciou do segundo grupo pela inclusão de três genótipos de maior DBC: CTC1, CTM2 e CTCM (tri clone), todos apresentando valores superiores a 400 kg m<sup>-3</sup>. O grupo 2 foi composto pelos genótipos CTM1, PTM, CTC2, CTC5, PTH, CTC6, CTC3 e CTC4, com valores de densidade variando entre 373 e 397 kg m<sup>-3</sup>.

### 5.1.2. Propriedades macroscópicas da casca e do lenho

As médias de espessura da casca (EC), porcentagem de casca (PCa) e porcentagem de cerne (PCe) foram influenciadas significativamente pelos genótipos, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), conforme a Figura 8.



**Figura 8.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com a espessura da casca (A), porcentagem de casca (B), e porcentagem de cerne (C). Diferentes cores representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

Para a EC, os genótipos foram divididos em três grupos. O grupo 1, formado pelos genótipos de maior EC (0,59 a 0,50 cm), apresentou como destaque o clone CTC4 (0,59 cm), clone de *C. torelliana* x *C. citriodora*, enquanto que o grupo 3, formado pelos genótipos de menor EC (0,32 a 0,31 cm) teve como destaque o clone CTC1, também do cruzamento de *C. torelliana* x *C. citriodora* (Figura 8A).

Na análise de PCa, verificou-se a formação de dois grupos: grupo de maior PCa (16,4 a 13,8%), com destaque para o tri clone (CTCM) e o grupo de menor PCa (12,9 a 11,4%), no qual o genótipo CTC3 se destacou com média de 11,4% (Figura 8B).

Por fim, a PCe foi dividida em três grupos. O grupo 1, de maior PCe (18,4 a 12,4%) teve como destaque o genótipo CTC5 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), enquanto o grupo 3, de menor PCe (2,9%) foi formado apenas pelo genótipo CTC1 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), conforme a Figura 8C.

### 5.1.3. Anatomia descritiva dos vasos e das fibras

A frequência de vasos (FV) foi influenciada pelos genótipos, conforme o teste de Scott-Knott, ( $p < 0,05$ ), de acordo com a Tabela 2. Os genótipos foram divididos em quatro grupos, sendo o grupo 1, de maior valor (14,1 unidades  $\text{mm}^2$ ), formado apenas pelo tri clone CTCM (*C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata*). Já o grupo 4, de menor valor (8,3 unidades  $\text{mm}^2$ ) também foi formado por apenas um genótipo, ou seja, um clone de *C. torelliana* x *C. maculata* (CTM1). Os valores médios de DV não variaram significativamente (Tabela 2).

Quanto aos parâmetros das fibras, apenas o comprimento (CF) foi influenciado significativamente pelos genótipos (Tabela 2). Os valores de CF foram divididos em quatro grupos. O grupo 1 foi formado apenas pelo clone CTM1 (*C. torelliana* x *C. maculata*) com o maior valor de CF (907,5  $\mu\text{m}$ ), enquanto que o grupo 4 foi composto pelos genótipos de menor valor de CF (779,2 a 751,6  $\mu\text{m}$ ), em que o destaque foi para o clone CTM2, também proveniente do cruzamento entre *C. torelliana* e *C. maculata* (Tabela 2).

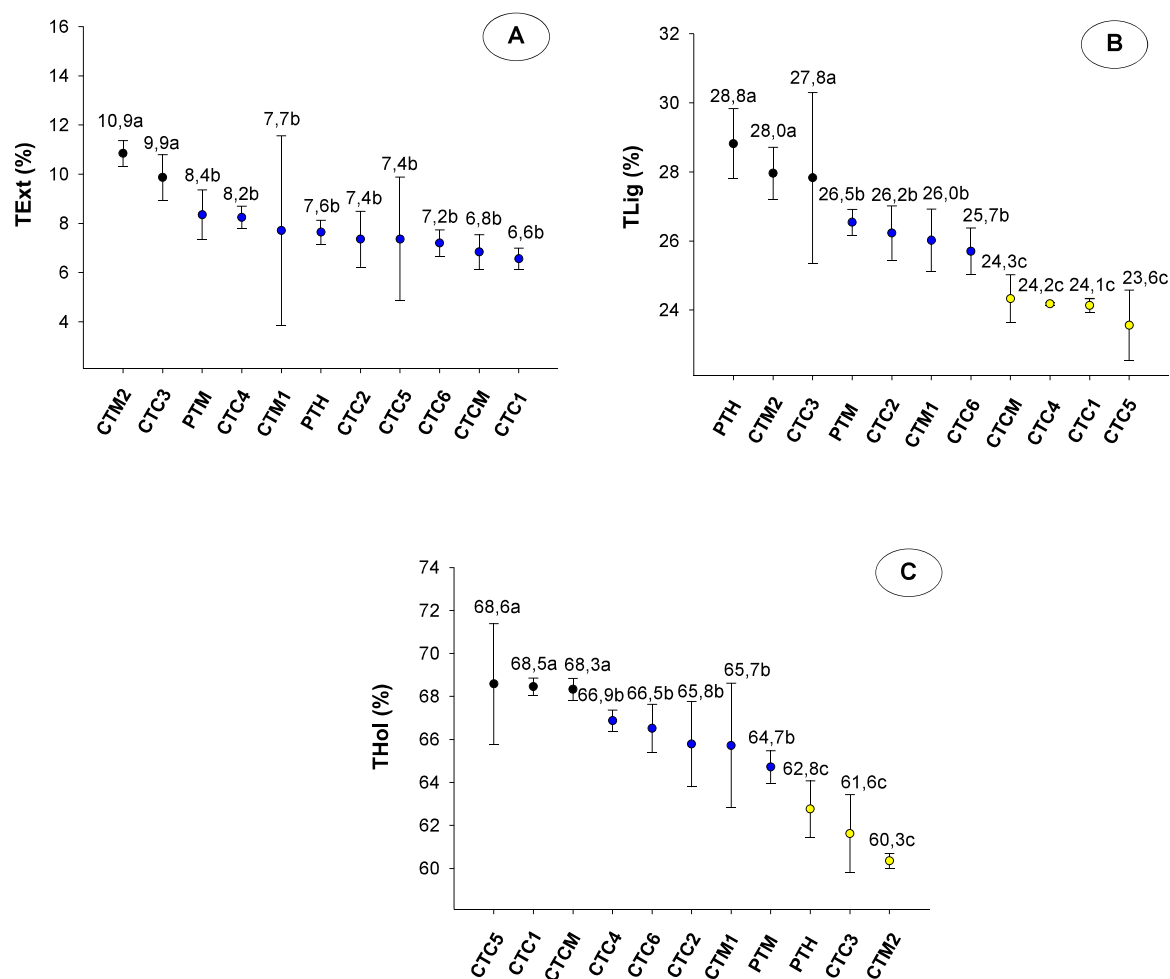
**Tabela 2.** Anatomia descritiva dos vasos e das fibras da madeira.

Genótipo	FV	DV	CF	LF	DL	EPF	FPF
PTH	12,0±0,8b	93,9±5,6a	813,9±33,2c	15,4±0,9a	6,1±0,8a	4,6±0,2a	30,2±0,5a
PTM	10,6±1,0c	97,1±9,2a	841,7±34,8b	15,4±1,5a	6,0±0,7a	4,7±0,5a	30,5±0,5a
CTCM	14,1±0,8a	89,3±9,1a	800,1±27,8c	13,5±0,5a	5,3±0,3a	4,1±0,1a	30,5±0,4a
CTM1	8,3±0,3d	101,0±11,7a	907,5±16,3a	15,0±0,6a	6,4±0,1a	4,3±0,3a	28,8±0,9a
CTM2	11,6±0,8b	87,8±3,5a	779,2±23,4d	14,0±1,4a	5,4±0,4a	4,3±0,6a	30,7±1,1a
CTC1	11,3±0,9b	98,1±8,4a	819,0±29,8c	15,8±1,8a	6,1±0,8a	4,9±0,7a	30,8±1,9a
CTC2	12,3±1,2b	90,1±5,4a	834,4±10,1b	14,2±1,1a	6,3±0,5a	4,0±0,3a	28,0±0,9a
CTC3	11,3±1,5b	97,2±6,4a	751,6±13,2d	14,1±0,8a	5,7±0,4a	4,2±0,3a	29,6±1,2a
CTC4	12,1±0,7b	95,87±4,0a	778,4±26,6d	14,8±0,6a	5,9±0,4a	4,4±0,1a	30,1±0,5a
CTC5	11,2±0,4b	103,9±4,8a	848,2±40,2b	14,7±0,5a	5,8±0,4a	4,5±0,4a	30,4±1,9a
CTC6	10,4±0,8c	92,5±5,1a	801,4±32,9c	13,4±1,2a	5,7±0,4a	3,9±0,5a	28,6±1,0a
CVe	7,2	7,4	3,5	7,4	9,0	8,9	4,0

Onde: FV é a frequência de vasos (unidade mm<sup>2</sup>); DV é o diâmetro dos vasos (µm); CF é o comprimento das fibras (µm); LF é a largura das fibras (µm); DL é o diâmetro do lúmen das fibras (µm); EPF é a espessura da parede das fibras (µm); e FPF é a fração parede das fibras (%). Cve (%) é o coeficiente de variação experimental. A mesma letra minúscula dentro da coluna não difere significativamente, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

#### 5.1.4. Composição química estrutural e não estrutural

Efeito significativo dos genótipos sobre o teor de extrativos (TExt), de lignina total (TLig) e de holocelulose (THol) foi verificado, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), conforme a Figura 9.



**Figura 9.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com o teor de extrativos totais (A), teor de lignina total (B), e teor de holocelulose (C). Diferentes cores representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

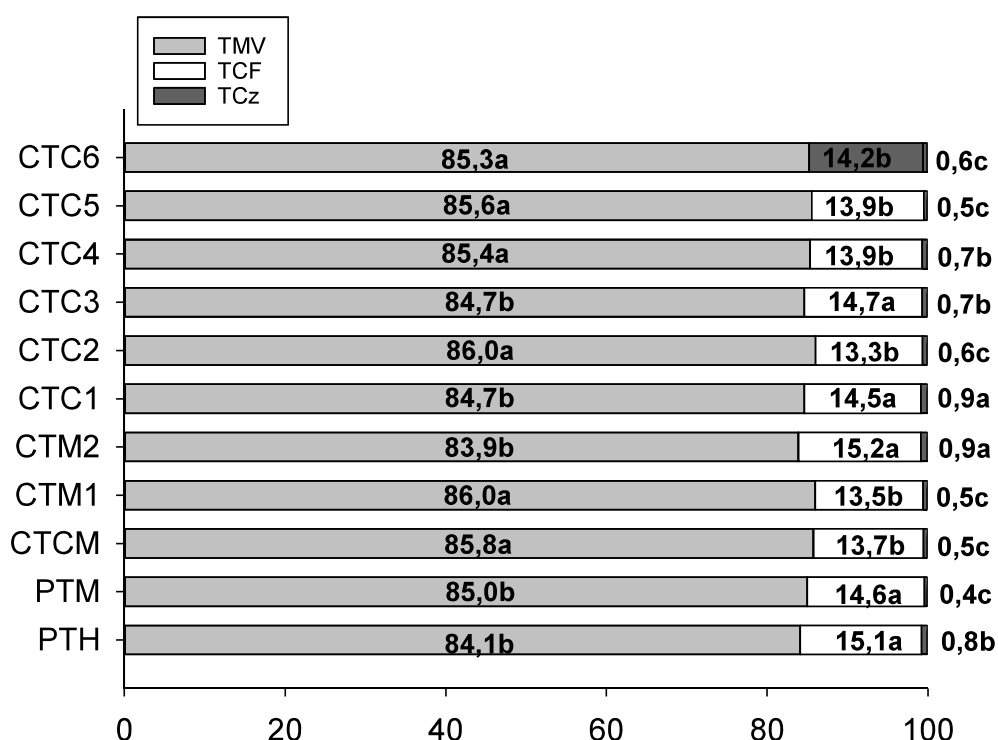
Para o TExt, os genótipos foram divididos em dois grupos: o primeiro formado pelos genótipos de maior TExt (10,8 a 9,9%), com destaque para o clone CTM2 (*C. torelliana* x *C. maculata*), e o segundo formado pelos genótipos de menor TExt (8,4 a 6,6%), cujo genótipo destaque foi a progênie de *C. torelliana* x *C. maculata* (PTM), de acordo com a Figura 9A.

O TLig foi dividido em três grupos, sendo o grupo 1 formado pelos genótipos de maior TLig (28,8 a 27,8%), com destaque para a progênie de *C. torelliana* x *C. henryi* (PTH), e o grupo 3 formado pelos genótipos de menor TLig (24,3 a 23,6%), com destaque para o tri clone de *C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata* (CTCM), conforme a Figura 9B.

Em relação ao THol, também foram formados três grupos: grupo 1 reunindo os genótipos de maior THol (68,6 a 68,3%), com destaque para o clone de *C. torelliana* x *C. citriodora* (CTC5), e o grupo 3 reunindo os genótipos de menor THol (62,8 a 60,3%), com destaque para a progênie de *C. torelliana* e *C. henryi* (PTH), conforme a Figura 9C.

#### 5.1.5. Composição química imediata

Os valores médios dos teores de cinzas (TCz), de materiais voláteis (TMV) e de carbono fixo (TCF) foram influenciados pelos genótipos, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), como apresentado na Figura 10.



**Figura 10.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com os teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo da madeira. Diferentes letras representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

Para o TCz, os genótipos foram divididos em três grupos distintos, de modo que o primeiro grupo foi composto pelos genótipos de maior TCz, CTM2 e CTC1, ambos com o mesmo valor (0,85%), enquanto que o terceiro grupo foi formado pelos genótipos de menor TCz (0,63 a 0,39%), com destaque para o clone CTC2, clone de *C. torelliana* x *C. citriodora* (Figura 10).

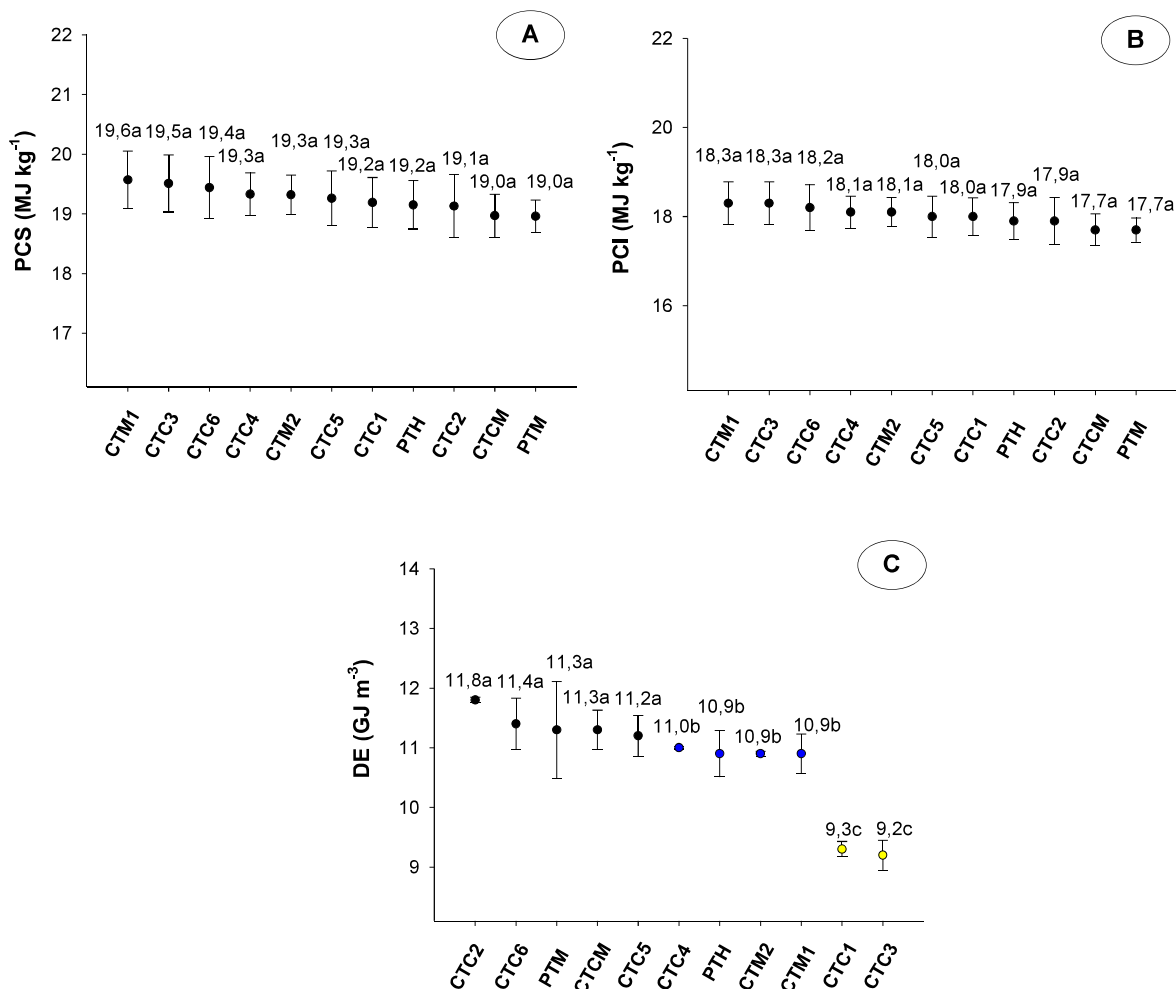
Quanto aos valores de TMV, os genótipos foram divididos em dois grupos. O grupo 1, formado pelos genótipos de maior TMV (86,0 a 85,3%), que teve como destaque o clone CTC2. Já o grupo 2, formado pelos genótipos de menor TMV (85,0 a 83,9%), teve como destaque a progênie formado pelo cruzamento entre *C. torelliana* e *C. maculata* (PTM), como apresentado na Figura 10.

O TCF também foi dividido em dois grupos, nos quais o grupo 1 reuniu os genótipos de maior TCF (15,2 a 14,5%), com destaque para o clone de *C. torelliana* x *C. maculata* (CTM2). Já o grupo 2 reuniu os genótipos de menor TCF (14,2 a 13,3%), cujo destaque foi para o clone CTC6 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), de acordo com a Figura 10.

#### 5.1.6. Avaliações energéticas

Os valores de poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) não apresentaram diferenças significativas, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), apresentados na Figura 11 A e B.

A densidade energética (DE) apresentou diferenças significativas (Scott-Knott, ( $p < 0,05$ )) entre os genótipos avaliados, e os valores foram divididos em três grupos: grupo 1 formado pelos genótipos de maior DE (11,8 a 11,2%), com destaque para o clone CTC2, e grupo 3 formado pelos genótipos de menor DE (9,3 a 9,2%), com destaque para o clone CTC1 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), conforme a Figura 11C.



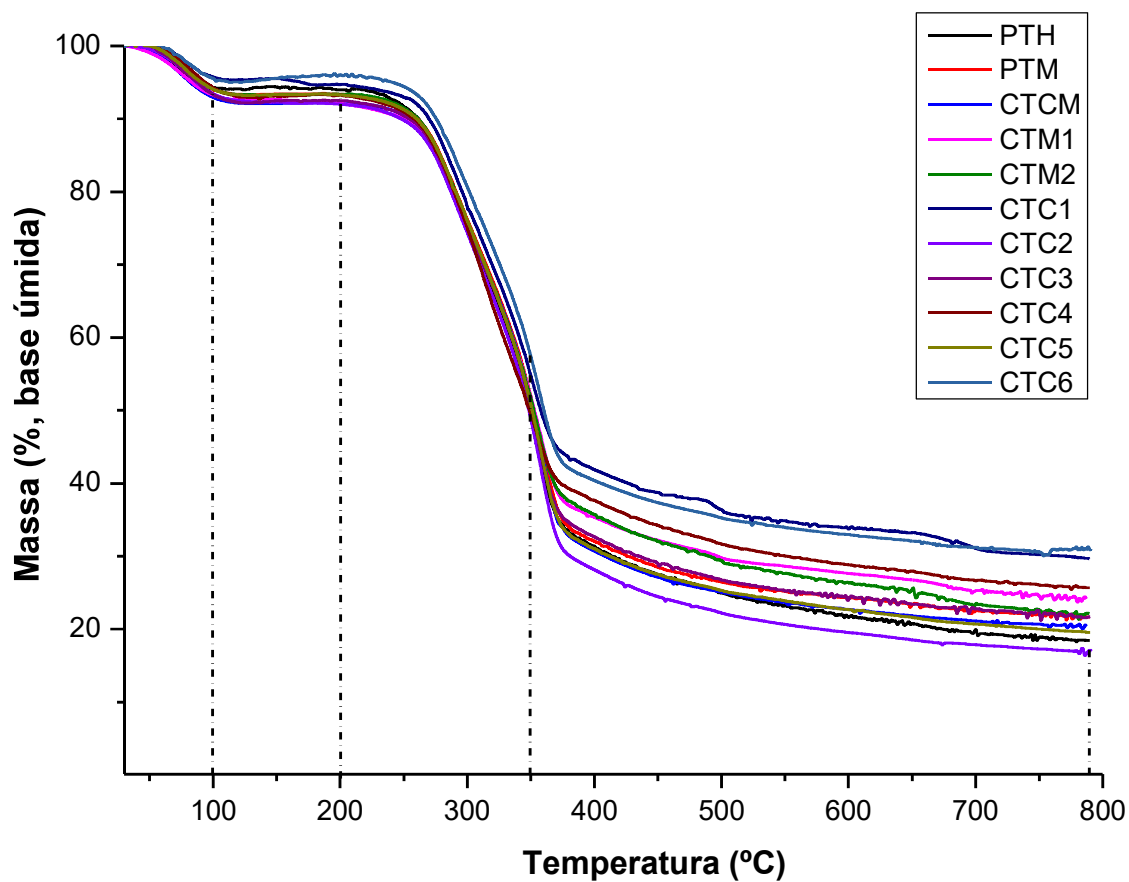
**Figura 11.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com o poder calorífico superior (A), poder calorífico inferior (B), e densidade energética (C) da madeira. Diferentes cores representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

### 5.1.7. Decomposição termogravimétrica

A decomposição termogravimétrica entre as madeiras dos genótipos de *Corymbia* está apresentada na Figura 12.

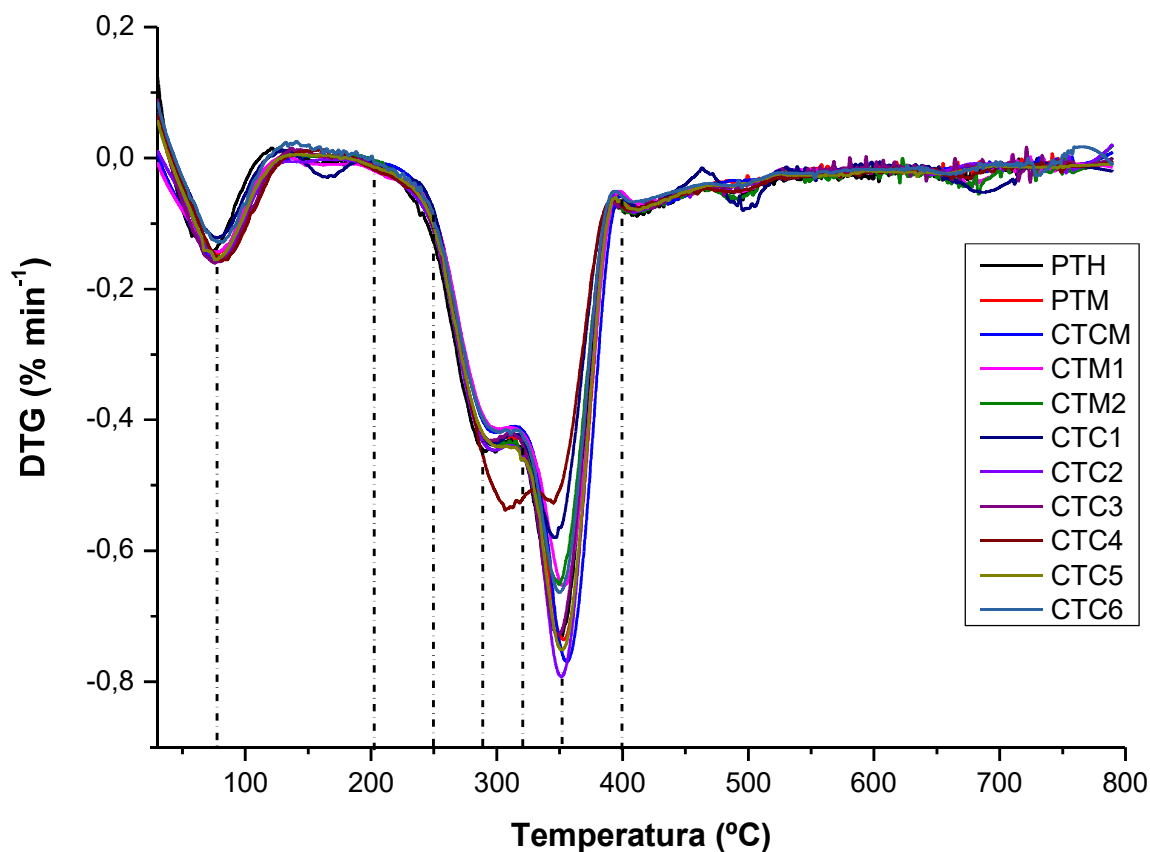
Baseado nas curvas termogravimétricas, os genótipos de maior estabilidade térmica, indicada pela massa residual da madeira, são os clones de *C. torelliana* x *C. citriodora* CTC6 (31%), CTC1 (29,7%), e CTC4 (25,7%).

Por outro lado, o clone CTC2 (17,0%), a progênie PTH (18,4%), e o clone CTC5 (19,6%), são os genótipos de menor estabilidade térmica.



**Figura 12.** Curvas termogravimétricas da madeira.

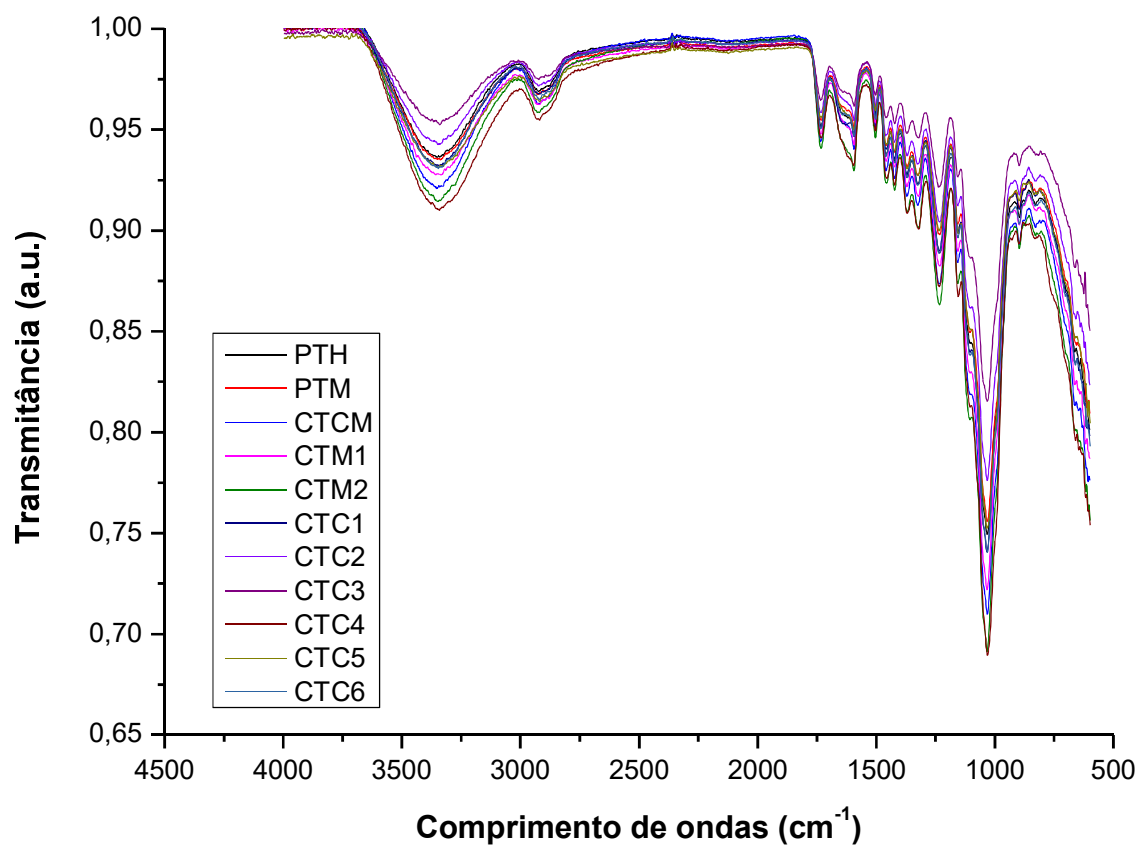
Na Figura 13 está apresentada a curva de DTG (primeira derivada da curva de termogravimetria), que exibe os diferentes estágios da degradação térmica da madeira. Três estágios são apresentados na curva de DTG, que representam as diferentes fases da degradação térmica da madeira.



**Figura 13.** Derivada das curvas termogravimétricas da madeira.

#### 5.1.8. Grupos químicos funcionais

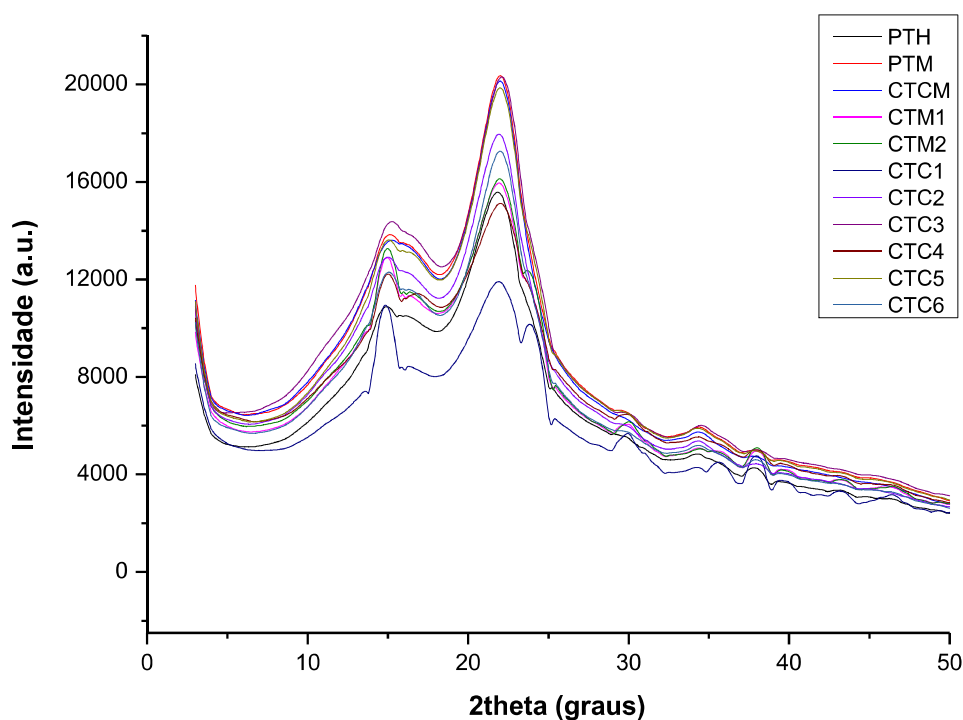
Os espectros de FTIR revelam que a estrutura química da madeira dos genótipos de *Corymbia* é altamente similar, pois não há diferenças significativas nos espectrogramas (Figura 14). Essa similaridade é atribuída ao fato de que todos os genótipos pertencem ao mesmo gênero.



**Figura 14.** Principais espectros de FTIR da madeira (picos em 3334, 2923, 1733, 1596, 1503, 1495, 1422, 1372, 1319, 1232, 1153, 1031 e 899 cm<sup>-1</sup>).

#### 5.1.9. Cristalinidade da celulose

Os perfis de difração de raios X (DRX) indicam a presença apenas da celulose do tipo I, conforme evidenciado pelas reflexões características (Figura 15).



**Figura 15.** Curvas de difração de raios-X (DRX) da madeira.

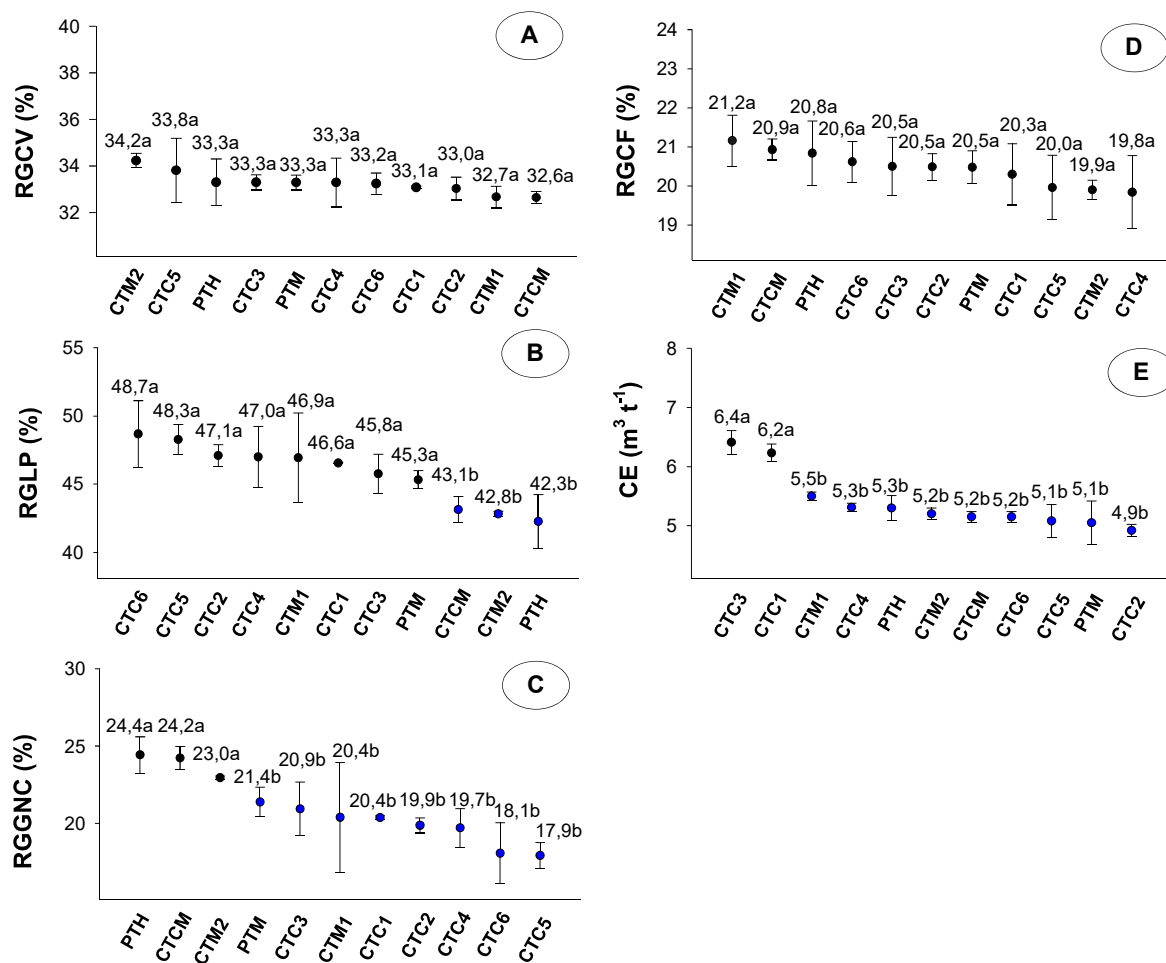
A Tabela 3 apresenta o índice de cristalinidade para cada genótipo de *Corymbia*, mostrando que o tri clone de *C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata* (CTCM), a progênie de *C. torelliana* x *C. maculata* (PTM) e o clone de *C. torelliana* x *C. citriodora* (CTC5) apresentaram os maiores valores.

**Tabela 3.** Índice de cristalinidade (IC %) da madeira.

Genótipos	Índice de cristalinidade (%)
PTH	35,1
PTM	38,2
CTCM	38,4
CTM1	32,1
CTM2	31,9
CTC1	31,3
CTC2	35,9
CTC3	36,7
CTC4	26,4
CTC5	37,8
CTC6	37,1

## 5.2. Balanços da carbonização e consumo específico de madeira

Os valores médios de rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso (RGLP), em gases não condensáveis (RGGNC) e o consumo específico de madeira (CE) foram influenciados significativamente pelos genótipos, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), conforme a Figura 16.



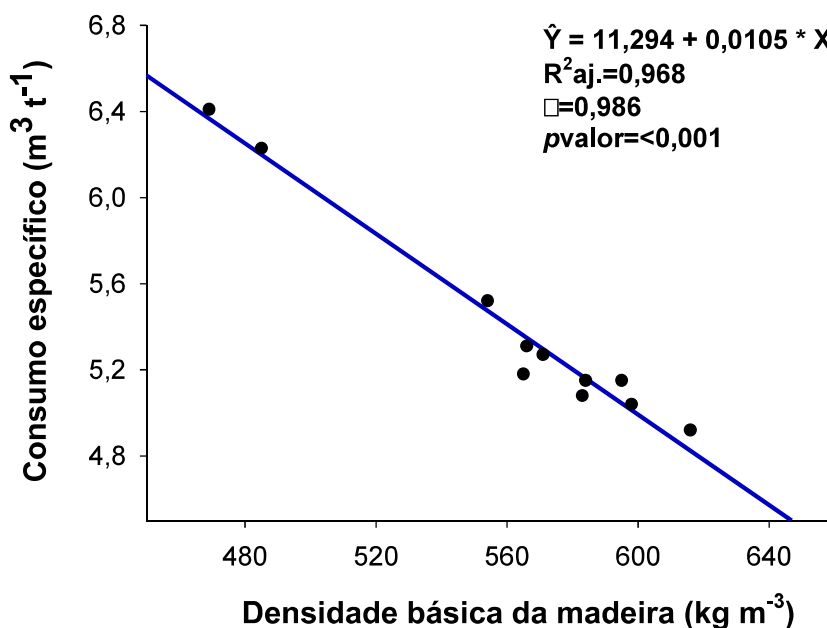
**Figura 16.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (A), em líquido pirolenhoso (B), em gases não condensáveis (C), em carbono fixo (D), e consumo específico de madeira (E). Diferentes cores representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

Para o RGLP, os genótipos foram divididos em dois grupos, sendo o grupo 1 formado pelos genótipos de maior RGLP (48,7 a 45,3%), cujo destaque foi o clone de *C. torelliana* x *C. citriodora* (CTC6), enquanto que o grupo 2, formado pelos genótipos de menor RGLP (43,1 a 42,3%), onde o destaque foi o tri clone de *C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata* (CTCM), de acordo com a Figura 16B.

Em relação ao RGGNC, os genótipos foram divididos em dois grupos: grupo 1, de genótipos de maior valor (24,4 a 23%), com a progênie de *C. torelliana* x *C. henryi* (PTH) como o destaque, e grupo 2, de genótipos de menor valor (21,4 a 17,9%), cujo destaque foi a progênie de *C. torelliana* x *C. maculata* (PTM) (Figura 16C).

Por fim, o CE também foi dividido em dois grupos: o grupo 1, formado pelos genótipos de maior CE (6,4 a 6,2 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>), com o clone CTC3 (*C. torelliana* x *C. citriodora*) como destaque, e o grupo 2, formado pelos genótipos de menor CE (5,5 a 4,9 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>), com o clone CTM1 (*C. torelliana* x *C. maculata*) como o destaque (Figura 16E).

Assim como para a DRA e DG do carvão vegetal, foi observada forte relação entre a DBM e o consumo específico de madeira, conforme observado na Figura 17.



**Figura 17.** Regressão linear entre a densidade básica da madeira e o consumo específico de madeira.

### 5.3. Caracterização do carvão vegetal

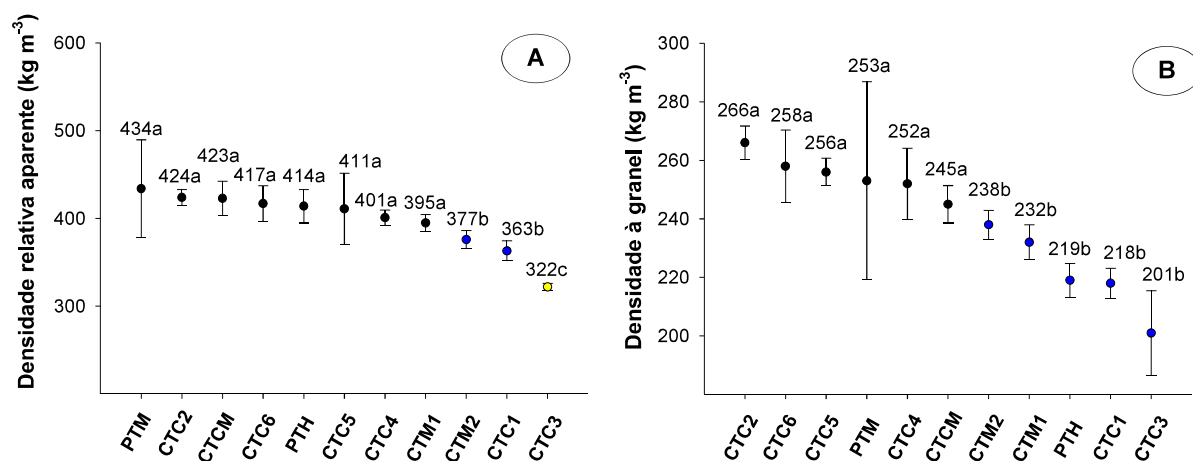
#### 5.3.1. Densidades relativa aparente (DRA) e densidade a granel (DG)

Houve efeito significativo dos genótipos sobre a densidade relativa aparente (DRA) e a densidade a granel (DG), conforme a Figura 18.

Para a DRA, os genótipos foram divididos em três grupos: grupo 1, formado pelos genótipos de maior DRA (434 a 395 kg m<sup>-3</sup>), com destaque para a progênie PTM

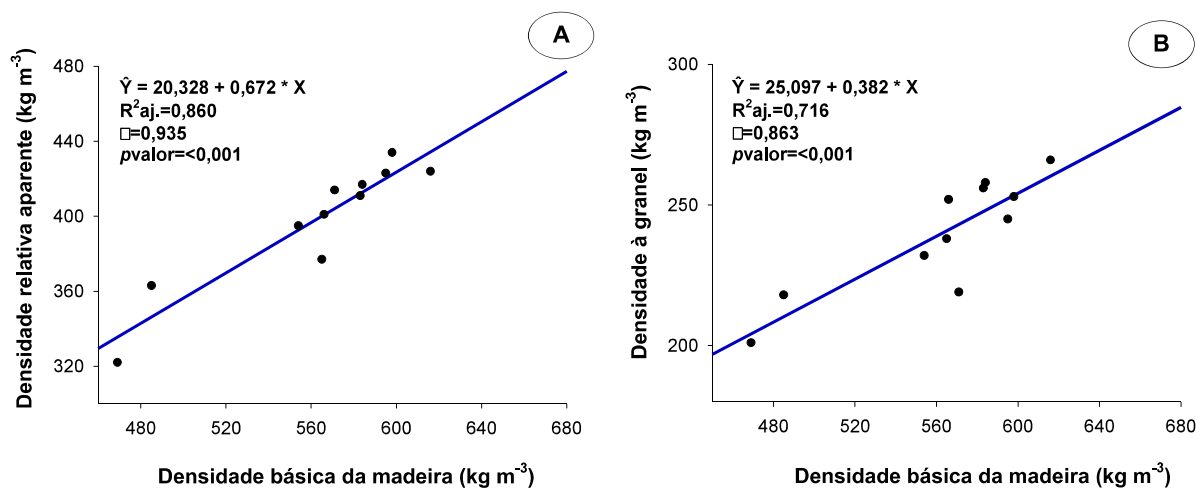
(*C. torelliana* x *C. maculata*), e o grupo 3, formado apenas pelo clone CTC3 (*C. torelliana* x *C. citriodora*) como o de menor DRA ( $322 \text{ kg m}^{-3}$ ), conforme a Figura 18A.

Quanto à DG, os genótipos foram divididos em dois grupos: grupo 1, de maior DG (266 a  $245 \text{ kg m}^{-3}$ ), cujo destaque foi o clone CTC2 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), e o grupo 2, de menor DG (238 a  $201 \text{ kg m}^{-3}$ ), cujo destaque foi o clone CTM2 (*C. torelliana* x *C. maculata*), conforme a Figura 18B.



**Figura 18.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com a densidade relativa aparente (A) e a densidade a granel (B) do carvão vegetal. Diferentes cores representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

Os genótipos de maior DRA e DG também são os genótipos de maior DBM, demonstrando a forte influência do material de origem sobre a densidade do carvão vegetal produzido. Fortes relações entre a DBM e DRA e a DG foram verificadas, conforme observado na Figura 19.

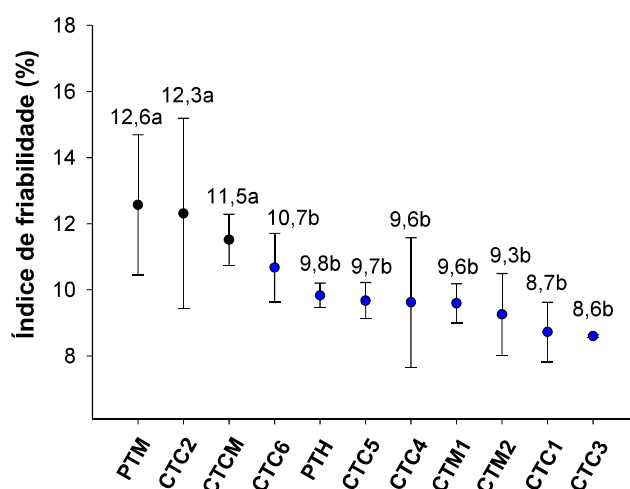


**Figura 19.** Regressão linear entre a densidade básica da madeira e a densidade relativa aparente (A) e densidade a granel do carvão vegetal (B).

### 5.3.2. Índice de friabilidade

Os valores médios do índice de friabilidade (IF) foram influenciados pelos genótipos, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), como apresentado na Figura 20.

Os genótipos foram divididos em dois grupos. O grupo 1 foi composto pelos genótipos de maior IF, com variação de 12,6 a 11,5%, sendo a progênie de *C. torelliana* x *C. maculata* (PTM) o genótipo de maior destaque. Por outro lado, o grupo 2 reuniu os genótipos de menor IF, com variação de 10,7 a 8,6%, sendo o clone CTC6 (*C. torelliana* x *C. citriodora*) o genótipo de maior destaque (Figura 20).

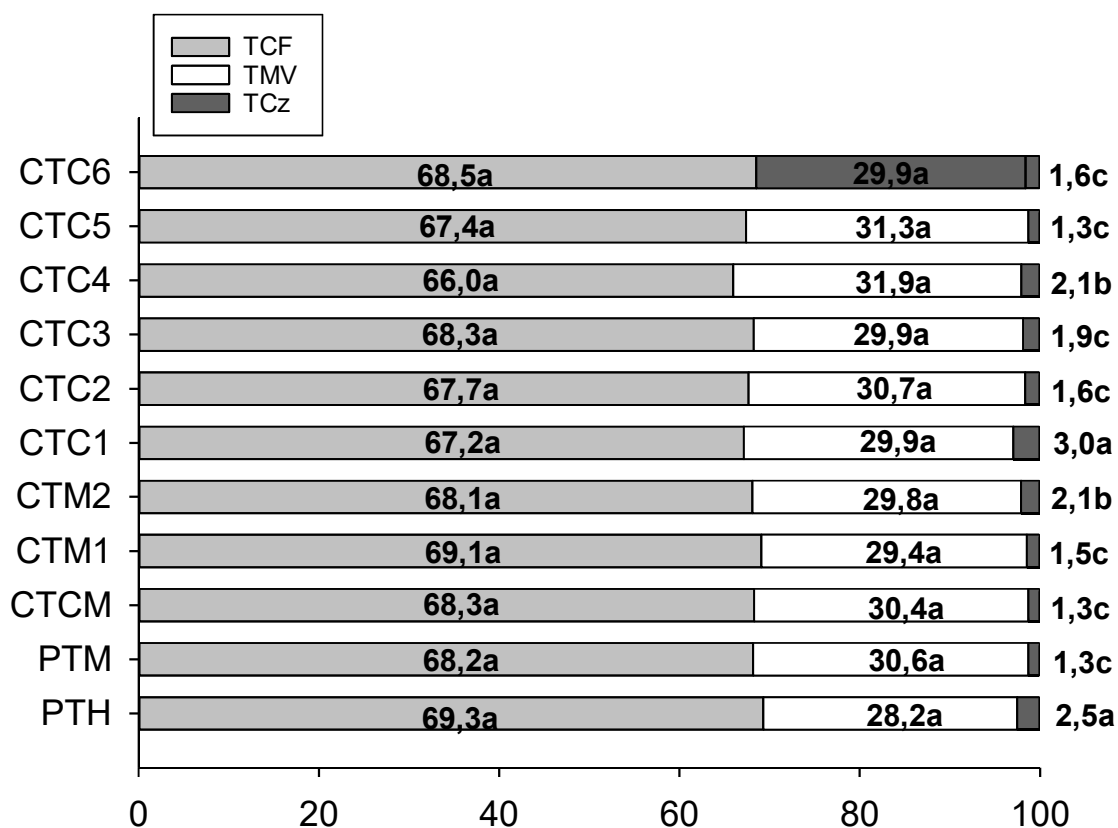


**Figura 20.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com o índice de friabilidade do carvão vegetal. Diferentes cores representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

### 5.3.3. Composição química imediata

Os valores médios de cinzas (TCz) foram influenciados pelos genótipos, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), conforme a Figura 21.

Os genótipos foram divididos em três grupos. O grupo 1 foi composto pelos genótipos de maior TCz, com variação de 3,0 a 2,5%, sendo o clone CTC1 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), o genótipo de maior destaque. Por outro lado, o grupo 3 reuniu os genótipos de menor TCz, com variação de 1,9 a 1,3%, sendo o clone CTC3 (*C. torelliana* x *C. citriodora*) o genótipo de maior destaque (Figura 21).

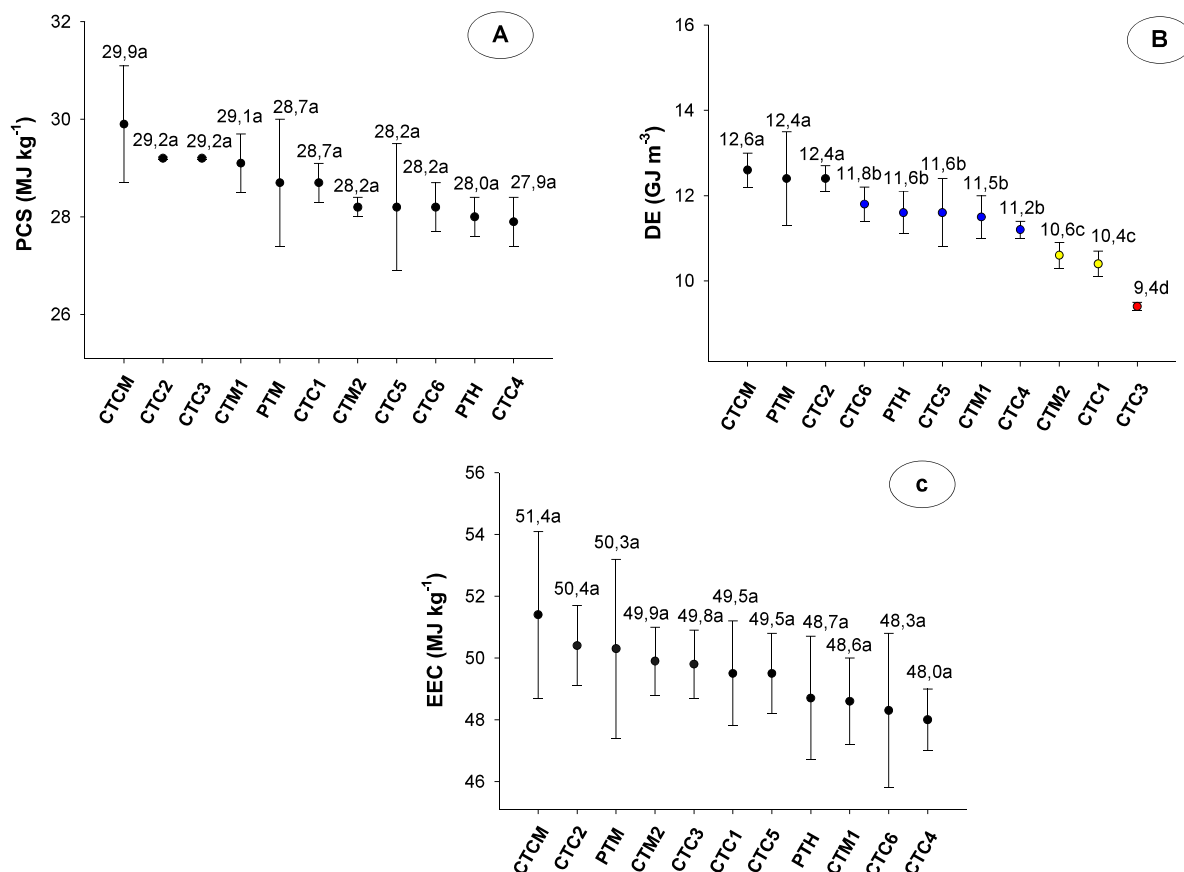


**Figura 21.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com os teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo do carvão vegetal. Diferentes letras representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

### 5.3.4. Avaliações energéticas

Os valores médios da densidade energética (DE) foram influenciados pelos genótipos, pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), de acordo com a Figura 22.

Os genótipos foram divididos em quatro grupos. O grupo 1, formado pelos genótipos de maior DE (12,6 a 12,4 GJ m<sup>-3</sup>), teve como destaque o tri clone de *C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata* (CTCM). O grupo 4 foi composto apenas pelo clone CTC3 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), com o menor valor de DE (9,4 GJ m<sup>-3</sup>).



**Figura 22.** Agrupamento dos genótipos de *Corymbia* de acordo com o poder calorífico superior (A), densidade energética (B), e eficiência energética da carbonização (C). Diferentes cores representam os grupos de médias pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

#### 5.4. Avaliação das propriedades da madeira e do carvão vegetal para seleção dos genótipos de *Corymbia*

Na Tabela 4 está apresentada a matriz de importância das propriedades da madeira e do carvão vegetal que foram utilizadas para seleção dos genótipos de *Corymbia*.

Quanto à densidade básica da madeira (DBM), o clone de *C. torelliana* x *C. citriodora* (CTC2) foi selecionado como o de maior valor (nota 10), conforme o teste de médias Scott-Knott. Outros três grupos de madeira foram determinados pelo teste,

recebendo notas variando entre 7,5 e 2,5. Além da nota, o peso da propriedade densidade da madeira foi definido como 5 (maior) pela importância dessa propriedade na avaliação de madeiras, em geral, para produção de carvão vegetal.

A mesma seleção pode ser realizada considerando apenas o valor médio desta propriedade, no entanto, a seleção pela matriz de importância é mais assertiva por considerar, além do valor médio obtido na análise, a nota e o peso de importância da propriedade para a produção de carvão vegetal.

Para a porcentagem de casca (PCa), quatro genótipos, dois clones de *C. torelliana* x *C. maculata* e dois clones de *C. torelliana* x *C. citriodora*, formaram o grupo de menor valor na madeira (nota 10), considerado desejável para a produção de carvão vegetal.

Para a porcentagem de cerne (PCe), outra propriedade que se espera valores mais baixos na madeira, apenas o clone CTC1 (*C. torelliana* x *C. citriodora*) formou o grupo de menor valor (nota 10). Outros dois grupos foram formados pelo teste de médias de Scott-Knott e notas de 6,6 e 3,3 foram atribuídas.

Foi dado peso 3 para essas duas propriedades (porcentagem de casca e cerne), por serem moderadamente importantes para produção de carvão vegetal, que não exige madeira descascada e sem cerne para a produção de carvão vegetal.

Considerando o teor de lignina total (TLig), a progênie de *C. torelliana* x *C. henryi* (PTH) e os clones CTM2 (*C. torelliana* x *C. maculata*) e CTC3 (*C. torelliana* x *C. citriodora*) formaram o grupo de maior valor da madeira e receberam nota 10. Outros dois grupos foram formados, recebendo notas 3,3 e 6,6. Sobre a densidade energética da madeira (DEM), cinco genótipos formaram o grupo de maior valor com nota 10 pelo teste de médias.

Outros dois grupos foram formados recebendo notas 3,3 e 6,6. O peso dessas propriedades (teor de lignina e densidade energética) foi de 4, por serem propriedades importantes, mas que sozinhas não determinam tanto efeito na qualidade do carvão vegetal, como foi proposto para densidade da madeira, por exemplo.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV), apesar de não ter sofrido efeito do genótipo pelo teste de médias Scott-Knott, foi utilizado na matriz pela sua importância prática, pois estabelece uma relação direta entre a madeira e a quantidade de carvão vegetal produzida.

Sobre as propriedades do carvão vegetal na matriz de importância, a densidade relativa aparente (DRA) do carvão vegetal teve um grupo de maior valor (nota 10), formado pelas duas progênes, pelo tri clone (*C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata*), e pelos clones CTM1 (*C. torelliana* x *C. maculata*), CTC2, CTC4, CTC5 e CTC6 (*C. torelliana* x *C. citriodora*). Outros dois grupos foram formados com notas de 3,3 e 6,6, e o peso atribuído a essa propriedade foi 5, devido a densidade do carvão ser uma propriedade altamente associada a outras propriedades do carvão, da madeira e dos processos de carbonização.

Para a densidade a granel (DG), a progênie PTM (*C. torelliana* x *C. maculata*), o tri clone (*C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata*) e os clones CTC2, CTC4, CTC5 e CTC6 formaram o grupo de maior valor (nota 10), tendo sido formado um outro grupo de materiais pelo teste Scott-Knott.

Para o índice de friabilidade (IF), a progênie PTM (*C. torelliana* x *C. maculata*), o tri clone (*C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata*) e os clones CTC2 formaram o grupo de maior valor (nota 10), tendo sido formado apenas outro grupo de acordo com teste de médias. Ambas as propriedades receberam peso 4 por serem consideradas importantes para avaliação de materiais para produção de carvão vegetal.

Quanto ao teor de cinzas (TCz), a progênie PTM, o tri clone CTCM, os clones CTM1, CTC5 e CTC6 formaram o grupo de menor valor (nota 10), e outros dois grupos foram formados pelo teste de médias, recebendo valores 3,3 e 6,6 e peso, quanto a importância para avaliação de carvão vegetal.

Por fim, para a densidade energética do carvão vegetal (DEC), a progênie PTM, o tri clone CTCM e o clone CTC2 formaram o grupo de maior valor (nota 10), e outros dois grupos foram formados pelo teste de média, recebendo notas 3,3 e 6,6, e que receberam peso 4 dada a importância da densidade energética para produção de carvão vegetal.

A seleção dos genótipos baseada na matriz de importância construída por este estudo demonstrou que, considerando apenas as propriedades da madeira selecionadas, grupos, pesos e valores atribuídos, os genótipos melhores ranqueados foram: 1º CTC2 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), 2º CTM2 (*C. torelliana* x *C. maculata*), e 3º PTH (*C. torelliana* x *C. henryi*), enquanto que os genótipos piores ranqueados foram: 11º CTC4 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), 10º CTC1 (*C. torelliana* x *C. citriodora*) e 9º CTC3 (*C. torelliana* x *C. citriodora*).

Quando a seleção deste trabalho foi realizada considerando as propriedades da madeira e do carvão vegetal, com os respectivos grupos, valores e pesos, os genótipos melhores ranqueados foram: 1º CTC2, 2º CTC5 e 3º CTC6, enquanto que os genótipos piores ranqueados foram: 11º CTC3, 10º CTC1 e 9º CTM2.



### 5.5. Agrupamento multivariado para a seleção dos genótipos de *Corymbia*

Para o agrupamento multivariado considerando todas as propriedades da madeira, do processo de carbonização e da caracterização do carvão vegetal, a Análise das Componentes Principais (ACP) revelou que os dois primeiros componentes principais (CP's) explicaram 46% da variabilidade total dos dados (Tabela 5).

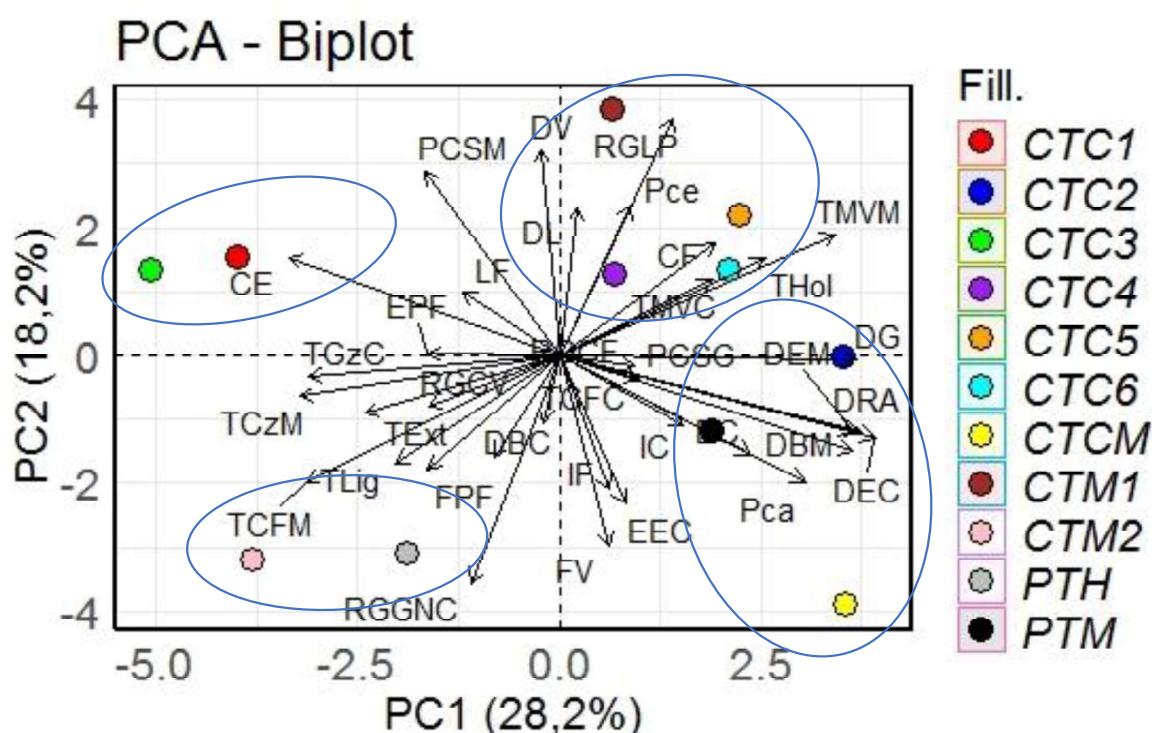
As propriedades que mais contribuíram para a formação dos CP's foram a densidade básica da madeira (DBM), a densidade energética da madeira (DEM) e do carvão vegetal (DEC) e densidade relativa aparente (DRA) e a granel (DG).

**Tabela 5.** Correlação das propriedades da madeira e do carvão vegetal com os dois primeiros componentes principais.

<b>Propriedades</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>
Densidade básica da madeira (DBM)	<b>0,8462</b>	-0,3494
Densidade básica da casca (DBC)	-0,1876	-0,3655
Espessura da casca (EC)	0,5506	-0,3601
Porcentagem de casca (PCa)	0,7066	-0,4587
Porcentagem de cerne (PCe)	0,2036	0,544
Frequência de vasos (FV)	0,1434	-0,6906
Diâmetro dos vasos (DV)	-0,0529	0,7466
Comprimento das fibras (CF)	0,4458	0,4036
Largura das fibras (LF)	-0,2774	0,2312
Diâmetro do lúmen das fibras (DL)	0,054	0,5351
Espessura da parede das fibras (EPF)	-0,3794	0,0048
Fração da parede das fibras (FPF)	-0,3803	-0,4128
Teor de extrativos totais (TExt)	-0,5576	-0,2097
Teor de lignina total (TLig)	-0,4701	-0,3937
Teor de holocelulose (THol)	0,5922	0,3505
Teor de cinzas da madeira (TCzM)	-0,7451	-0,1499
Teor de materiais voláteis da madeira (TMVM)	0,7940	0,4380
Teor de carbono fixo da madeira (TCFM)	-0,7289	-0,4609
Poder calorífico superior da madeira (PCSM)	-0,3839	0,666
Densidade energética da madeira (DEM)	<b>0,8438</b>	-0,2734
Índice de cristalinidade (IC)	0,3571	-0,2545
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV)	-0,3765	-0,1842
Rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso (RGLP)	0,3281	0,8618

Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (RGGNC)	-0,251	-0,8257
Rendimento gravimétrico em carbono fixo (RGCF)	0,2144	-0,0378
Consumo específico de madeira (CE)	-0,777	0,3549
Densidade relativa aparente (DRA)	<b>0,8655</b>	-0,2765
Densidade a granel (DG)	<b>0,8539</b>	-0,0127
Índice de friabilidade (IF)	0,1436	-0,4873
Teor de cinzas do carvão vegetal (TCzC)	-0,7197	-0,075
Teor de materiais voláteis do carvão vegetal (TMVC)	0,4402	0,2745
Teor de carbono fixo do carvão vegetal (TCFC)	-0,0468	-0,2457
Poder calorífico superior do carvão vegetal (PCSC)	0,2305	-0,0881
Densidade energética do carvão vegetal (DEC)	<b>0,9075</b>	-0,2973
Eficiência energética da carbonização (EEC)	0,1892	-0,505

Os genótipos de *Corymbia* foram divididos em quatro grupos distintos e a dispersão dos escores obtidos pelos componentes principais está apresentada na Figura 23.



**Figura 23.** Correlações das propriedades e escores dos componentes principais.

Para o agrupamento multivariado considerando apenas a seleção de variáveis de grupos específicos, considerando o grupo 1 as propriedades físicas e anatômicas

da madeira, a avaliação do primeiro grupo de propriedades demonstrou que os dois primeiros CP's explicaram 56% da variabilidade total dos dados (Tabela 6).

Dentre todas as propriedades físicas e anatômicas analisadas, as propriedades escolhidas foram a densidade básica da madeira (DBM) e a porcentagem de casca (PCa). Estas duas propriedades, apesar de apresentarem correlação inferior a 0,7 e não serem de maior contribuição para a formação dos CP's, mas que apresentaram boa correlação, foram escolhidas pela elevada relação técnica associada com a qualidade do carvão vegetal.

A espessura da parede das fibras (EPF) poderia ter sido escolhida pelo critério da importância estratégica, porém quando utilizada na ACP com todas as propriedades previamente selecionadas, esta propriedade diminuiu a explicação acumulada dos dois primeiros CP's.

**Tabela 6.** Correlação das propriedades do grupo 1 com os dois primeiros componentes principais.

<b>Propriedades</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>
Densidade básica da madeira (DBM)	<b>0,5304</b>	-0,424
Densidade básica da casca (DBC)	-0,1428	0,7088
Espessura da casca (EC)	0,5457	-0,3019
Porcentagem de casca (PCa)	<b>0,6754</b>	-0,2673
Porcentagem de cerne (PCe)	-0,0433	-0,6186
Frequência de vasos (FV)	0,71	0,4716
Diâmetro dos vasos (DV)	-0,7765	-0,3058
Comprimento das fibras (CF)	-0,5363	-0,4649
Largura das fibras (LF)	-0,7776	0,1559
Diâmetro do lúmen das fibras (DL)	-0,6442	-0,4757
Espessura da parede das fibras (EPF)	-0,6377	0,4578
Fração da parede das fibras (FPF)	-0,0924	0,763

Para a avaliação do segundo grupo de propriedades da madeira que consistiu das propriedades químicas, energéticas e cristalinidade, a ACP demonstrou que os dois primeiros CP's explicaram 69% da variabilidade total dos dados (Tabela 7).

As propriedades que mais contribuíram para a formação dos CP's foram o teor de holocelulose (THol.) e o teor de carbono fixo (TCF). O teor de materiais voláteis

(TMV), apesar de apresentar correlação superior ao TCF, não foi escolhido por apresentar relação direta com o THol.

**Tabela 7.** Correlação das propriedades do grupo 2 com os dois primeiros componentes principais.

<b>Propriedades</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>
Teor de extrativos totais (TExt.)	-0,7891	0,1451
Teor de lignina total (TLig.)	-0,7727	0,4461
Teor de holocelulose (THol.)	<b>0,8852</b>	-0,3181
Teor de cinzas da madeira (TCzM)	-0,6736	-0,5277
Teor de materiais voláteis da madeira (TMVM)	0,8973	-0,061
Teor de carbono fixo da madeira (TCFM)	<b>-0,8631</b>	0,1926
Poder calorífico superior da madeira (PCSM)	-0,2933	-0,5187
Densidade energética da madeira (DEM)	0,4886	0,5174
Índice de cristalinidade (IC)	0,2558	0,7875

Na avaliação do terceiro grupo de propriedades, que consideraram os rendimentos da carbonização e o consumo específico de madeira, a ACP demonstrou que os dois primeiros CP's explicaram 77% da variabilidade total dos dados, conforme Tabela 8.

A propriedade escolhida deste grupo foi o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV). Esta propriedade, apesar de apresentar correlação inferior a 0,7, e não ser de maior contribuição para a formação dos CP's, foi escolhida por representar a fração desejável da carbonização.

**Tabela 8.** Correlação das propriedades do grupo 3 com os dois primeiros componentes principais.

<b>Propriedades</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV)	<b>0,4442</b>	0,8419
Rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso (RGLP)	0,8195	-0,5687
Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (RGGNC)	-0,914	0,3953
Rendimento gravimétrico em carbono fixo (RGCF)	-0,6864	-0,6362
Consumo específico de madeira (CE)	-0,0645	-0,2596

Por fim, para o quarto grupo, que considerou as propriedades do carvão vegetal, a ACP revelou que os dois primeiros CP's explicaram 62% da variabilidade total dos dados (Tabela 9).

As propriedades de maior contribuição para a formação dos CP's foram a densidade relativa aparente (DRA) e a densidade a granel (DG).

**Tabela 9.** Correlação das propriedades do grupo 4 com os dois primeiros componentes principais.

<b>Propriedades</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>
Densidade relativa aparente (DRA)	<b>-0,8661</b>	-0,011
Densidade a granel (DG)	<b>-0,8908</b>	0,3405
Índice de friabilidade (IF)	-0,1128	-0,0765
Teor de cinzas do carvão vegetal (TCzC)	0,7467	0,2357
Teor de materiais voláteis do carvão vegetal (TMVC)	-0,505	0,6674
Teor de carbono fixo do carvão vegetal (TCFC)	0,0999	-0,8436
Poder calorífico superior do carvão vegetal (PCSC)	-0,2298	-0,6898
Densidade energética do carvão vegetal (DEC)	-0,907	-0,1857
Eficiência energética da carbonização (EEC)	-0,3745	-0,544

Após realizar a seleção prévia das propriedades da madeira, baseada na divisão de grupo de propriedades e escolha daquelas que mais contribuíram para separação dos genótipos por características comuns e colaborativas para produção de carvão vegetal, as seguintes propriedades foram selecionadas para a composição da ACP: DBM, PCa, THol e TCF, da madeira, e RGCV, DRA e DG, do carvão vegetal.

Uma nova ACP foi realizada baseada apenas nestas sete propriedades selecionadas, revelando que os dois primeiros CP's explicaram 81% da variabilidade total dos dados (Tabela 10).

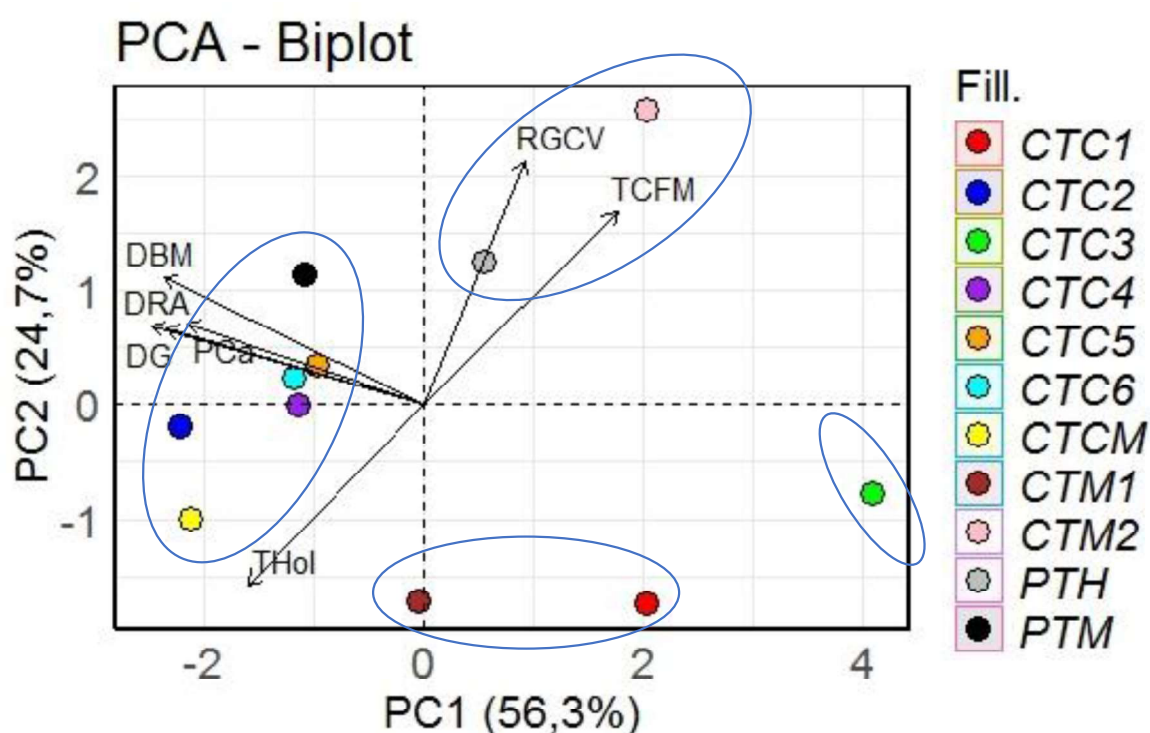
Por esta nova ACP, as propriedades que mais contribuíram para a formação dos dois componentes principais foram a DBM, DRA, DG e o RGCV.

**Tabela 10.** Correlação das propriedades da madeira e do carvão vegetal com os dois primeiros componentes principais.

<b>Propriedades</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>
Densidade básica da madeira (DBM)	<b>-0,8836</b>	0,4138
Porcentagem de casca (PCa)	-0,802	0,2643

Teor de holocelulose (THol.)	-0,598	-0,5864
Teor de carbono fixo da madeira (TCFM)	0,654	0,6269
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV)	0,34	<b>0,7913</b>
Densidade relativa aparente (DRA)	<b>-0,9233</b>	0,2556
Densidade a granel (DG)	<b>-0,874</b>	0,2472

Os genótipos de *Corymbia* foram divididos em quatro grupos distintos e a dispersão dos escores obtidos pelos componentes principais está apresentada na Figura 24.



**Figura 24.** Correlações das propriedades e escores dos componentes principais.

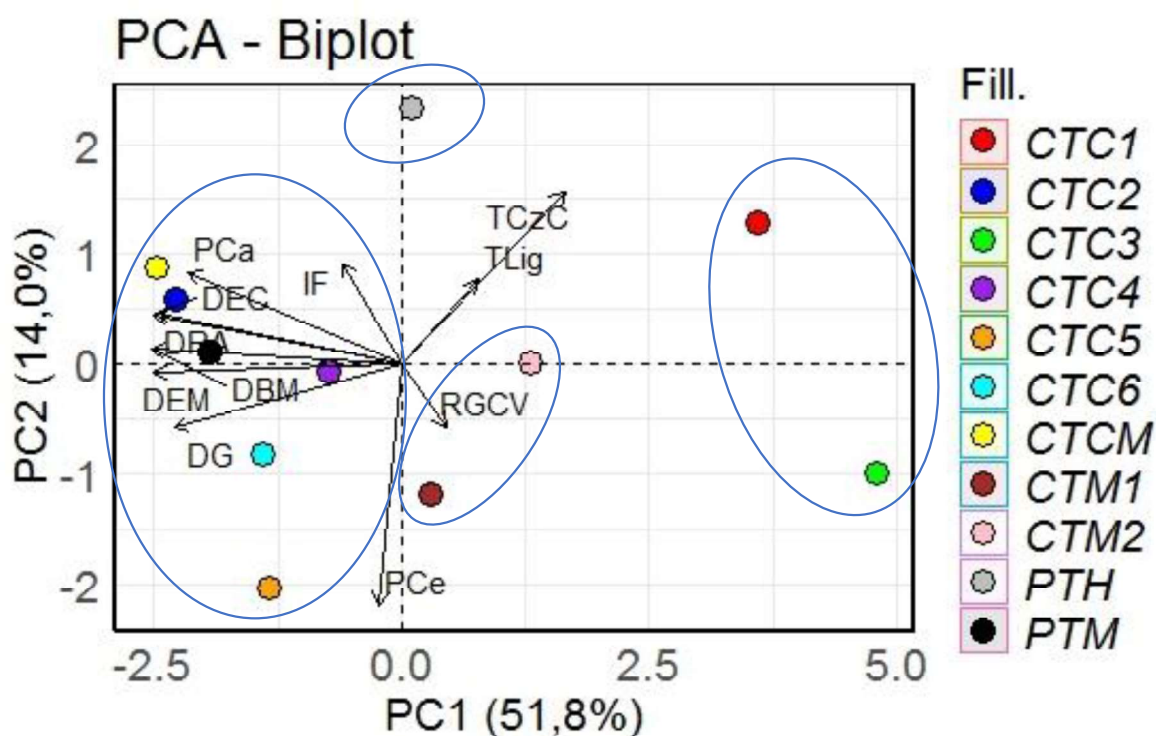
Por fim, ao analisar a ACP com os dados da matriz de importância, os dois primeiros CP's explicaram 66% da variabilidade total dos dados (Tabela 11).

As propriedades que mais contribuíram para a formação dos CP's foram a densidade da madeira, a densidade relativa aparente e a granel do carvão e a densidade energética da madeira e do carvão.

**Tabela 11.** Correlação das propriedades da matriz de importância com os dois primeiros componentes principais.

Propriedades	CP1	CP2
Densidade básica da madeira (DBM)	<b>-0,9658</b>	-0,0489
Porcentagem de casca (PCa)	-0,8272	-0,321
Porcentagem de cerne (PCe)	-0,058	0,8428
Teor de lignina total (TLig)	0,2969	-0,2936
Densidade energética da madeira (DEM)	-0,955	0,0303
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV)	0,1746	0,2194
Densidade relativa aparente (DRA)	<b>-0,9592</b>	-0,1676
Densidade a granel (DG)	<b>-0,8795</b>	0,2222
Índice de friabilidade (IF)	-0,2248	-0,3509
Teor de cinzas do carvão vegetal (TCzC)	0,6295	-0,5979
Densidade energética do carvão vegetal (DEC)	<b>-0,9511</b>	-0,1775

Os genótipos de *Corymbia* foram divididos em quatro grupos distintos e a dispersão dos escores obtidos pelos componentes principais está apresentada na Figura 25.



**Figura 25.** Correlações das propriedades e escores dos componentes principais.

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1. Efeito do genótipo sobre as propriedades da madeira

#### 6.1.1. Densidade básica da madeira (DBM) e da casca (DBC)

A indústria siderúrgica com base no carvão vegetal deseja a utilização de madeira de densidade superior a  $500 \text{ kg m}^{-3}$ . Essa faixa de densidade é desejável pelas empresas do setor, pois garante a produção de carvão vegetal com densidade superior (RAMOS et al., 2023). Com base neste critério de faixa de densidade, a maioria dos genótipos avaliados podem ser indicados para a produção de carvão vegetal. Os clones CTC1 e CTC3, apesar de terem densidade baixo de  $500 \text{ kg m}^{-3}$ , poderão ser utilizados para a produção de carvão vegetal em idades mais avançadas, considerado o incremento de densidade com o aumento da idade.

Altos valores de densidade da madeira são desejáveis para a produção de carvão vegetal, pois aumentam a quantidade de madeira enfiada, otimizando a produtividade dos fornos de alvenaria e a eficiência do processo de carbonização. Além disso, resultam em carvão vegetal mais denso e de maior resistência mecânica (BRITO, 1993). Juntos, estes fatores contribuem para a produção de carvão de melhor qualidade e para a redução dos custos nas unidades de produção de carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2015).

Os resultados mostram uma diferença de  $147 \text{ kg m}^{-3}$  entre os genótipos de maior e menor densidade, ambos provenientes do cruzamento entre *C. torelliana* e *C. citriodora*, indicando ampla variabilidade genética, particularmente porque a madeira produzida entre 3 e 4 anos apresenta apenas características juvenis.

Estes resultados são importantes para o programa de melhoramento genético das empresas, sugerindo potencial para seleção de genótipos de maior produtividade de biomassa para carvão vegetal e outras aplicações energéticas. A densidade da madeira é uma característica ideal para manipulação genética devido à sua considerável variação entre árvores, alta herdabilidade e baixa interação genótipo x ambiente (BRAWNER et al., 2012).

Notavelmente, a progênie de PTM (*C. torelliana* x *C. maculata*), pertencente ao grupo 2, apresenta densidade maior que os clones resultantes do mesmo cruzamento, indicando que esta progênie pode ter sido formada através de um cruzamento envolvendo espécies com maior densidade em comparação com aquelas envolvidas na formação dos clones. Conseqüentemente, esses resultados sugerem que a

progênie deve ser priorizada para plantio comercial em relação aos clones, principalmente quando se considera a densidade da madeira como parâmetro de seleção.

Comparando os resultados de densidade da madeira deste estudo com outros genótipos de *Corymbia*, os resultados indicam valores de densidade compatíveis aos reportados por Loureiro et al. (2019), para clones de *C. citriodora* x *C. torelliana* e *C. torelliana* x *C. citriodora*, aos 3,8 anos de idade, cuja variação foi de 641 a 506 kg m<sup>-3</sup>. Além disso, os resultados são próximos aos encontrados por Massuque et al. (2023) para a madeira de espécies puras de *C. citriodora*, *C. henryi* e *C. variegata*, aos 6 anos de idade, onde o maior valor de densidade foi de 662 kg m<sup>-3</sup>.

É fundamental comparar a densidade de *Corymbia* com os valores reportados para *Eucalyptus*, dada a importância das espécies deste gênero como a principal fonte de matéria-prima para a produção de carvão vegetal. De fato, os genótipos de *Corymbia* deste estudo apresentam faixa de densidade superior à dos clones de *Eucalyptus* mais plantados no Brasil, como *E. urophylla*, aos 6,8 anos de idade, cujo valor de densidade foi de 456 kg m<sup>-3</sup>, segundo Protásio et al. (2021b).

#### 6.1.2. Propriedades macroscópicas da casca e do lenho

A avaliação das características da casca é importante, uma vez que os resíduos da casca influenciam significativamente nos processos de produção industrial e na qualidade final do carvão vegetal (FOELKEL, 2010). O fósforo encontrado na casca pode integrar-se ao carvão vegetal, causando rachaduras e fissuras nas ligas metálicas, tornando-as impróprias para determinados materiais devido à redução da resistência mecânica (VITAL et al., 1989).

O estudo da densidade da casca é importante para a indústria siderúrgica devido ao seu impacto direto nos custos de transporte e na qualidade do carvão vegetal. Maior densidade da casca resulta em maior massa de casca aderida à madeira a ser transportada do campo até a indústria, principalmente porque muitas empresas siderúrgicas não removem a casca do tronco das árvores.

Conseqüentemente, os custos de transporte, incluindo o consumo de combustível, aumentam, levando ao aumento dos custos finais do carvão vegetal. Além disso, maior proporção de casca será introduzida nos fornos de alvenaria das

unidades de produção de carvão vegetal, comprometendo potencialmente a qualidade do carvão vegetal.

Os valores de densidade da casca dos genótipos de *Corymbia* avaliados estão de acordo com aqueles relatados para *Eucalyptus*, cuja variação é de 374 a 454 kg m<sup>-3</sup> (QUILHÓ & PEREIRA, 2001). Entretanto, alguns estudos relatam valores inferiores a 374 kg m<sup>-3</sup>. Por exemplo, Rocha et al. (2016) encontraram densidade da casca de 300 kg m<sup>-3</sup> em híbridos comerciais de *Eucalyptus* aos 7 anos de idade.

Vale ressaltar que há um número limitado de estudos avaliando a densidade da casca do gênero *Corymbia*. Dentre as pesquisas disponíveis, os valores de densidade variam de 301 kg m<sup>-3</sup> em um híbrido de *C. citriodora* x *C. torelliana* com 1 ano de idade (LOPES et al., 2017) a 415 kg m<sup>-3</sup> em um híbrido de *C. torelliana* x *C. citriodora* aos 7 anos (ROCHA et al., 2024).

A espessura e porcentagem da casca são fatores igualmente importantes, já que a casca mais espessa impacta diretamente em maior volume de casca no fuste das árvores. Consequentemente, o volume de madeira disponível no interior dos fornos de alvenaria diminui.

Esta característica indesejável tem sido relatada em outros estudos para o gênero *Corymbia*, incluindo *C. citriodora* subsp. *variegata*, *C. maculata* e *C. henryi* aos 3 anos de idade, onde a porcentagem de casca variou de 16,5 a 14% (SILVA et al., 2022). Da mesma forma, em outro estudo com *C. subsp. citriodora*, *C. subsp. variegata*, *C. henryi* e *C. torelliana* aos 6 anos, Melo et al. (2024) relataram valores de espessura da casca de até 0,69 cm. Os mesmos autores relataram valores de porcentagem de casca de 23,2%, confirmando a influência negativa da espessura da casca no volume final da madeira.

A redução do volume final da casca representa um desafio relevante para os programas de melhoramento genético de *Corymbia*. No entanto, isto pode ser alcançado a partir da seleção genética, justificada pela considerável variabilidade da casca dentro das espécies do gênero. Vale ressaltar que, embora a casca dos genótipos de *Corymbia* se desprenda mais facilmente do tronco, em comparação com a madeira de *Eucalyptus*, nem todo o volume da casca é incorporado aos fornos de alvenaria, pois uma parte é perdida durante a colheita e transporte da madeira.

Castro (2014), quantificando as perdas de resíduos florestais da colheita e resíduos da carbonização de clones de *E. urophylla* x *E. grandis*, relataram que a

perda total de casca do corte até o enforamento é de 25,7%, considerando as etapas de corte, extração e secagem da madeira (10,6%), transporte até o empilhamento (5,4%), e as perdas de carregamento até o interior dos fornos (9,7%).

A porcentagem de cerne é um parâmetro importante para avaliação da qualidade da madeira na indústria siderúrgica de carvão vegetal, mas muitas vezes é desconsiderado na seleção de genótipos superiores.

Para a produção de carvão vegetal, é preferível menor porcentagem de cerne, particularmente quando se utiliza madeira jovem. Isto se deve à redução do tempo necessário para a secagem da madeira (volatilização de vapor d'água e gases) na fase inicial de carbonização, atribuída ao maior teor de alburno (EL-JUHANY, 2011).

As características anatômicas do cerne, caracterizadas por elementos de menor permeabilidade, causada pela impregnação por tiloses, atrasam o processo de conversão da madeira em carvão vegetal por diminuírem a liberação de água e de gases durante a etapa de secagem da madeira nos fornos de alvenaria (SANTOS et al., 2013).

Além disso, a maior porcentagem de cerne contribui significativamente para a geração de finos, pois as dificuldades na liberação de água e gases durante a carbonização resultam em rachaduras e fissuras, produzindo carvão de menor granulometria e resistência mecânica reduzida (ROCHA et al., 2024).

A menor geração de finos resultante da menor porcentagem de cerne na madeira de *Corymbia* impacta positivamente no aumento da resistência mecânica e do rendimento em carvão vegetal. Além disso, a madeira de *Corymbia* tende a secar mais rapidamente e requer menos tempo de armazenamento nas unidades de produção de carvão vegetal devido a menor porcentagem de cerne, levando à produção de maior volume de madeira disponível para carbonização em períodos de tempo mais curtos (ROCHA et al., 2024).

Comparativamente, a madeira de *Corymbia* apresenta menos cerne em relação ao *Eucalyptus*, como visto na madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 4,5 anos (5,9 a 28,5%), conforme Santos et al. (2021). Melo et al. (2024), ao avaliar a madeira de *C. subsp. citriodora*, *C. subsp. variegata*, *C. henryi* e *C. torelliana* aos 6 anos, reportaram valores de porcentagem de cerne variando de 19,2 a 16,3%, comprovando a menor porcentagem em relação ao *Eucalyptus*.

### 6.1.3. Anatomia descritiva dos vasos e das fibras

A configuração anatômica da madeira tem importante influência na produção de carvão vegetal, de modo que se esperam fibras mais espessas e com maior fração de parede e menor área ocupada por vasos para que a madeira possa ser de maior densidade e, conseqüentemente, o carvão vegetal de maior densidade (OLIVEIRA et al., 2023).

Quando o uso da madeira for destinado à produção de carvão vegetal, os vasos devem apresentar o menor diâmetro e frequência possível para que a maior parte da madeira seja ocupada por massa e não por espaços vazios, aumentando o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (PEREIRA et al., 2016).

Segundo Paula (2005), madeiras ricas em fibras e com alta fração de parede, são de qualidade desejável para múltiplas aplicações energéticas, como etanol, coque metalúrgico, lenha e carvão vegetal, pois apresentam maior massa para manter a degradação térmica da madeira, favorecendo o rendimento e a qualidade final do carvão vegetal.

De modo geral, os elementos anatômicos da madeira de *Corymbia* apresentam dimensões diferentes em comparação com a madeira de *Eucalyptus* na idade de corte ( $\geq 7$  anos). A madeira do gênero *Corymbia* apresenta, em geral, vasos de menor diâmetro e maior frequência e fibras de menor comprimento, largura e diâmetro do lúmen das fibras, e maior espessura da parede (PEREIRA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2024).

Essas diferenças na anatomia da madeira de *Corymbia*, principalmente nas dimensões das fibras, podem explicar a maior densidade quando comparada à madeira de *Eucalyptus*, e porque esses genótipos provavelmente produzirão carvão vegetal de maior densidade e conseqüentemente de melhor qualidade para a indústria siderúrgica.

As mesmas diferenças anatômicas foram relatadas por Rocha et al. (2024) para a madeira de quatro clones de *C. citriodora* x *C. torelliana* e *C. torelliana* x *C. citriodora* em comparação com um clone de *E. urophylla*, confirmando as diferenças na anatomia da madeira entre os gêneros.

#### 6.1.4. Composição química estrutural e não estrutural

Para melhor discutir essas informações, foi elaborada uma tabela contendo alguns resultados importantes (Tabela 4) da literatura que fornece uma comparação da composição imediata e estrutural entre a madeira de *Corymbia* e de *Eucalyptus*.

Em relação a composição química estrutural/não estrutural, os genótipos de *Corymbia* avaliados apresentaram maior teor de extrativos em comparação à madeira de *Eucalyptus*, mesmo em idades mais jovens. Em termos de produção de carvão vegetal, elevados teores de extrativos, particularmente os de natureza fenólica, têm o potencial de aumentar o poder calorífico e o carbono fixo, aumentando assim o rendimento em carvão vegetal (POLETTTO, 2016).

A característica de maior teor de extrativos na madeira de *Corymbia* está associada a uma vantagem adaptativa do gênero, ou seja, a sua elevada resistência a estresses bióticos e abióticos, principalmente à seca, o que resulta na maior produção e acumulação destas substâncias na madeira (LEE, 2007).

Os extrativos da madeira desempenham o papel de defesa das plantas contra estresses ambientais ao se acumularem nos tecidos vegetais e atuarem como antioxidantes, protegendo as células contra o estresse oxidativo induzido pelas espécies reativas do oxigênio (ERO's) (ALMEIDA et al., 2022).

A resistência das espécies de *Corymbia* ao déficit hídrico confere uma vantagem ambiental significativa, pois permite que a silvicultura com espécies do gênero possa ser expandida para regiões que sofrem com o déficit hídrico. Ao se desenvolverem nessas condições, as espécies de *Corymbia* contribuem para a sustentabilidade da silvicultura nestas áreas, oferecendo benefícios econômicos e ecológicos.

Ao contrário do teor de extrativos, a madeira de *Corymbia* geralmente apresenta menor teor de lignina em comparação com a madeira de *Eucalyptus*. O teor mínimo de lignina deve ser de, pelo menos, 28% para garantir rendimento em carvão vegetal acima de 30% (RAMOS et al., 2023). Elevados teores de lignina são desejáveis pois a lignina é um parâmetro indispensável para a seleção de genótipos destinados à produção de carvão vegetal.

A lignina é o principal componente estrutural da madeira, possuindo elevada resistência térmica. Consequentemente, a madeira com maior teor de lignina tende a

produzir carvão de maior rendimento, tornando-se um fator crítico na otimização dos processos de produção de carvão (YANG et al., 2007).

A presença de holocelulose na madeira de *Corymbia* tende a ser maior do que na madeira de *Eucalyptus*. A holocelulose constitui uma fração substancial da madeira, abrangendo componentes estruturais como a celulose e as hemiceluloses que apresentam um perfil relativamente instável termicamente e menos resistente termicamente, tornando-os suscetíveis a maior degradação durante o processo de carbonização.

Portanto, o alto teor de holocelulose é indesejável para a produção de carvão vegetal devido à sua contribuição para a instabilidade térmica, comprometendo potencialmente a qualidade e o rendimento em carvão vegetal (TRUGILHO et al., 2015).

#### 6.1.5. Composição química imediata

Em termos de composição química imediata, os genótipos avaliados neste estudo apresentaram valores de cinzas abaixo de 1%. O elevado teor de cinzas pode impactar negativamente o poder calorífico da madeira e levar a problemas como formação de incrustações, corrosão e entupimento de equipamentos durante a carbonização, comprometendo a qualidade final do carvão vegetal (VIEIRA et al., 2013).

Quanto ao teor de voláteis, a madeira de *Corymbia* apresentou valores médios superiores à madeira de *Eucalyptus*. O alto teor de voláteis da madeira é indesejável para a produção de carvão vegetal pois diminui o teor de carbono fixo e aumenta a reatividade da carbonização (LUBWAMA et al., 2021).

Contudo, o teor de carbono fixo de *Corymbia* apresentou valores inferiores aos encontrados para a madeira de *Eucalyptus*. O teor de carbono fixo na madeira representa o potencial energético da madeira, pois o carbono está fortemente relacionado com os valores de lignina e poder calorífico e com a queima mais lenta da madeira.

Isso resulta em maior resistência térmica da madeira e maior carbono fixado durante a carbonização (CARNEIRO et al., 2016). Os baixos valores encontrados neste estudo são explicados pelos baixos valores de lignina, já que há correlação significativa entre ambos.

#### 6.1.6. Avaliações energéticas

O poder calorífico superior e inferior não apresentaram diferença significativa entre os genótipos avaliados.

Apesar de não haver efeito significativo, o poder calorífico da madeira é um parâmetro indispensável para os estudos de qualidade da madeira para uso energético. Primeiro, é um parâmetro importante para a avaliação da performance energética da madeira durante o processo de carbonização, e segundo é um parâmetro utilizado para a estimativa de outros parâmetros, como a densidade energética e a eficiência energética da carbonização.

Neste estudo, a densidade energética da madeira, ao contrário do poder calorífico, apresentou variação significativa entre os genótipos avaliados, o que se deve ao fato desta propriedade considerar, além do poder calorífico, a densidade da madeira, cuja variação foi significativa.

Os valores de poder calorífico superior e inferior e de densidade energética dos genótipos de *Corymbia* neste estudo estão de acordo com o observado na literatura para a madeira de *Eucalyptus* (Tabela 4). Estes parâmetros são indispensáveis para a avaliação da quantidade de energia disponível por volume de madeira na forma de calor, refletindo o potencial energético geral da madeira (JESUS et al., 2017).

Fatores como a composição química da madeira, particularmente o teor de extrativos e de lignina, assim como a densidade da madeira, influenciam tais parâmetros. Elevados valores de poder calorífico e densidade energética são desejáveis pela indústria siderúrgica, uma vez que resultarão em carvão vegetal com maior capacidade de gerar calor e, conseqüentemente, maior eficiência energética (PERES et al., 2019).

**Tabela 4.** Composição química imediata, não estrutural e estrutural da madeira de *Corymbia* e outros genótipos de *Eucalyptus* utilizados para fins energéticos.

Genótipo	Idade	TCz	TMV	TCF	TExt.	T Lig.	THol.	PCS	PCI	DE	Referência
<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	2,8	0,63			3,10	29,62	66,65				Santana et al. (2012)
	4	0,42			3,27	28,20	68,13				
<i>E. urophylla</i>	3				2,37	32,23	65,41	19,00			Castro et al. (2016)
	4				4,08	31,46	64,46	19,47			
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	3				4,02	32,04	63,93	19,19			Protásio et al. (2014)
	4				3,50	31,63	64,87	19,33			
<i>Eucalyptus</i> spp.	3,8	0,53				27,0	69,35			8,4	Protásio et al. (2019)
	4,8	0,23				31,0	62,5			9,83	
<i>Eucalyptus</i> spp. (clones)	6,8	0,1-0,3	81,6- 84	15,8- 18,2	0,7- 2,6	27,1- 32,6		19,05- 19,68	17,66- 18,27		
<i>E. camaldulensis</i>		0,16			4,30	30,29	65,25				
<i>E. grandis</i> (híbrido)	7,5	0,12			4,15	29,82	65,90				Pereira et al. (2012)
<b>*Corymbia</b>	3-4	0,64	85,13	14,23	8,00	23,94	65,43	19,26	18,02	10,83	Este estudo

Onde: Idade (anos); TCz, TMV, TCF, TExt. T Lig., e THol. (% base seca); PCS e PCI (MJ kg<sup>-3</sup>), e DE (GJ m<sup>-3</sup>). \*Valores médios entre todos os genótipos de *Corymbia*.

### 6.1.7. Decomposição termogravimétrica

Os resultados das curvas termogravimétricas sugerem que o clone CTC6 apresenta a maior resistência térmica, enquanto que o clone CTC2 tem a menor resistência entre todos os genótipos avaliados, considerando a massa residual.

O clone CTC6 (*C. torelliana* x *C. citriodora*) foi o genótipo de maior resistência térmica, o que provavelmente está relacionado aos seus valores de carbono fixo (14,5%), enquanto que o clone CTC2 é o material de menor valor de carbono fixo (13,3%), apesar de não haver relação significativa entre teor de carbono fixo e massa residual neste estudo.

Coincidentemente, o clone CTC2 é o genótipo de maior densidade da madeira entre os materiais avaliados, demonstrando que durante a decomposição termogravimétrica da madeira, a sua composição química é o aspecto mais relevante para a sua resistência térmica.

De fato, segundo afirma Pereira et al. (2016), madeiras com maiores teores de carbono fixo apresentam queima mais lenta, o que implica em maior tempo de residência dentro dos aparelhos de queima, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo.

Outra provável explicação se daria pelo teor de lignina, no entanto ambos os clones apresentam valores muito próximos (25,7 e 26,2%, respectivamente), o que não justificaria comportamento termogravimétrico tão variável.

De modo geral, os perfis de degradação térmica da madeira dos genótipos avaliados apresentam pequenas variações nas temperaturas de degradação térmica, sendo identificadas três zonas distintas:

A primeira zona de degradação térmica da madeira, que ocorre entre as temperaturas de 80 a 200 °C, é conhecida como a zona de estabilidade térmica da madeira, cuja perda de massa é de cerca de 8%. Nesta zona ocorre a evaporação da água, em 100 °C, e a volatilização dos extrativos, em até 200 °C (OLIVEIRA et al., 2023).

A segunda zona de degradação térmica da madeira ocorre entre 200 e 350 °C, que corresponde principalmente à degradação das hemiceluloses, e entre 290 e 400 °C, que corresponde principalmente à degradação da celulose (OLIVEIRA et al., 2023). Nesta zona ocorre a maior perda de massa, em torno de 70%, relacionada principalmente à degradação das holoceluloses, entre 250 e 400 °C, com um pico

mais intenso e acentuado em aproximadamente 350 °C. De fato, os valores médios de holocelulose foram próximos de 69% (OLIVEIRA et al., 2023).

O pico menos acentuado corresponde à maior degradação das hemiceluloses, cuja zona média de degradação ocorreu entre 220 e 300 °C, e está relacionada a uma taxa de perda de massa de aproximadamente 15%. O pico mais intenso correspondente à variação máxima de degradação da celulose ocorreu entre as temperaturas de 315 e 400 °C (OLIVEIRA et al., 2023).

Por fim, na faixa de 400 a 700 °C, ocorreu a degradação térmica mais pronunciada da lignina (YANG et al., 2007), com taxa de perda de massa de aproximadamente 15%. Na faixa de 250 a 400 °C é observado que o clone CTC2 apresenta um pico de degradação mais intenso, justificando a sua maior perda de massa e conseqüente menor resistência térmica. Ao contrário, o clone CTC6, de maior resistência térmica, tem um pico menos intenso na mesma faixa de temperatura.

De modo geral, todas os genótipos avaliados se comportaram de forma muito similar em termos de graduação térmico, não sendo possível nem indicar um clone de maior potencial, com maior resíduo de lignina ao final, nem mesmo clones ruins com elevada degradação térmica e baixo resíduo.

#### 6.1.8. Grupos químicos funcionais

A primeira banda larga dos espectros de FTIR está localizada em 3340  $\text{cm}^{-1}$ , associada à absorção do estiramento da ligação O-H, provavelmente da celulose (KWON et al., 2013). A segunda banda, situada em 2920  $\text{cm}^{-1}$ , corresponde ao estiramento assimétrico da ligação C-H, também provavelmente da celulose.

A banda em 1733  $\text{cm}^{-1}$  representa o estiramento da ligação C=O em cetona, carbonila e grupos alifáticos não conjugados encontrados em hemiceluloses e lignina (HUANG et al., 2008).

Entre 1593 e 1503  $\text{cm}^{-1}$  os picos correspondem a grupos esqueléticos aromáticos não conjugados na lignina. Picos em 1485 e 1422  $\text{cm}^{-1}$  são atribuídos à deformação angular no plano, assimétrica e simétrica da ligação C-H na lignina e carboidratos (KWON et al., 2013).

Picos em 1372 e 1319  $\text{cm}^{-1}$  representam a deformação angular no plano simétrica, da ligação C-H, e a deformação angular no plano simétrica, da ligação O-

H, respectivamente, presentes na celulose, hemicelulose e lignina (HUANG et al., 2008).

As bandas em 1232, 1153, 1031 e 899  $\text{cm}^{-1}$  correspondem ao anel siringila e ao estiramento de C-O na lignina e xilana, à vibração C-O-C na celulose e hemiceluloses, ao estiramento de C-O na celulose e hemiceluloses, e ao estiramento de C-O-C na celulose, respectivamente (SCHWANNINGER et al., 2004).

O clone CTC4 possui picos mais intensos nas bandas de 3340, 2920, 1372, 1319, 1153 e 1031, enquanto que o clone CTM2 apresenta picos mais acentuados nas bandas de 1733, 1593, 1485, 1503, 1422, 1232 e 899. Esse comportamento indica que os respectivos clones devem apresentar os grupos orgânicos correspondentes a cada banda em maior intensidade em relação aos demais genótipos.

O clone CTC3 apresenta picos de menor intensidade em praticamente todas as bandas destacadas, indicando que este genótipo deve ter baixa presença dos grupos orgânicos identificados pela análise de FTIR.

#### 6.1.9. Cristalinidade da celulose

Conforme observado nos perfis de difração de raios X (DRX), um halo de menor intensidade foi observado em  $2\theta=15,7^\circ$ , correspondendo ao plano cristalográfico (110). O segundo pico de maior intensidade ocorre em  $2\theta=21,9^\circ$ , correspondendo ao plano cristalográfico (002), indicando uma maior quantidade de material cristalino nesta posição. Um terceiro pico, menos intenso e imperceptível, pode ser visto em  $2\theta=34,7^\circ$ , correspondendo ao plano cristalográfico (040) (MELO et al., 2022).

As regiões cristalinas da celulose são caracterizadas por apresentar alta estabilidade molecular por estarem arranjadas de forma organizada, enquanto que as regiões amorfas são altamente instáveis devido ao desarranjo molecular (YANG et al., 2007).

O índice de cristalinidade é considerado um parâmetro importante para a classificação e seleção de materiais genéticos visando à produção de carvão vegetal, uma vez que as ligações intermoleculares de hidrogênio presentes nas regiões cristalinas da celulose contribuem para o aumento da estabilidade térmica da madeira e, conseqüentemente, para o aumento do rendimento em carvão vegetal (PEREIRA et al., 2013).

Os valores de cristalinidade deste estudo são inferiores aos 69% encontrados por Oliveira et al. (2023) para a madeira de um clone de *C. torelliana* x *C. citriodora*

aos 4 anos de idade, e por Pereira et al. (2012), cujos valores variaram até 70% para a madeira de clones de *Eucalyptus* spp. aos 7,5 anos de idade.

## 6.2. Balanços da carbonização e consumo específico de madeira

Os valores de rendimento em carvão vegetal produzido a partir da madeira dos genótipos de *Corymbia* estão de acordo com o intervalo de valores comumente observados na literatura para espécies do gênero *Eucalyptus* em idades iguais e/ou superiores (FIALHO et al., 2022; RAMOS et al., 2023).

Em comparação a materiais genéticos de *Corymbia* já estudados, os valores deste estudo são comparáveis aos encontrados por Loureiro et al. (2021), que, ao avaliar clones de *C. citriodora* x *C. torelliana* e *C. torelliana* x *C. citriodora*, todos aos 6,5 anos de idade, reportaram valores de 32,6 a 34,1%. Massuque et al. (2023), avaliando espécies puras de *Corymbia*, aos 6 anos de idade, encontraram valores de 33,5% (*C. citriodora*), 32,4% (*C. henryi*), 34,7% (*C. torelliana*) e 32,7% (*C. variegata*).

Para aplicações nas indústrias do setor siderúrgico à base de carvão vegetal, são desejados valores superiores a 30% de rendimento em carvão vegetal, o que garante melhor aproveitamento da matéria prima e, conseqüentemente, maior produção de energia e menores rendimentos em subprodutos (LOUREIRO et al., 2019).

Ao final da carbonização, quanto maior o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, maior será a eficiência do processo, uma vez que menores valores de rendimentos em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis serão produzidos (ASSIS et al., 2012). Logo, o objetivo é alcançar maior rendimento em carvão vegetal em detrimento das outras frações resultantes (ASSIS et al., 2016).

Os valores médios de RGLP e RGNC encontrados para os genótipos de *Corymbia* estudados variaram de 42,3 a 48,7%, e de 17,9 a 24,4%, respectivamente, semelhante à variação de clones de *C. citriodora* x *C. torelliana* e *C. torelliana* x *C. citriodora* (42,0 a 46,9%, e de 20,1 a 25,0%, respectivamente), conforme Loureiro et al. (2021).

Em relação ao RGCF, uma variável que explica a quantidade de carbono fixo retida no carvão vegetal após o processo de carbonização, os valores médios obtidos neste trabalho são considerados inferiores aos encontrados para clones de *Eucalyptus* cuja variação foi de 24,4 a 26,1% (NEVES et al., 2011). Os menores valores de RGCF dos genótipos de *Corymbia* deste estudo (19,8 a 21,2%) se explicam

pelo fato da curva de carbonização adotada não ter sido suficiente para aumentar os valores de carbono fixo.

O consumo específico indica a quantidade de madeira necessária para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal, sendo que quanto maior o seu valor menos eficiente será o material genético e maior o custo de produção do biorredutor. Além disso, o menor consumo específico indica menor volume de madeira a ser transportada e armazenada nos pátios das unidades de produção de carvão vegetal, o que reduz os custos operacionais de produção.

A forte correlação verificada entre o consumo específico e a densidade da madeira indica que madeiras mais densas são preferíveis para a indústria siderúrgica por simultaneamente aumentarem a densidade do carvão vegetal e diminuírem o consumo de madeira nos fornos de carbonização (RAMOS et al., 2019).

### **6.3. Caracterização do carvão vegetal**

#### **6.3.1. Densidades relativa aparente (DRA) e densidade a granel (DG)**

A densidade do carvão é um importante parâmetro a ser considerado para a destinação do carvão vegetal como biorredutor na indústria siderúrgica porque quanto maior o seu valor maior será a resistência mecânica do carvão, maiores os estoques energéticos e de carbono fixo e melhor será a sua ocupação nos fornos (ABREU NETO et al., 2020). Além disso, carvões mais densos são, em geral, produzidos a partir de madeiras mais densas (PROTÁSIO et al., 2021b).

De fato, a densidade da madeira explicou 86 e 72% da variação da DRA e DG, respectivamente (Figura 19), evidenciando a forte influência do material de origem sobre a densidade do carvão produzido.

Os valores de DRA do carvão produzido a partir da madeira de *Corymbia* são superiores aos encontrados para o carvão de diversos clones de *Eucalyptus*, aos 6,8 anos de idade, cujos valores variaram de 315 a 347 kg m<sup>-3</sup> (PROTÁSIO et al., 2021b), e semelhantes a diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* cujos valores máximos atingiram 491 kg m<sup>-3</sup> (RAMOS et al., 2024).

A DG do carvão deve ser superior a 200 kg m<sup>-3</sup> para uso siderúrgico (CARNEIRO et al., 2013). Os genótipos deste estudo estão todos acima desse limite, com destaque para o clone CTC2 que excede o limite em 66 kg m<sup>-3</sup>. Os altos valores

de densidade do carvão vegetal de *Corymbia* evidenciaram a qualidade destes materiais genéticos para aplicações na indústria siderúrgica.

### 6.3.2. Índice de friabilidade

O índice de friabilidade reflete a capacidade do carvão vegetal de gerar finos quando submetido a esforços mecânicos. Este teste busca simular situações de transporte do carvão vegetal na indústria (COSTA et al., 2017). Os valores de friabilidade do carvão dos genótipos de *Corymbia* deste estudo foram inferiores aos encontrados por Ramos et al. (2023), cuja variação foi de 19 a 25% para o carvão de clones de *Eucalyptus* aos 9 e 10 anos de idade.

De acordo com a classificação proposta pelo Centro de Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) e Oliveira et al. (1982), os carvões do presente estudo são classificados como muito pouco friáveis (<10%) e pouco friáveis (10-15%), indicando alta resistência mecânica evidenciada pelo baixo percentual de finos gerados.

A utilização de carvão vegetal menos friável é desejada na produção do ferro-gusa, uma vez que o carvão está sujeito à abrasão e choques mecânicos, resultando na redução da granulometria e, dessa forma, elevando a produção de carvão menor do que 9,5 mm, considerado resíduo na produção de ferro-ligas. Os finos reduzem a permeabilidade do leito de carga no alto-forno, afetando negativamente a eficiência do processo siderúrgico (DUFOURNY et al., 2019; RAMOS et al., 2023).

### 6.3.3. Composição química imediata

Os valores de teor de carbono fixo não atendem ao intervalo considerado aceitável pela indústria siderúrgica, entre 75 e 80%, de acordo com Carneiro et al. (2013). Este limite garante o aumento de produtividade dos altos-fornos para um determinado consumo de carvão vegetal. Os valores dos genótipos de *Corymbia* deste estudo (66 a 69,3%) estavam abaixo do encontrado por Loureiro et al. (2021), cuja variação foi de 71,5 a 75,6%.

Os baixos valores de carbono observados são justificados pelo baixo teor de lignina da madeira e pela utilização de apenas uma temperatura de carbonização (450 °C), que não permite ajustar a curva de carbonização para maximizar o teor de carbono fixo.

O ideal é que o carvão vegetal apresente altos valores de carbono fixo e baixos valores de voláteis e de cinzas, o que garante a queima mais lenta do carvão e maior tempo de residência nos altos-fornos. Baixos valores de voláteis e de cinzas garantem maiores valores de poder calorífico. Valores de cinzas abaixo de 1,5% são mais apropriados ao uso siderúrgico, o que evita a redução do poder calorífico e a contaminação do ferro gusa (BRAND et al., 2015). Os valores de materiais voláteis e de cinzas excedem o intervalo encontrado para dois clones híbridos de *E. urophylla* e *C. citriodora*, aos 7 anos de idade, que variaram de 26,4 a 28,8% e de 0,51 a 1,39%, respectivamente (COUTO et al., 2015).

#### 6.3.4. Avaliações energéticas

Quanto maior o poder calorífico do carvão vegetal, menor será o consumo do reator (carbono) para uma mesma produtividade, garantindo maior quantidade de calor desprendida durante a queima total nos altos-fornos siderúrgicos (NEVES et al., 2011). Os valores encontrados para o carvão dos genótipos de *Corymbia* são satisfatórios, apesar de serem inferiores ao comumente reportado pela literatura, em torno de 30 MJ kg<sup>-1</sup>. Os menores valores de poder calorífico estão relacionados ao menor teor de carbono fixo, já que o carbono fixo é fortemente correlacionado com o poder calorífico (HUANG et al., 2009).

A densidade energética reflete a quantidade de energia contida em um determinado volume de carvão, e é considerada um bom parâmetro a ser considerado (JESUS et al., 2017). A eficiência energética da carbonização foi inferior ao encontrado para clones de *C. citriodora* x *C. torelliana* e *C. torelliana* x *C. citriodora* (LOUREIRO et al., 2021), o que está relacionado aos menores valores de poder calorífico.

#### **6.4. Avaliação das propriedades da madeira e do carvão vegetal para seleção dos genótipos de *Corymbia***

A utilização da matriz de importância se mostrou uma estratégia eficaz para a seleção de características da madeira e do carvão vegetal visando à seleção de genótipos de *Corymbia*.

Esta estratégia de seleção apresenta alta praticidade por se tratar de uma abordagem simples e de baixo custo quanto ao gerenciamento das características

escolhidas. É sabido que, durante a seleção de materiais genéticos, a escolha das características desejáveis é essencial para uma maior assertividade e indicação de uso da madeira, com base no menor tempo de resposta, maior correlação com outras propriedades e menor custo/complexidade da análise.

A primeira propriedade escolhida foi a densidade básica da madeira, uma característica indispensável para qualquer indicação de qualidade da madeira dentro das indústrias do setor florestal. A densidade indica a quantidade de matéria prima a ser utilizada para a conversão em carvão vegetal, tem impactos sobre os custos de produção e qualidade final do carvão vegetal.

Além disso, a densidade é uma característica de fácil medição, que geralmente envolve aparatos de baixo custo e fácil manipulação, e apresenta ampla variabilidade entre materiais genéticos e espécies cultivados para fins industriais. Por ser variável, a densidade tem um caráter de herdabilidade muito alto, o que é desejável pelos programas de melhoramento genético. Por todos estes motivos, a densidade recebeu o maior peso (5) utilizado no cálculo de ranqueamento dos genótipos (Tabela 4).

A porcentagem de casca e de cerne, apesar de terem influência menos importante para o processo de conversão da madeira em carvão vegetal, foram escolhidas por serem de fácil obtenção, porém com menor peso no ranqueamento (3).

O teor de lignina, propriedade química fundamental nas avaliações de qualidade da madeira, apesar de ser de média a fácil obtenção e custos, foi escolhida por ser o componente estrutural mais relevante para a resistência térmica da madeira durante a conversão termoquímica, e por este motivo, recebeu nota 4 no ranqueamento dos genótipos.

A densidade energética foi escolhida por representar simultaneamente duas propriedades de grande interesse, a densidade e o poder calorífico, e que representa a quantidade de energia que a madeira libera durante a conversão termoquímica. Por representar variáveis muito importantes, recebeu nota 4 no ranqueamento. Além disso, apresentou variação significativa na análise estatística.

Quanto às características do carvão vegetal, a densidade aparente e a granel foram escolhidas por representarem variáveis de fácil obtenção e muito importantes para as operações dentro das unidades de produção de carvão vegetal, além da importância para a qualidade final do produto. Receberam notas 5 e 4, respectivamente.

O índice de friabilidade teve sua escolha motivada pela importância da resistência mecânica do carvão vegetal para a obtenção do ferro gusa, e recebeu nota 4.

O teor de cinzas, apesar de ter impactos sobre a qualidade do ferro gusa, recebeu nota 3 por não ter importância direta e pelos maiores custos de produção.

O rendimento em carvão vegetal, mesmo não apresentando variação entre os resultados pelo teste de média, foi escolhido na matriz de importância por expressar diretamente a conversão de madeira em carvão vegetal.

O segundo critério utilizado para a elaboração da matriz de importância foram os grupos de média formados pelo teste de Scott-Knott, de modo que para o grupo 1, representado pela letra a, recebia nota 10, para características de maior interesse, e o contrário para características de menor interesse.

O terceiro critério considerou as notas atribuídas a cada característica que foi realizada de acordo com a importância prática da característica para a produção e qualidade final do carvão vegetal.

Por fim, o peso foi considerado como critério, de modo que foi dado peso maior a características de maior importância prática. Por exemplo, a densidade recebeu nota 10, enquanto que as características da casca receberam nota 3.

A nota recebida foi diretamente influenciada pelo peso atribuído à cada característica, de modo que características de maior peso receberam nota 10 para os primeiros grupos de média, enquanto que características de menor peso receberam nota 10 para os grupos subsequentes, ou seja, grupo 2, 3 ou 4.

Ao final, para o ranqueamento dos melhores genótipos, considerou-se o somatório da multiplicação entre nota e peso de cada característica, tanto para as características da madeira, quanto para do carvão vegetal, chegando a nota final para cada genótipo. A metodologia conseguiu separar os genótipos (CTC2, CTC5 e CTC6) de maiores notas (319 a 321) e mais indicados por esses critérios para produção de carvão vegetal, e os genótipos (CTC3, CTC1 e CTC4) de menores notas (212 a 269) e menos indicados por esses critérios selecionados.

Essa seleção pode ser considerada assertiva por ranquear nas primeiras posições os genótipos que apresentaram alta densidade da madeira, baixa porcentagem de casca e de cerne, teor de lignina próximo do maior valor, alta

densidade energética da madeira, elevado rendimento em carvão vegetal, alta densidade aparente e a granel, baixo índice de friabilidade, baixo teor de cinzas e alta densidade energética do carvão vegetal.

Por outro lado, nas últimas posições estão dois dos genótipos de menor densidade da madeira (clones CTC1 e CTC3), alta porcentagem de casca e de cerne, baixo teor de lignina, baixa densidade energética da madeira, baixa densidade aparente e a granel, alto teor de cinzas no carvão vegetal e baixa densidade energética do carvão vegetal.

Além da abordagem assertiva quanto à seleção das melhores características de interesse, a matriz de importância tem outro aspecto positivo que é o seu caráter de reprodutibilidade metodológica, de modo que as características da madeira e do carvão vegetal podem ser adicionadas e/ou retiradas de acordo com as necessidades e objetivos de cada estudo.

#### **6.5. Agrupamento multivariado para a seleção dos genótipos de *Corymbia***

A escolha das características da madeira e do carvão vegetal durante a análise de componentes principais é fundamental para a adequada visualização dos conjuntos de dados, de modo que a correta manipulação destas características permite uma melhor exploração das tendências e padrões de agrupamento das características e dos genótipos avaliados.

Neste estudo, foram estudadas três abordagens de escolha das características da madeira e do carvão vegetal utilizadas para a análise de agrupamento.

Primeiro, considerou-se uma abordagem mais ampla, onde todas as características da madeira, do processo de carbonização e do carvão vegetal foram utilizadas na análise. O resultado apontou que os dois primeiros componentes principais explicaram apenas 46% da variabilidade total do conjunto de dados, o que é considerado muito baixo e pouco representativo para separação/classificação dos genótipos. Em estudos cuja a seleção das características é realizada com características melhor relacionadas, os valores de explicação pelos primeiros componentes principais é superior a 70% (FIALHO et al., 2022).

Esse baixo valor está relacionado ao grande número de características avaliadas, à escolha de características altamente relacionadas, como a espessura e

porcentagem de casca, a densidade energética da madeira e do carvão vegetal, etc. e a características que não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os genótipos avaliados, o que gera a sobreposição de características e dificulta uma melhor separação dos genótipos e a interpretação dos resultados. A presença de características de pouca influência sobre a qualidade final do carvão vegetal, como a densidade da casca, é outro aspecto que torna a abordagem com todas as características avaliadas uma estratégia ineficaz.

Outro ponto importante que corrobora a baixa eficácia desta abordagem de agrupamento são os baixos valores de correlação de algumas das características da madeira e do carvão vegetal com os componentes principais, revelando a pouca influência delas para a formação de tais componentes. De fato, apenas as características de maior importância prática para a qualidade final do carvão vegetal apresentaram altos valores de correlação com os componentes principais, como a densidade básica e energética da madeira, a densidade relativa aparente, a granel e energética do carvão vegetal.

A segunda abordagem considerou uma estratégia na qual as características foram divididas em grupos de propriedades da madeira e do carvão vegetal, para seleção prévia das características com maior contribuição dentro de cada grupo, e então a seleção daquelas de maior correlação e importância prática, que foram selecionadas para a composição da análise de componentes principais.

Esta abordagem se mostrou ser a mais eficaz dentre a grande quantidade de características avaliadas, pois selecionou simultaneamente características de alta correlação com os componentes principais e grande importância prática.

Após a realização das ACPs por grupo de propriedades da madeira e do carvão vegetal, foram selecionadas sete características da madeira e do carvão vegetal. Esse grupo selecionado de características gerou uma análise de componentes principais na qual os dois primeiros componentes explicaram 81% da variabilidade total do conjunto de dados, um valor significativamente maior ao da primeira abordagem, considerado bastante elevada, tamanha diversidade de genótipos.

Esse valor mostra que quando as características são previamente selecionadas, considerando tanto o valor estatístico quanto o valor prático, o efeito estatístico da análise é notadamente superior, tornando a análise mais confiável e mais representativa dos genótipos/materiais do estudo. Logo, a seleção de materiais

genéticos quando realizada considerando características previamente selecionadas, é significativamente mais assertiva.

Os valores de correlação das propriedades com os dois primeiros componentes principais também são superiores aos encontrados pela primeira abordagem de seleção. Isso mostra que, ao selecionar adequadamente as variáveis, a análise estatística tem muito mais relação com as variáveis escolhidas e, portanto, maior valor e maior assertividade na seleção de genótipos.

Nesta abordagem, as propriedades de maior contribuição foram a densidade da madeira, a densidade relativa aparente e a granel e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, justamente características de alto valor prático para a produção e a qualidade final do carvão vegetal.

Pela análise de componentes desta abordagem, os genótipos foram divididos em quatro grupos distintos: grupo 1, formado pelo clone CTC3 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), que se agrupou separadamente pelas características de baixa densidade da madeira, alta porcentagem de casca e baixa densidade relativa aparente e a granel do carvão vegetal, sendo considerado o grupo com piores propriedades.

O grupo 2 foi formado pela progênie PTH (*C. torelliana* x *C. henryi*) e pelo clone CTM2 (*C. torelliana* x *C. maculata*), genótipos caracterizados pela baixa porcentagem de casca, alto teor de carbono fixo, baixo teor de holocelulose e alta densidade relativa aparente do carvão vegetal. Esse grupo é considerado altamente indicado para a produção de carvão vegetal, pois reúne propriedades que afetarão diretamente na eficiência de conversão da madeira em carvão vegetal.

O grupo 3, formado pelos clones CTC1 e CTM1 são caracterizados pela baixa densidade da madeira, alta porcentagem de casca, alto teor de holocelulose e baixa densidade relativa aparente e a granel do carvão vegetal. Esse grupo é considerado de baixa indicação para a produção de carvão vegetal, pois reúne propriedades que resultarão em carvão vegetal de baixa densidade e baixa resistência mecânica.

O grupo 4 reuniu a progênie PTM (*C. torelliana* x *C. maculata*) e os clones CTC2, CTC4, CTC5, CTC6 (*C. torelliana* x *C. citriodora*) e o tri clone CTCM (*C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata*). Esse grupo reúne os materiais com as melhores características da madeira e do carvão vegetal, tais como a maior densidade da madeira e alta densidade relativa aparente e a granel do carvão vegetal, sendo o

grupo de genótipos mais indicados para a produção de carvão vegetal com base neste estudo.

Por fim, a terceira abordagem considerou as características escolhidas para a composição da matriz de importância para a realização da análise de componentes principais.

Nesta abordagem, os dois primeiros componentes principais explicaram 66% da variabilidade total dos dados, um pouco inferior à explicação encontrada para a segunda abordagem (81%), considerada satisfatória e superior a primeira abordagem utilizando todas as propriedades medidas, que teve um percentual de 48% de explicação.

Isso pode estar relacionado ao fato de que as características foram escolhidas considerando apenas o seu valor prático e não o valor estatístico. O valor estatístico foi considerado apenas nas notas e por isso a diferença entre as metodologias. Esse resultado reforça a importância de se alinhar características com alta importância prática e alto valor estatístico para uma seleção de genótipos mais adequada.

Além da menor explicação dos dados, nesta abordagem os genótipos também foram divididos em quatro grupos, no entanto o agrupamento dos genótipos foi diferente dos grupos formados na segunda abordagem.

O grupo 1 foi formado apenas pela progênie PTH caracterizada pelo alto teor de lignina, alta densidade energética da madeira, alta densidade relativa aparente e baixo índice de friabilidade. Esta progênie se diferenciou do clone CTM2 do agrupamento da segunda abordagem devido à maior densidade relativa aparente, já que esta característica foi uma das que mais contribuíram para a formação dos componentes principais.

O grupo 2 foi formado pelos clones CTC1 e CTC3, ambos caracterizados pelas menores densidades básica da madeira. Esses clones não foram agrupados juntos na segunda abordagem devido à densidade energética da madeira, cuja variação é igual para ambos os clones, já que as demais, com exceção da densidade da madeira, separam os dois clones.

No grupo 3 foram reunidos os clones CTM1 e CTM2 devido às características de alta densidade energética da madeira, já que esta propriedade foi uma das que mais contribuíram para a formação dos componentes principais e não foi incluída na análise para a segunda abordagem.

Por fim, o grupo 4 foi formado pelos mesmos genótipos agrupados na segunda abordagem (PTM, CTCM, CTC2, CTC4, CTC5 e CTC6), revelando que mesmo com a adição ou retirada de alguma característica de interesse, esses genótipos se agrupam no mesmo grupo. Isso ocorreu muito provavelmente pelas características de alta densidade da madeira e alta densidade relativa aparente e a granel do carvão vegetal, o que torna o grupo de genótipos mais indicados para a produção de carvão vegetal.

## CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo indicaram que o clone CTC2 (*C. torelliana* x *C. citriodora*), o tri clone CTCM (*C. torelliana* x *C. citriodora* x *C. maculata*) e a progênie PTM (*C. torelliana* x *C. maculata*) foram os genótipos mais aptos e indicados para uso em programas de melhoramento genético voltados à produção de carvão vegetal.

Por outro lado, os clones CTC1 e CTC3, ambos provenientes do cruzamento entre *C. torelliana* e *C. citriodora*, demonstraram ser os genótipos menos indicados à produção de carvão vegetal, especialmente pela baixa densidade da madeira.

Dentre as propriedades analisadas, as que mais contribuíram para a seleção dos genótipos foram a densidade básica da madeira, a densidade relativa aparente, a densidade a granel e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, revelando a importância da qualidade da madeira de origem, especialmente da sua densidade, para a qualidade final do carvão vegetal.

Quanto às metodologias utilizadas para a seleção das propriedades e dos genótipos, a matriz de importância demonstrou-se uma ferramenta eficiente para a seleção de genótipos, destacando-se pela praticidade na escolha das propriedades e pela alta reprodutibilidade dos resultados. Já a análise de agrupamento, conduzida com base em propriedades previamente selecionadas, apresentou alta explicação da variabilidade total dos dados, evidenciando boa capacidade de agrupamento dos genótipos avaliados.

Por fim, os resultados deste estudo reforçam a importância da seleção criteriosa de propriedades tecnológicas da madeira e demonstram a viabilidade de aplicar metodologias multivariadas como ferramentas complementares na tomada de decisão para o melhoramento de espécies florestais voltadas à produção de carvão vegetal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU NETO, R. et al. Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. **SN Applied Science**, v. 2, p. 1020, 2020.

ALMEIDA, M. N. F. et al. Wood properties as potential biomarkers of physiological disorder tolerance: comparison of divergent eucalyptus genotypes. **Scientia Forestalis**, v. 50, p. e3864, 2022.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1762-84**: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 711-87**: Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. 1996.

ARAUJO, S. L. et al. Cor, grã e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Corymbia* e *Eucalyptus* não tradicionais. **Scientia Forestalis**, v. 51, p. e4029, 2023.

ASSIS, M. R. et al. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 1, n. 3, p. 1-18, 2016.

ASSIS, M. R. et al. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

ASSIS, T. F. **A hora e a vez dos híbridos *Corymbia***. Revista Opiniões. Ribeirão Preto, SP. 2013.

ASSIS, T. F. Melhoramento genético do eucalipto. **Informe Agropecuário**, v. 18, n. 185, p. 32-51, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6922**: Carvão vegetal – Ensaio físicos – Determinação da massa específica – Densidade à granel. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8633, segundo a norma 167-73 ABNT (adaptada), 1375-80**. 1983.

BARROS JUNIOR, U. O. et al. Variabilidade longitudinal e radial da cor da madeira de *Corymbia* e sua relação com a densidade e o teor de extrativos. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 13, p. 1-24, 2024.

BRAND, M. A. et al. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1165-1173, 2015.

BRAWNER, J. T. et al. Selection of *Corymbia citriodora* for pulp productivity. **Southern Forests**, v. 74, n. 2, p. 121-131.

BRITO, A. S. et al. Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of *Eucalyptus* wood. **Floresta e Ambiente**, v. 26, p. 1–9, 2019.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Circular Técnica: IPEF, Piracicaba, 1993.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, v. 46, n. 4, p. 473-480, 2016.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. (Eds.). **Bioenergia & biorrefinaria – cana-de- açúcar & espécies florestais**. 1.ed. Viçosa: Os Autores, 2013. p.429-457.

CASTRO, A. F. N. M. et al. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 551-560, 2016.

CASTRO, A. F. N. M. **Potencial dos resíduos florestais e dos gases da carbonização da madeira para geração de energia elétrica**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014. 122 p.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **COPANT**: Descripción de características generales, macroscópicas de las maderas angiospermas dicotiledóneas. v. 30, p. 1-19, 1974.

COSTA, L. J. et al. Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones de *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 629-639, 2017.

COSTA, L. J. **Relação água-carvão vegetal de eucalipto produzido em diferentes temperaturas**. 2020. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020. 107 p.

COSTA, M. M. et al. Inserção tecnológica dos clones híbridos de *Corymbia* spp. na produção de polpa celulósica – Parte 1: polpação kraft modificada lo-solids. **Boletim Técnico SIF**, v. 1, n. 8, p. 1–6, 2021.

COUTO, A. M. et al. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.

DAMACENA, M. B. et al. Melhoramento genético para redução de kino em clones híbridos de *Corymbia*. **Boletim Técnico SIF**, v. 1, p. 1–7, 2021.

DAMACENA, M. B. **Melhoramento para redução de Kino em clones híbridos de *Corymbia* sp. e *Eucalyptus* sp.** 2019. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 86 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 14918: Solid biofuels: Determination of calorific value**, 2010.

DONG, Y.; QIN, J. A novel dynamic PCA algorithm for dynamic data modeling and process monitoring. **Journal of Process Control**, v. 68, p. 1-11, 2018.

DUFOURNY, A. et al. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 137, p. 1-13, 2019.

EL-JUHANY, L. I. Evaluation of some wood quality measures of eight-year-old *Melia azedarach* trees. **Turkish Journal of Agricultural and Forestry**, v. 35, p. 165–171, 2011.

FERREIRA, D. F. **Estatística Multivariada**. Universidade Federal de Lavras, 2018, 3 ed, 624 p.

FERREIRA, E. B. et al. ExpDes: An R package for ANOVA and experimental designs. **Applied Mathematics**, v. 5, p. 2952–2958, 2014.

FIALHO, L. D. F. et al. Application of univariate and multivariate statistical analyzes in clonal selection of *Eucalyptus* spp. for charcoal production. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 3, p. 1659-1683, 2022.

FOELKEL, C. **Casca da árvore do eucalipto: Aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando a produção de celulose e papel**. Eucalyptus Online Book and Newsletter, 2010.

GARCIA, R. A. et al. Colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 509-517, 2014.

GLADYSZ, J.; KARBOWNICZEK, M. Carbon reducers for the processes of ferroalloy production in the electric furnace. In: European Electric Steelmaking Conference, 9, 2008, Krakow. **Proceedings**. Krakow: SITPH, 2008. p. 30-59.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: **Sarkanen, K.V., Ludwig, C.H. Lignins, Occurrence, Formation, Structure and Reactions**. John Wiley Sons, p. 241–298, 1971.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, v. 47, p. 36–38, 1986.

HILL, K. D.; JOHNSON, L. A. S. Systematic studies in the eucalypts 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Telopea**, Sydney, v. 6, n. 2/3, p. 185-504, 1995.

HUANG, A. et al. Distinction of three wood species by Fourier transform infrared spectroscopy and two-dimensional correlation IR spectroscopy. **Journal of Molecular Structure**. v. 883, p. 160-166, 2008.

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, v. 29, n. 6, p. 1793- 1797, 2009.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁ **Relatório Anual**. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁ. **Projeto cooperativo conserva a diversidade genética de *Eucalyptus* e *Corymbia* no Brasil**. 2024.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. 124 p.

JESUS, M. S. et al. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta**, v. 47, p. 11-16, 2017.

KWON, S. M. et al. Change of heating value, pH and FT-IR spectra of charcoal at different carbonization temperatures. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 41, n. 5, p. 440-446, 2013.

LEE, D. J. Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand 2: Development of *Corymbia* species and hybrids for plantations in eastern Australia. **Australian Forestry**, v. 70, p. 11–16, 2007.

LIN, S. Y.; HIRATO, M.; HORIO, M. The characteristics of coal char gasification at around ash melting temperature. **Energy & Fuels**, v. 8, n. 3, p. 598-606, 1994.

LOPES, E. D. et al. Influência do espaçamento de plantio na produção energética de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. **Floresta**, v. 47, p. 95–104, 2017.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. V.; BACHER, L. B. **Árvores exóticas no Brasil**: madeireiras, ornamentais e aromáticas. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 352 p.

LORENZONI, A. P. et al. Projeto Corymbia: Programa de desenvolvimento de genótipos superiores para indústria florestal. **Boletim Técnico SIF**, v. 2, n. 11, p. 1–7, 2022.

LOUREIRO, B. A. et al. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp. para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 214-232, 2021.

LOUREIRO, B. A. et al. Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas Ciencia y Tecnologia**, v. 21, p. 619–630, 2019.

LUBWAMA, M. et al. Thermal and mechanical characteristics of local firewood species and resulting charcoal produced by slow pyrolysis. **Biomass Conversion Biorefinery**, v. 13, p. 6689-6704, 2021.

MASSUQUE, J. et al. Evaluating the potential of non-commercial *Eucalyptus* spp. and *Corymbia* spp. for bioenergy in Brazil. **BioEnergy Research**, v. 16, p. 1592-1603, 2023.

MELO, A. B. et al. Productivity and wood quality traits of *Corymbia* and *Eucalyptus* species in two soil water deficit sites. **Industrial Crops and Products**, v. 219, p. 119141, 2024.

MELO, E. C. R. D. et al. Influence of silanization treatment of sponge gourd (*Luffa cylindrica*) fibers on the reinforcement of polyester composites: A brief report. **Polymers**, v. 14, n. 16, p. 3311, 2022.

MONTEIRO, T. C. et al. Efeito dos elementos anatômicos da madeira na secagem das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 115, p. 493-505, 2017.

MOUTINHO, V. H. P. et al. Characterization and statistical correlation between charcoal's physical and mechanical properties of *Eucalyptus* and *Corymbia* clones. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 1095–1103, 2017.

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, J. B. et al. **Carvão vegetal-destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade**. Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. Belo Horizonte, 173p. 1982.

OLIVEIRA, L. P. et al. Wood and charcoal quality in the selection of *Eucalyptus* spp. clones and *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* for steel industry. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4722, 2023.

PALUDZYSZYN FILHO. et al. **Base de melhoramento genético de *Eucalyptus* e *Corymbia* em Rio Verde, Goiás: Resultados parciais da cooperação técnica entre Embrapa Florestas e Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais**

**do Sudoeste Goiano – COMIGO**. Colombo, Embrapa Florestas, 2014.

PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, v. 11, p. 90–100, 2005.

PEREIRA, B. L. C. et al. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

PEREIRA, B. L. C. et al. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, B. L. C. et al. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, p. 523025, 2012.

PERES, L. C. et al. Clonal selection og *Corymbia* for energy and charcoal production. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 3, p. 749-753, 2019.

POLETTI, M. Effect of extractive content on the thermal stability of two wood species from Brazil. **Maderas Ciencia y Tecnologia**, v. 18, p. 435–442, 2016.

PROTÁSIO, T. P. **Características de crescimento, madeira e carvão para classificação de clones de *Eucalyptus* spp. visando o uso energético**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, MG. 165 p.

PROTÁSIO, T. P. et al. Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior *Eucalyptus* firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 626-641, 2019.

PROTÁSIO, T. P. et al. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 43, p. 801–816, 2015.

PROTÁSIO, T. P. et al. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34–45, 2021b.

PROTÁSIO, T. P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113-113, 2011.

PROTÁSIO, T. P. et al. Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 5, p. 4491-4508, 2021a.

PROTÁSIO, T. P. et al. Wood and charcoal quality from planted forest in Minas Gerais State, Brazil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

QUILHÓ, T.; PEREIRA, H. Within and between-tree variation of bark content and wood density of *Eucalyptus globulus* in commercial plantations. **IAWA Journal**, v. 22, p. 255–265, 2001.

QUINTILHAN, M. T. et al. Physical properties and preservative treatment of *Eucalyptus* and *Corymbia* wood. **Floresta**, v. 51, n. 2, p. 410-418, 2021.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. 2023.

RAMALHO, R. S. O uso de macerado no estudo anatômico de madeiras. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 1987.

RAMOS, D. C. et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* com idades de 108 e 120 meses. **Ciência Florestal**, v. 33, p. e48302, 2023.

RAMOS, D. C. et al. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for metallurgic use. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, e20180435, 2019.

RAMOS, R. D. et al. Influência da densidade básica e da composição química da madeira para o processo de carbonização. **Ciência Florestal**, v. 34, n. 4, e87722, 2024.

REIS, C. A. F. et al. ***Corymbia torelliana*: estado da arte de pesquisas no Brasil**. Embrapa Florestas, 2014.

RHODES, D., STEPHENS, M. Planted forest development in Australia and New Zealand: comparative trends and future opportunities. **New Zealand of Forest Science**, v. 44, n. 10, p.1-13, 2014.

ROCHA, M. F. V. et al. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 28, p. 243–248, 2016.

ROCHA, S. M. G. et al. Association between the anatomical features and the natural drying of young wood from hybrid of *Corymbia torelliana* and *Corymbia citriodora* clones. **European Journal of Wood and Wood Products**. v. 82, p. 1901-1912, 2024.

ROZEFELDS, A. C. *Eucalyptus* phylogeny and history: a brief summary. **Tasforests**, Hobart, v. 8, p. 15-26, 1996.

SANTANA, W. M. S. et al. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Cerne**, v. 18, p. 1-8, 2012.

SANTOS, A.; SIMOES, R.; TAVARES, M. Variation of some wood macroscopic properties along the stem of *Acacia melanoxylon* R. Br. adult trees in Portugal. **Forest Systems**, v. 22, p. 463–470, 2013.

SANTOS, L. M. H. et al. Variations in heartwood formation and wood density as a function of age and plant spacing in a fast-growing eucalyptus plantation. **Holzforschung**, v. 75, p. 979–988, 2021.

SANTOS, R. C. et al. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SANTOS, V. B. **Qualidade das madeiras de *Astronium fraxinifolium* Schott e *Enterolobium gummiferum* (Mart.) J.F.Macbr. para produção de carvão vegetal.** 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, Minas Gerais, MG. 65 p.

SCHWANNINGER, M. J. C. R. et al. Effects of short-time vibratory ball milling on the shape of FT-IR spectra of wood and cellulose. **Vibrational Spectroscopy**, v. 36, p. 23-40, 2004.

SEGAL, L. G. J. M. A. et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Textile Research Journal**, v. 29, n. 10, p. 786-794, 1959.

SEGURA, T. E. S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada.** 2015. Tese (Doutorado em Ciências, opção em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, São Paulo, SP. 200 p.

SILVA, P. H. M. et al. Initiation of breeding programs for three species of *Corymbia*: Introduction and provenances study. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 22, p. 1–9, 2022.

SOUZA, N. D. et al. Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 270-277, 2016.

SUOPAJARVI, H. et al. Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 709-734, 2017.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI 264 cm-97**: Preparation of wood for chemical analysis. 1997.

TEIXEIRA, V. et al. Selection of eucalyptus genotypes for charcoal production based on using multivariate analysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 179, p. 106444, 2024.

TRUGILHO, P. F. et al. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 661-666, 2015.

TRUGILHO, P. F. et al. Energia da biomassa florestal. In: GONÇALVES, F. G. LELIS, R. C. C.; ANDRADE, W. S. P. (Org.). Engenharia madeireira: pesquisa e produção. 1ªed.Seropédica: EDUR - Editora da UFRRJ, 2017, v.1, p. 175-199, 2017.

VIEIRA, R. S. et al. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcirys*. **Cerne**, v. 19, p. 59-64, 2013.

VITAL, B. R.; ANDRADE, A. M.; VALENTE, O. F. Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, v. 41–42, p. 44–49, 1989.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, p. 1781-1788, 2007.