

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DIVERGÊNCIA GENÉTICA ENTRE PROGÊNIES DE
POLINIZAÇÃO ABERTA DE *Eucalyptus tereticornis* Smith
PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL**

Marcio Roberto de Carvalho

Tecnólogo em Biocombustíveis

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DIVERGÊNCIA GENÉTICA ENTRE PROGÊNIES DE
POLINIZAÇÃO ABERTA DE *Eucalyptus tereticornis* Smith
PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL**

Marcio Roberto de Carvalho

**Orientador: Prof. Dr. Rinaldo Cesar de Paula
Coorientadora: Profa. Dra. Nádia Figueiredo de Paula**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Câmpus de Jaboticabal/SP, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas).

C331d

Carvalho, Marcio Roberto de

Divergência genética entre progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* Smith para produção de carvão vegetal / Marcio Roberto de Carvalho. -- , 2025

36 p. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal,

Orientador: Rinaldo Cesar de Paula

Coorientadora: Nádia Figueiredo de Paula

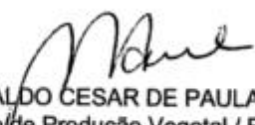
1. Bioenergia. 2. Melhoramento florestal. 3. Eucalipto. 4. Análise
multivariada. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DIVERGÊNCIA GENÉTICA ENTRE PROGÊNIES DE POLINIZAÇÃO ABERTA DE *Eucalyptus tereticornis* Smith PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

AUTOR: MARCIO ROBERTO DE CARVALHO
ORIENTADOR: RINALDO CESAR DE PAULA
COORIENTADORA: NADIA FIGUEIREDO DE PAULA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. RINALDO CESAR DE PAULA (Participação Presencial)
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal


Pesquisador Dr. MIGUEL LUIZ MENEZES FREITAS (Participação Presencial)
Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA) / São Paulo/SP


Prof. Dr. GUSTAVO VITTI MÔRO (Participação Presencial)
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 15 de dezembro de 2025.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

MARCIO ROBERTO DE CARVALHO - Nascido em 8 de maio de 1976, na cidade de Jaboticabal - SP, filho de Jaime de Carvalho e Zoraide Mitiko Kuguio de Carvalho. Em 2008, ingressou no curso de Tecnologia em Biocombustíveis na Fatec Nilo de Stéfani, em Jaboticabal - SP. Em 2011, integrou a equipe de controle de qualidade de produção de açúcar e álcool, como Analista de Laboratório, da Louis Dreyfus Commodities, unidade Jaboticabal - SP. Em 2012, ingressou como Auxiliar Docente da Fatec Nilo de Stéfani, em Jaboticabal – SP, onde atua desde então. Em 2016, iniciou como professor na Etec Bento Carlos Botelho do Amaral, e a partir de maio de 2024, passou a acumular o cargo de Coordenador de Curso, onde atua em ambos os cargos desde então. Em agosto de 2023, ingressou no curso de Pós-Graduação, nível de Mestrado, do Programa de Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias FCAV, Câmpus de Jaboticabal-SP, com orientação do Prof. Dr. Rinaldo Cesar de Paula e coorientação da Profa. Dra. Nádia Figueiredo de Paula, adotando como linha de pesquisa a divergência genética entre progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* Smith para produção de carvão vegetal.

OFEREÇO

Aos meus pais: à memória eterna de meu amado pai, Jaime de Carvalho, cuja força e carinho continuam a guiar e inspirar minha jornada; e à minha querida mãe, Zoraide Mitiko Kuguio de Carvalho, pelo amor incondicional, apoio incansável e por sempre acreditar em mim. Esta conquista é o fruto do amor e da dedicação de vocês.

Aos meus filhos: Johny, Anny, Giovanna, Mateus e Felipe; por serem a inspiração e a razão de cada esforço meu nessa trajetória.

À minha esposa Thaís, pelo apoio incondicional que deu nos vários momentos que precisei, pela compreensão, pelo incentivo constante e por compartilhar comigo os sonhos e as realidades desta jornada.

Às minhas queridas irmãs Liliana e Adriana, e meu afilhado Carlos, por estarem sempre juntos e dispostos a ajudar nos momentos que precisei.

Vocês foram a razão de cada gota de suor e lágrimas para finalizar este trabalho. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas bênçãos recebidas e por ter guiado meus passos até aqui, dando-me saúde e força para finalizar este trabalho.

Aos meus pais, Jaime de Carvalho e Zoraide Mitiko Kuguio de Carvalho, pelo amor, ajuda e incentivo em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rinaldo Cesar de Paula, e à minha coorientadora, Profa. Dra. Nádia Figueiredo de Paula, pela orientação e ensinamentos, pela paciência e por sempre estarem dispostos a ensinar.

À Fatec Nilo de Stéfani de Jaboticabal, por ceder a estrutura dos laboratórios para a realização das análises e, em especial, ao professor Leonardo Madaleno e Ana Flávia Pereira Faria, pela ajuda e incentivo no dia a dia de aulas na Unesp e análises laboratoriais.

Aos membros da banca de qualificação, Prof. Dr. Gustavo Vitti Moro e Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso, e da banca de defesa, Prof. Dr. Gustavo Vitti Moro e Prof. Dr. Miguel Luiz Menezes Freitas, por todas as contribuições e sugestões para o aperfeiçoamento do trabalho.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade de realizar o mestrado e pela infraestrutura oferecida e aos professores, por contribuírem com excelência para minha formação acadêmica.

À todas as pessoas que direta ou indiretamente participaram da minha vida acadêmica até aqui, pelo incentivo e pelos momentos que compartilhamos.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 O Setor Florestal Brasileiro	2
2.2 O Gênero <i>Eucalyptus</i> e o <i>Eucalyptus tereticornis</i>	3
2.3 Carvão Vegetal e a Transição Energética para o "Aço Verde"	4
2.3.1 O Ciclo do Carbono e a Produção de Energia Renovável	5
2.3.2 Carvão Vegetal vs. Carvão Mineral (Coque Metalúrgico): Impactos e Aplicações.....	5
2.4 Melhoramento Florestal Visando a Produção de Biocarvão	7
2.4.1 Parâmetros Genéticos e a Seleção de Características para Biocarvão.....	7
2.4.2 Estratégias de Seleção e Análise Multivariada	8
3 MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1 Descrição do Experimento	9
3.3 Caracterização da Madeira e da Casca.....	11
3.4 Produção e Caracterização do Carvão Vegetal.....	11
3.4.1 Rendimento Gravimétrico do Carvão (RGCar, %).....	13
3.4.2 Densidade Básica do Carvão (DBCar, g cm ⁻³).....	13
3.4.3 Densidade a Granel do Carvão (DGCar, kg m ⁻³)	13
3.5 Análise dos Dados	14
3.5.1 Análise por Modelos Mistos (REML/BLUP)	14
3.5.2 Análises Multivariadas	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
4.1 Parâmetros Genéticos	15
4.2 Caracterização e Variabilidade dos Caracteres de Qualidade da Madeira e do Carvão	18
4.3 Análises de Agrupamento	21
4.4 Análise de Componentes Principais.....	25
5 CONCLUSÕES	30
6 REFERÊNCIAS	32

DIVERGÊNCIA GENÉTICA ENTRE PROGÊNIES DE POLINIZAÇÃO ABERTA DE *Eucalyptus Tereticornis* Smith PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

RESUMO - O *Eucalyptus tereticornis* Smith é uma importante espécie para a produção de madeira e biocarvão, desempenhando papel decisivo para a sustentabilidade da indústria siderúrgica na produção do "aço verde" no Brasil. Este trabalho avaliou a variabilidade e divergência genéticas, abordando caracteres de crescimento, densidade da madeira e qualidade do biocarvão, em um teste de procedências e progênes de polinização aberta de *E. tereticornis* aos 31 anos. Foram avaliados o diâmetro a 1,30 m do solo, altura, volume de madeira com casca, biomassa do tronco, densidade básica da madeira, rendimento gravimétrico, densidade básica e a granel do carvão e participação percentual da casca no volume e na biomassa de madeira. Os dados foram submetidos à análise por modelos mistos, obtendo-se estimativas de parâmetros genéticos. A partir do valor genético de cada progênie e caráter procedeu-se às análises de agrupamento pelos métodos de Ward, *K-means* e componentes principais. As estimativas de herdabilidade aditiva foram baixas para a maioria dos caracteres de crescimento, contudo, mostraram-se mais elevadas para a altura (0,446), rendimento gravimétrico (0,479) e densidade básica do carvão (0,375). O método de Ward possibilitou a formação de quatro grupos de progênes: o Grupo 1 (11 progênes) apresentou características intermediárias e a maior densidade básica do carvão; o Grupo 2 (8 progênes) destacou-se pela menor produtividade de madeira e menores valores de densidade básica da madeira e do carvão; o Grupo 3 (3 progênes) sobressaiu-se em crescimento e produtividade da madeira e o Grupo 4 (8 progênes) demonstrou um equilíbrio entre produtividade e qualidade de carvão. O método *K-means* confirmou a existência de quatro grupos apesar de pequenas alterações na composição dos mesmos em relação ao método de Ward. Na análise de componentes principais, os três primeiros componentes explicaram mais de 75% da variância total, com o componente 1 representando a produtividade, o componente 2 as densidades da madeira e do carvão e o componente 3, o rendimento gravimétrico e densidade a granel do biocarvão. Observou-se independência entre os caracteres de crescimento e os de qualidade do biocarvão, condição favorável para a seleção combinada e que a variabilidade e divergência genética não estão associadas à procedência das sementes. É possível estabelecer estratégias de melhoramento, recombinação progênes de grupos divergentes e com destaques individuais para os caracteres de interesse buscando-se a combinação de maior produtividade de madeira e qualidade do biocarvão, contribuindo para o avanço da silvicultura e da siderurgia verde no Brasil.

Palavras-chave: Bioenergia; Melhoramento florestal; Eucalipto; Análise multivariada

GENETIC DIVERGENCE AMONG OPEN-POLLINATED PROGENIES OF *Eucalyptus tereticornis* Smith FOR CHARCOAL PRODUCTION

ABSTRACT - *Eucalyptus tereticornis* Smith is an important species for wood and charcoal production, playing a decisive role in the sustainability of the steel industry for "green steel" production in Brazil. This study evaluated the genetic variability and divergence, addressing growth traits, wood density, and charcoal quality, in a 31-year-old open-pollinated progeny and provenance test of *Eucalyptus tereticornis*. Traits evaluated included diameter at 1.30 m above ground, tree height, wood volume with bark, stem biomass, wood basic density, charcoal gravimetric yield, charcoal basic density, charcoal bulk density, and bark percentage in wood volume and biomass. Data were subjected to mixed model analysis to obtain genetic parameter estimates. Based on the genetic value of each progeny and trait, clustering analyses were performed using Ward's and K-means methods, as well as principal components analysis. Additive heritability estimates were low for most growth traits; however, they were higher for height (0.446), charcoal gravimetric yield (0.479), and charcoal basic density (0.375). Ward's method enabled the formation of four progeny groups: Group 1 (11 progenies) exhibited intermediate characteristics and the highest charcoal basic density; Group 2 (8 progenies) stood out for lower wood productivity and lower wood and charcoal basic densities; Group 3 (3 progenies) excelled in growth and wood productivity; and Group 4 (8 progenies) demonstrated a balance between productivity and charcoal quality. The K-means method confirmed the existence of four groups despite small changes in their composition in relation to the Ward method. In principal components analysis, the first three components explained over 75% of the total variance, with component 1 representing productivity, component 2 wood and charcoal densities, and component 3 charcoal gravimetric yield and bulk density. Independence was observed between growth traits and charcoal quality traits, a favorable condition for combined selection. Furthermore, genetic variability and divergence were not associated with seed provenance. It is possible to establish breeding strategies by recombining progenies from divergent groups and those with individual highlights for traits of interest, aiming for a combination of higher wood productivity and charcoal quality, thereby contributing to the advancement of silviculture and green steel production in Brazil.

Keywords: Bioenergy; Forest breeding; *Eucalyptus*; Multivariate analysis

LISTA DE ABREVIATURAS

ACP: Análise de Componentes Principais

Ac-prog: Acurácia da Seleção de Progenies

BIOMT: Biomassa do Tronco

CP1: Componente Principal 1

CP2: Componente Principal 2

CP3: Componente Principal 3

CVe%: Coeficiente de Variação Residual

CVgi%: Coeficiente de Variação Genética Aditiva Individual

CVgp%: Coeficiente de Variação Genética entre Progenies

DAP: Diâmetro à Altura do Peito

DBM: Densidade Básica da Madeira

DBCar: Densidade Básica do Carvão

DGCar: Densidade a Granel do Carvão

GEE: Gases de Efeito Estufa

HCom: Altura Comercial

IBÁ: Indústria Brasileira de Árvores

PCasB: Porcentagem de Casca em Biomassa

PCasV: Porcentagem de Casca em Volume

REML/BLUP: Máxima Verossimilhança Restrita/Melhor Predição Linear Não Viciada

RGCar: Rendimento Gravimétrico do Carvão

VCCC: Volume Comercial com Casca

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1. Estimativas dos parâmetros genéticos para os caracteres de crescimento, de qualidade da madeira e do carvão, em progênies de polinização aberta de <i>Eucalyptus tereticornis</i> pertencentes a duas procedências Australianas aos 31 anos de idade.....	16
Tabela 2. Valores genotípicos preditos dos caracteres de crescimento, de qualidade da madeira e carvão, em 30 progênies de polinização aberta de <i>Eucalyptus tereticornis</i> pertencentes a duas procedências Australianas.	19
Tabela 3. Médias genotípicas dos caracteres de crescimento, de qualidade da madeira e do carvão, dos grupos formados pelo método de Ward, em 30 progênies de polinização aberta de <i>Eucalyptus tereticornis</i> pertencentes a duas procedências Australianas.	23
Tabela 4. Correlações fator-variáveis dos caracteres de crescimento, de qualidade da madeira e do carvão, nos três primeiros componentes principais para 30 progênies de polinização aberta de <i>Eucalyptus tereticornis</i> pertencentes a duas procedências Australianas.	28

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Teste de Procedências e Progênes de <i>Eucalyptus tereticornis</i> aos 31 anos, instalado na Estação Experimental de Luiz Antônio-SP.	10
Figura 2. Discos correspondentes aos pontos de amostragem, 0%, DAP, 25%, 50%,75% e 100% da altura comercial.	11
Figura 3. Cunhas correspondentes aos pontos de amostragem, prontas para carbonização.....	12
Figura 4. Forno mufla utilizado nas carbonizações.	12
Figura 5. Cadinho metálico adaptado, com carvão vegetal resultante da carbonização da madeira.	12
Figura 6. Determinação da densidade básica do carvão pelo método de imersão em água.	13
Figura 7. Recipiente utilizado para densidade a granel.....	14
Figura 8. Dendrograma baseado na Distância Euclidiana entre 30 progênes de polinização aberta de <i>Eucalyptus tereticornis</i> pertencentes a duas procedências Australianas, obtido pelo método Ward a partir de dez caracteres de crescimento, da densidade básica da madeira e de qualidade do carvão.	22

- Figura 9.** Caracterização dos grupos pelo método não-hierárquico K-means, formados a partir da avaliação de dez caracteres de crescimento, densidade básica da madeira e de qualidade do carvão, em 30 progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas.25
- Figura 10.** Gráfico biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) mostrando a dispersão das 30 progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas e as cargas dos caracteres, para os Componentes Principais 1 (CP1) e 2 (CP2). Os pontos representam as progênies.26
- Figura 11.** Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) mostrando a dispersão das 30 progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas e as cargas dos caracteres, para os Componentes Principais 1 (CP1) e 3 (CP3). Os pontos representam as progênies.27

1 INTRODUÇÃO

O setor de florestas plantadas tem posição de destaque na economia brasileira. Ocupando em 2024 uma área de 10,52 milhões de hectares (IBÁ, 2025), é responsável por mais de 90% de toda a madeira utilizada para fins industriais no país, contribuindo para a construção de uma economia verde. Entre os segmentos que usam a madeira como principal matéria-prima, pode-se citar o de celulose e papel, de painéis de madeira, pisos laminados, serrados, compensados, siderurgia a carvão vegetal e o de energia.

No cenário global, o Brasil se destaca como o principal produtor de carvão vegetal para uso industrial, com uma produção de 6,6 milhões de toneladas em 2024 (IBÁ, 2025). É utilizado na siderurgia como agente redutor nos altos-fornos, substituindo parcial ou totalmente o coque metalúrgico (derivado do carvão mineral). Esta substituição além de diversificar a matriz energética e contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), também confere um significativo diferencial ambiental à cadeia produtiva do aço, conhecido como “aço verde”, devido à natureza renovável da sua matéria-prima florestal para a produção do biocarvão.

A demanda crescente por processos siderúrgicos mais sustentáveis tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento da produção de biocarvão de alta qualidade, otimizando as propriedades físico-químicas da madeira para essa finalidade e reforçando o papel da silvicultura na descarbonização industrial (IBÁ, 2023). Neste cenário, a busca pela produção de aço de baixo carbono via biocarvão, alinha-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, destacando os ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao promover a sustentabilidade energética, a inovação industrial e a mitigação dos impactos climáticos.

O gênero *Eucalyptus* tem sido um dos mais plantados no mundo, valorizado por sua adaptabilidade e versatilidade. No Brasil, o plantio de eucaliptos ocupa cerca de 77% da área com florestas comerciais (aproximadamente 8,1 milhões de ha), sendo o principal gênero na silvicultura nacional (IBÁ, 2025). Dentre as espécies de eucalipto, o *E. tereticornis* é considerado uma espécie de interesse em programas de

melhoramento genético no Brasil (Fonseca et al., 2010), dada sua relevância para a produção de energia e biocarvão.

A busca por materiais genéticos de *Eucalyptus* que combinem alta produtividade com as melhores características para a carbonização é, portanto, um dos objetivos da silvicultura voltada para o setor siderúrgico e, neste sentido, a versatilidade do *E. tereticornis* o torna particularmente promissor para a produção de biocarvão de uso industrial.

Nesse contexto, a compreensão da variabilidade e divergência genética entre progênies e, ou dentro de populações de *E. tereticornis* é de grande importância para programas de melhoramento que visam desenvolver genótipos com características adequadas para a produção de biocarvão de alta qualidade. Esses estudos permitem identificar genótipos superiores, direcionar cruzamentos e estabelecer estratégias de seleção que maximizem tanto a produtividade florestal quanto as propriedades tecnológicas da madeira, contribuindo para a sustentabilidade e competitividade da indústria florestal e siderúrgica brasileira, ao mesmo tempo em que alinham a produção com as metas globais de descarbonização e uso de recursos renováveis.

Com isso, o presente trabalho teve por objetivos avaliar a variabilidade e a divergência genética entre progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* Smith, pertencentes a duas procedências australianas, visando-se à produção de biocarvão e à sustentabilidade da siderurgia verde no Brasil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Setor Florestal Brasileiro

O Brasil se firmou como um líder global em Silvicultura, com uma área de 10,52 milhões de hectares de florestas plantadas para fins comerciais, suprindo mais de 90% da demanda industrial por madeira no país (IBÁ, 2024, 2025). O setor florestal brasileiro destaca-se não apenas na produção madeireira, sendo fundamental para a bioeconomia nacional, ao promover o desenvolvimento sustentável a partir do uso de recursos renováveis. A atividade florestal gera uma ampla gama de produtos (celulose

e papel, painéis de madeira, pisos e produção de energia, dentre outros) e contribui significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) e para a geração de empregos, especialmente em regiões rurais (IBÁ, 2023).

A gestão sustentável das florestas plantadas no Brasil é caracterizada por altos índices de produtividade e eficiência, resultantes de décadas de investimento em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e práticas silviculturais avançadas (IBÁ, 2017). A alta capacidade de fixação de carbono coloca as florestas plantadas como um componente estratégico na mitigação das mudanças climáticas, atuando como sequestradoras de carbono. A biomassa florestal é uma fonte de bioenergia, que contribui de forma significativa para a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis (Carneiro et al., 2013). O Brasil, em particular, utiliza a biomassa florestal para a produção de energia termelétrica, bioprodutos e, fundamentalmente, para o carvão vegetal, que possui um papel de destaque na siderurgia (IBÁ, 2024; Oliveira et al., 2010).

2.2 O Gênero *Eucalyptus* e o *Eucalyptus tereticornis*

O gênero *Eucalyptus* possui mais de 900 espécies e subespécies, sendo um dos mais cultivados no mundo dada à sua capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas e pela multifuncionalidade de uso da sua madeira e outros produtos como óleos essenciais (Brooker e Kleinig, 2006). No panorama florestal brasileiro, o *Eucalyptus* ocupa 77% da área de florestas plantadas com finalidades comerciais, sendo a principal base para a indústria madeireira, de papel e celulose e de energia a partir de biomassa lenhosa (IBÁ, 2025).

Dentre as espécies de *Eucalyptus*, *Eucalyptus tereticornis* Smith se destaca em importância para o Brasil (Fonseca et al., 2010). Originária de diversas regiões da Austrália e de ilhas adjacentes, esta espécie apresenta boa tolerância ao estresse hídrico e boa adaptabilidade a solos profundos e bem drenados (Flores et al., 2016; Silva et al., 2007). Estas características tornam a espécie apta para o cultivo em regiões com restrições hídricas ou solos de menor fertilidade, possibilitando a expansão do cultivo comercial de eucalipto para novas regiões brasileiras. Historicamente, *E. tereticornis* foi uma das primeiras espécies de eucalipto

identificadas por Edmundo Navarro de Andrade no início do século XX com potencial para plantio no Brasil (Flores et al., 2016).

Eucalyptus tereticornis tem madeira de excelente qualidade para a produção de energia e biocarvão, com um poder calorífico aproximado de 4378 cal g^{-1} e densidade básica que varia de $0,571$ a $0,645 \text{ g cm}^{-3}$ (Pereira et al., 2000). A densidade básica da madeira (DBM) é uma das propriedades mais valorizadas para fins energéticos e siderúrgicos, pois alta DBM está diretamente associada a um maior teor de carbono fixo no carvão e, conseqüentemente, com maior rendimento gravimétrico do carvão - RGCar (Trugilho et al., 2015; Oliveira et al., 2010). Estudos como os de Pereira et al. (2016) reforçam que madeiras de maior densidade resultam em carvões mais densos e com maior resistência mecânica, características essenciais para o transporte e uso industrial.

Além da DBM, a composição química da madeira, que inclui os teores de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, exercem influência direta no processo de carbonização e na qualidade final do carvão (Rowell et al., 2005). A lignina, por exemplo, é um polímero de carbono que contribui para a alta densidade energética da madeira e é crucial para o processo de pirólise que forma o carvão (Morais et al., 2005; Vital et al., 2013). Os extrativos, embora presentes em menor proporção, podem ser ricos em carbono e contribuir para o poder calorífico da madeira e do carvão (Frederico, 2009; Bowyer et al., 2003). A compreensão da variação dessas propriedades, influenciada pela idade da árvore, genética e condições ambientais, é fundamental para o desenvolvimento de clones com características otimizadas (Estopa et al., 2017; Silva et al., 2005).

2.3 Carvão Vegetal e a Transição Energética para o "Aço Verde"

O carvão vegetal, resultado da carbonização da biomassa lignocelulósica, é um produto milenar cuja importância se reinventa frente aos desafios da sustentabilidade e transição energética. No Brasil, ele é um componente insubstituível na cadeia produtiva do aço, posicionando o país como o maior produtor global de carvão vegetal para uso industrial (IBÁ, 2024).

2.3.1 O Ciclo do Carbono e a Produção de Energia Renovável

A produção de energia a partir da biomassa florestal, incluindo o carvão vegetal, insere-se no ciclo biogeoquímico do carbono de forma estratégica. Ao contrário dos combustíveis fósseis, que liberam carbono armazenado há milhões de anos, a biomassa absorve dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera durante seu crescimento por meio da fotossíntese. Quando essa biomassa é carbonizada e utilizada como energia, o carbono é novamente liberado, mas dentro de um ciclo relativamente curto e balanceado. Essa característica permite que a taxa de remoção de CO_2 pela floresta plantada compense (ou até supere) a taxa de liberação, estabelecendo um balanço de carbono neutro ou até negativo, o que a configura como uma fonte de energia e material de baixas emissões (Carneiro et al., 2013; IPCC, 2022). Esta característica é fundamental para a descarbonização industrial e para atingir as metas de sustentabilidade climática.

2.3.2 Carvão Vegetal vs. Carvão Mineral (Coque Metalúrgico): Impactos e Aplicações

A substituição do coque metalúrgico (derivado do carvão mineral) pelo carvão vegetal como agente redutor na siderurgia é a essência do conceito de "aço verde" (IBÁ, 2023). Esta transição oferece vantagens ambientais e estratégicas (técnica e econômica).

Do ponto de vista ambiental, uma das vantagens mais importantes é a redução de GEE. Por ser de origem renovável e estar inserido em um ciclo de carbono fechado, o carvão vegetal emite significativamente menos GEE em seu ciclo de vida em comparação com o carvão mineral, que libera carbono fóssil acumulado por milênios (IBÁ, 2023; Alves e Silva et al., 2024).

Nesse contexto, a substituição do coque metalúrgico (derivado de combustíveis fósseis) por biocarvão tem sido amplamente estudada como uma estratégia fundamental para reduzir o impacto ambiental. Essa mudança visa diminuir as emissões de GEE, e promover uma siderurgia mais sustentável. Estudos de Análise

do Ciclo de Vida (LCA) demonstram que a aplicação de biocarvão em processos de alto-forno pode reduzir significativamente o potencial de aquecimento global em comparação com o uso de combustíveis fósseis. Por exemplo, Wang et al. (2023), ao analisarem o uso de hidrocarvão de biomassa, quantificaram uma redução de 420,61 kg CO₂ eq no processo de fabricação de ferro, resultando em um impacto total de 2054,00 kg CO₂ eq para este processo.

Ainda no contexto ambiental, outra vantagem do carvão vegetal relaciona-se à sustentabilidade, pois a sua produção a partir de florestas plantadas certificadas promove a conservação de ecossistemas, a gestão responsável dos recursos e a biodiversidade (IBÁ, 2024).

Como vantagens de ordem técnica e econômica, insere-se a qualidade siderúrgica do carvão vegetal, uma vez que para o carvão vegetal ser considerado um substituto eficaz do coque, ele precisa atender a requisitos específicos de qualidade, relacionados ao RGCar, densidade básica (DBCar) e a granel (DGCar) do carvão, teores de carbono fixo, de cinzas e de voláteis. Por exemplo, alto RGCar implica maior eficiência na conversão da biomassa (Trugilho et al., 2015); alta DBCar e DGCar são importantes para otimizar o transporte, armazenamento e o carregamento dos altos-fornos (Martins et al., 2016; Oliveira et al., 2020); por ser o principal componente redutor na indústria siderúrgica, busca-se alto teor de carbono fixo enquanto o baixo teor de cinzas minimiza a formação de escória. Além dessas propriedades, a qualidade do biocarvão para uso industrial também engloba as propriedades mecânicas, cuja importância é abordada por Assis et al. (2016) e em estudos de caracterização de gêneros relacionados, como *Corymbia* (Costa et al., 2017).

Outra vantagem técnica está relacionada à reatividade do carvão vegetal, que, em geral, pode ser superior a do coque metalúrgico, o que pode ser uma vantagem em certos processos siderúrgicos, exigindo, contudo, um controle rigoroso de suas características e da sua taxa de redução no processo siderúrgico (Figueiró et al., 2019; Fabozzi et al., 2024).

Por último, uma outra vantagem do carvão vegetal em relação ao carvão mineral está relacionada à segurança energética, uma vez que a produção interna de carvão vegetal a partir de florestas plantadas reduz a dependência de importações de

carvão mineral, contribuindo para a segurança energética e a estabilidade econômica do setor siderúrgico nacional.

A crescente demanda por soluções de descarbonização impulsiona a pesquisa para o desenvolvimento de genótipos que combinem alta produtividade com as propriedades ideais para a produção de biocarvão de alta qualidade, como demonstrado por Ramos et al. (2023) e Oliveira et al. (2020) para híbridos de *Eucalyptus*.

2.4 Melhoramento Florestal Visando a Produção de Biocarvão

O melhoramento genético florestal é uma ciência aplicada que busca otimizar a produtividade e a qualidade da madeira das espécies arbóreas, enfrentando desafios como a interação genótipo-ambiente e os longos ciclos de rotação (Oda et al., 1989). Para a produção de biocarvão, o foco recai sobre a seleção de genótipos com características específicas da madeira que maximizem a eficiência da carbonização e a qualidade final do produto.

2.4.1 Parâmetros Genéticos e a Seleção de Características para Biocarvão

A base do melhoramento reside na compreensão e quantificação da variabilidade genética. Métodos avançados, como os modelos mistos via REML/BLUP (Máxima verossimilhança restrita/Melhor predição linear não viciada), são empregados para estimar parâmetros genéticos com alta acurácia, incluindo a herdabilidade e os valores genéticos dos indivíduos (Resende, 2007; Resende e Dias, 2000). A herdabilidade é um indicador crucial do potencial de ganho genético, pois quantifica a proporção da variação fenotípica que é herdável (Resende, 1995; Cruz et al., 2014).

O controle genético de algumas características diretamente relacionadas à produção de carvão vegetal é, ainda, pouco conhecido. Contudo, o RGCar, frequentemente apresenta herdabilidade moderada a alta, indicando bom potencial para seleção direta e ganhos genéticos significativos (Trugilho et al., 2015); a DBCar

e DBM, são características com controle genético alto. A seleção para DBM tem sido um foco no melhoramento, visto sua correlação com a densidade do carvão e a biomassa produzida (Pereira et al., 2016; Paula et al., 1996). A DGCar, também exibe variabilidade genética explorável, impactando a logística e a eficiência do uso do carvão (Martins et al., 2016) e para a composição química da madeira (teores de lignina, celulose e de extrativos), embora possa apresentar herdabilidade mais baixa em alguns casos, sua relação com a qualidade do carvão torna a seleção importante. Altos teores de lignina e extrativos, por exemplo, podem otimizar o rendimento e o poder calorífico do biocarvão (Vital et al., 2013; Frederico, 2009).

2.4.2 Estratégias de Seleção e Análise Multivariada

A identificação de genótipos superiores e o planejamento de cruzamentos são otimizados pelo uso de ferramentas de análise multivariada. Técnicas como a Análise de Componentes Principais (ACP) e os métodos de agrupamento permitem visualizar a estrutura da diversidade genética, agrupar genótipos com características semelhantes e identificar aqueles que são geneticamente divergentes e de alto potencial (Alves et al., 2003; Cruz e Carneiro, 2003).

A ACP, ao reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar as principais fontes de variação, facilita a compreensão das correlações entre os diferentes caracteres (Kaiser, 1961). A independência ou baixa correlação entre caracteres de crescimento (produtividade) e caracteres de qualidade do biocarvão é altamente favorável e desejável para o melhoramento. Isso permite que os melhoristas selecionem simultaneamente para os dois conjuntos de caracteres sem que o ganho em um, comprometa o outro, possibilitando a obtenção de genótipos "duplamente superiores" ou "especialistas" em nichos específicos (Hamilton et al., 2009; Zanatto et al., 2020).

A identificação de grupos geneticamente distintos identificados a partir das análises de agrupamento é essencial para direcionar estratégias de melhoramento. Cruzamentos entre progênies de grupos divergentes, mas com destaque para caracteres complementares de interesse, tendem a gerar maior variabilidade genética e potencializar a ocorrência de heterose, resultando em progênies com desempenho

superior (Falconer e Mackay, 1996; Borém e Miranda, 2013). Essa abordagem estratégica é crucial para o desenvolvimento de novas gerações de *Eucalyptus tereticornis* que combinem alta produtividade com as propriedades ideais para a produção de biocarvão de alta qualidade, impulsionando a sustentabilidade e a competitividade da indústria siderúrgica brasileira no contexto do "aço verde".

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do Experimento

Os dados empregados neste estudo referem-se a um teste de progênes de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* Smith, avaliado aos 31 anos de idade (Figura 1).

O teste é constituído por 30 progênes originárias de duas procedências australianas: Ravenshoe (Progênes P153 a P170) e Mt. Garnet (Progênes P171 a P182). O município de Ravenshoe apresenta temperatura média anual de 19,5 °C e 1.466,7 mm de precipitação pluviométrica, enquanto Mt. Garnet tem temperatura média anual de 22,5 °C e 920,6 mm de precipitação pluviométrica (Australian Bureau of Meteorology, 2024). A implantação do teste ocorreu na Estação Experimental de Luiz Antônio, pertencente ao Instituto de Pesquisas Ambientais de São Paulo (IPA-SP), antigo Instituto Florestal de São Paulo, em um solo classificado como Latossolo Vermelho (Santos et al., 2018). Luiz Antônio - SP apresenta temperatura média anual de 22,8 °C e 1582 mm de precipitação pluviométrica (Climate-Data.org, 2024).

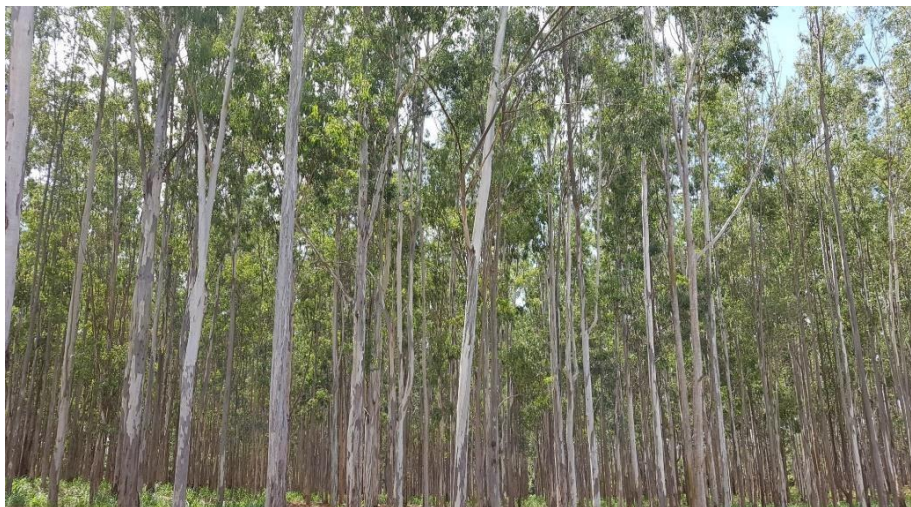


Figura 1. Teste de Procedências e Progênes de *Eucalyptus tereticornis* aos 31 anos, instalado na Estação Experimental de Luiz Antônio-SP. (Foto: Zanatto, 2019)

3.2 Avaliações em Campo

O experimento foi implantado em delineamento de blocos casualizados completos, com 30 progênes de polinização aberta, 100 repetições de uma planta e espaçamento de plantio de 4 x 4 m. No campo foram avaliados em todas as plantas sobreviventes do experimento o diâmetro à altura do peito (DAP, cm), medido a 1,30 m do solo, com suta graduada em mm, e a altura total das árvores (ALT, m), com o uso de um relascópio de Bitterlich.

Três repetições (árvores) de cada progênie foram amostradas para fins de cubagem rigorosa, determinação da DBM e da densidade básica da casca (DBC), e para avaliação do potencial de produção de carvão. De cada árvore abatida foram obtidos seis discos de aproximadamente 5 cm de espessura (Figura 2), amostrados na altura do DAP e a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do comprimento do fuste, correspondente à altura comercial (HCom), até o diâmetro mínimo de 4 cm. Nesses discos foram determinados os diâmetros médios com e sem casca, a partir de duas avaliações perpendiculares entre si e com base no respectivo comprimento de cada seção do fuste, foram calculados os volumes comerciais com casca (VCCC, m³ árvore⁻¹) e sem casca (VCSC, m³ árvore⁻¹), empregando-se a fórmula de Smalian, conforme citado por Soares et al. (2006).

3.3 Caracterização da Madeira e da Casca

Os discos amostrados nas diferentes posições do fuste foram levados para o laboratório para secagem. Do disco amostrado no DAP, retirou-se uma amostra de madeira em forma de cunha e uma porção correspondente da casca, para determinação da DBM (g cm^{-3}) e DBC (g cm^{-3}) por imersão em água, conforme Vital (1984). Com os dados de VCSC e do volume de casca ($\text{VCasca} = \text{VCCC} - \text{VCSC}$) e das DBM e DBC, determinou-se a biomassa do tronco (BIOMT). Obteve-se, também, a porcentagem de casca, expressa em termos de volume ($\text{PCasV} = \text{VCasca}/\text{VCCC} \times 100$) e em termos de biomassa ($\text{PCasB} = \text{Biomassa de casca}/\text{BIOMT} \times 100$).



Figura 2. Discos correspondentes aos pontos de amostragem, 0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. (Foto: Zanatto, 2019)

3.4 Produção e Caracterização do Carvão Vegetal

A partir de uma outra amostra de madeira em forma de cunha de cada disco coletado ao longo do tronco (Figura 3), procedeu-se à carbonização em forno mufla (Figura 4) seguindo a marcha apresentada por Trugilho et al. (2015), usando-se um cadinho metálico adaptado (Figura 5).



Figura 3. Cunhas correspondentes aos pontos de amostragem, prontas para carbonização. (Foto: o autor)



Figura 4. Forno mufla utilizado nas carbonizações. (Foto: o autor)



Figura 5. Cadinho metálico adaptado, com carvão vegetal resultante da carbonização da madeira. (Foto: o autor)

No carvão foram avaliados o rendimento gravimétrico e as densidades básica e a granel, conforme descrito a seguir:

3.4.1 Rendimento Gravimétrico do Carvão (RGCar, %)

Calculado pela relação entre a massa do carvão produzido e a massa da madeira enforcada, expresso em porcentagem (Oliveira et al.,2010), ou seja:

$$RGCar = \frac{\text{Biomassa de carvão (g)}}{\text{Biomassa de madeira (g)}} \times 100$$

3.4.2 Densidade Básica do Carvão (DBCar, g cm⁻³)

Determinada de acordo com Vital (1984), utilizando-se uma balança para a determinação do volume de água deslocado pela imersão da amostra do carvão (Figura 6). A massa foi obtida por meio da pesagem de amostras de carvão seco.

$$DBCar = \frac{\text{Biomassa de carvão (g)}}{\text{Volume de água deslocado (cm}^3\text{)}} \times 100$$



Figura 6. Determinação da densidade básica do carvão pelo método de imersão em água. (Foto: o autor)

3.4.3 Densidade a Granel do Carvão (DGCar, kg m⁻³)

Expressa a massa de carvão contida em um recipiente de volume conhecido (Silva, 2020). No presente estudo foram usados recipientes de 0,065 m × 0,067 m × 0,068 m, ou seja, de 0,00029614 m³ (Figura 7).

$$DGCar = \frac{\text{Biomassa de carvão (kg)}}{\text{Volume do recipiente(m}^3\text{)}} \times 100$$



Figura 7. Recipiente utilizado para densidade a granel. (Foto: o autor)

3.5 Análise dos Dados

3.5.1 Análise por Modelos Mistos (REML/BLUP)

Os dados de DAP, HCom, VCCC, DBM, BIOMT, PCasV, PCasB, RGCAR, DBCAR e DGCar, foram analisados sob modelos mistos com o uso do software Selegen REML/BLUP (Resende, 2007) segundo a seguinte equação:

$$Y = Xr + Zg + Wb + e$$

em que y é o vetor dos dados; r é o vetor dos efeitos de repetição (assumidos como fixos) somados à média geral; g é o vetor dos efeitos genotípicos (assumidos como aleatórios); b é o vetor dos efeitos de procedências (assumidos como aleatórios); e é o vetor de resíduos (aleatórios). Para fins de análise estatística os dados de PCasV e PCasB foram transformados em $\sqrt{x}$. Para o cálculo da herdabilidade no sentido restrito foi utilizado um coeficiente de parentesco (r) de 0,4, sendo este mais apropriado para

populações de polinização aberta de *Eucalyptus* (Eldridge et al., 1993; Williams et al., 2002).

3.5.2 Análises Multivariadas

Os valores genotípicos das famílias obtidos na análise descrita anteriormente foram submetidos a análises multivariadas de agrupamento, pelos métodos hierárquicos de Ward e não hierárquicos *K-means* (K-médias), e de dispersão por ACP, utilizando o Software STATISTICA 7.0 (StatSoft, 2004) e o ambiente R, versão 4.4.1 Patched (R Core Team, 2025), com o auxílio do RStudio, versão 2025.05.1. Para a análise hierárquica de Ward, a determinação do número de grupos foi obtida pelo método de Mojena (Mojena, 1977).

O número de grupos no método de *K-means* foi pré-definido a partir do número de grupos identificados no agrupamento de Ward. Na ACP o número de componentes principais foi definido de forma a explicar pelo menos 70% da variabilidade contida nos dados, adicionalmente obteve-se estimativas de correlações varável x componente, para explicar a participação de cada variável na variação total dos dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Parâmetros Genéticos

As estimativas de herdabilidade (Tabela 1) no sentido restrito (h^2a) revelaram-se baixas, de acordo com a classificação sugerida por Resende (1995), para os caracteres de DAP, VCCC, PCasV, DBM e BIOMT, com valores inferiores a 0,15. Ainda, segundo a classificação desse autor, para os demais caracteres as estimativas de herdabilidade são medianas, por situarem-se entre 0,15 e 0,50. A DGCar, cuja estimativa de herdabilidade foi 0,152, situa-se no limite de classificação entre baixa e mediana. Os caracteres PCasB, DBCar, HCom e RGCAR, apresentaram as estimativas mais elevadas de herdabilidade ($0,32 < h^2a < 0,48$), sugerindo maior

predominância de efeitos genéticos aditivos e, conseqüentemente, menor influência relativa do ambiente na expressão desses caracteres, o que favorece a seleção (Cruz et al., 2014).

Estimativas baixas de herdabilidade dos efeitos aditivos são frequentemente observadas em espécies florestais, particularmente em testes de longa duração (Zanatto et al., 2020). A idade avançada das árvores avaliadas (31 anos) pode ter influenciado essas estimativas, uma vez que de acordo com Falconer e Mackay, (1996), há uma tendência de diminuição da herdabilidade ao longo do tempo, atribuída à ação da seleção natural e à interação genótipo-ambiente.

Tabela 1. Estimativas dos parâmetros genéticos para os caracteres de crescimento, de qualidade da madeira e do carvão, em progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas aos 31 anos de idade.

Parâmetro	Caracteres									
	DAP	HCom	VCCC	PCasV	DBM	BIOMT	PCasB	RGCar	DBCar	DGCar
h²a	0,016	0,446	0,021	0,008	0,045	0,02	0,329	0,479	0,375	0,152
h²proc	0,066	0,002	0,017	0,042	0,008	0,042	0,001	0,047	0,000	0,001
h²mp	0,020	0,395	0,025	0,010	0,052	0,025	0,273	0,430	0,346	0,162
Ac-prog	0,142	0,628	0,158	0,102	0,229	0,158	0,522	0,655	0,588	0,403
CVgi%	1,53	7,56	4,19	0,75	1,63	4,63	6,27	1,83	4,72	3,78
CVgp%	0,97	4,78	2,65	0,48	1,03	2,93	3,96	1,16	2,99	2,39
CVe%	11,64	10,24	28,69	8,06	7,58	31,74	11,21	2,30	7,11	9,40
Média geral	22,35	24,04	0,45	3,80	0,738	313,31	2,88	35,38	0,52	192,63

h²a: Herdabilidade individual no sentido restrito, ou seja, dos efeitos aditivos; *h²proc*: herdabilidade de procedências; *h²mp*: herdabilidade ajustada da média de progênie, assumindo sobrevivência completa; *Ac-prog*: acurácia da seleção de progênies, assumindo sobrevivência completa; *CVgi%*: coeficiente de variação genética aditiva individual; *CVgp%*: coeficiente de variação genética entre progênies; *CVe%*: coeficiente de variação residual; DAP: diâmetro à altura do peito (cm); HCom: altura comercial (m); VCCC: volume comercial com casca (m³ árvore⁻¹); PCasV: porcentagem de casca em volume (%); DBM: densidade básica da madeira (g cm⁻³); BIOMT: biomassa do tronco (kg árvore⁻¹); PCasB: porcentagem de casca em biomassa (%); RGCar: rendimento gravimétrico do carvão (%); DBCar: densidade básica do carvão (g cm⁻³); DGCar: densidade a granel do carvão (kg m⁻³).

Por outro lado, as maiores estimativas de *h²a* observadas para HCom e para os caracteres de qualidade do carvão (RGCar e DBCar) indicam um controle genético

aditivo ligeiramente mais favorável para essas caracteres, o que se mostra promissor em programas de melhoramento voltados para a produção de biocarvão.

A herdabilidade para procedência (h^2_{proc} ; Tabela 1) foi baixa para todas as características avaliadas ($h^2_{proc} \leq 0,07$), sugerindo que a variabilidade genética observada entre as progênies não possui associação com as procedências de origem (Ravenshoe ou Mt. Garnet). Esses resultados indicam que as estratégias de seleção podem concentrar-se na variabilidade intrapopulacional, minimizando a preocupação com a origem geográfica da semente e permitindo maior flexibilidade no manejo dos genitores.

A herdabilidade ajustada da média de progênie (h^2_{mp}) acompanhou a tendência de h^2_a , apresentando valores próximos entre si (Tabela 1). Caracteres como RGCar e DBCar exibiram as maiores estimativas de h^2_{mp} , sinalizando que a seleção de progênies superiores com base nessas características pode ser efetuada com maior confiabilidade em comparação a alguns caracteres de crescimento, como DAP e VCCC. A acurácia da seleção de progênies ($Ac_{-}prog$), um indicador da confiança na seleção, também foi superior para esses caracteres do carvão, reforçando a possibilidade de conduzir a seleção de progênies superiores com base nestes caracteres com maior segurança do que naqueles atributos de crescimento.

As estimativas dos $CVE\%$, embora apresentem uma ampla faixa de valores (Tabela 1), com o mínimo para RGCar (2,30%) e o máximo para BIOMT (31,74%), são amplamente aceitos em experimentos florestais de campo. Os valores mais elevados observados para BIOMT e VCCC não implicam, necessariamente, em baixa precisão experimental (Garcia, 1989), principalmente por serem caracteres compostos derivados da avaliação de outros caracteres (Paula et al., 1996). O coeficiente de variação genética individual ($CV_{gi}\%$), que quantifica a variabilidade genética aditiva em relação à média, apresentou magnitudes modestas para a maioria dos caracteres. Isso confirma a menor expressão da variância genética aditiva em relação à variação fenotípica total para a maioria dos caracteres em estudo, um padrão também verificado para as estimativas de CV_{gp} , que considera a variação genética entre as médias de progênies.

4.2 Caracterização e Variabilidade dos Caracteres de Qualidade da Madeira e do Carvão

Ao analisar os caracteres ligados à qualidade da madeira, a DBM sobressai como um dos atributos mais importantes em *Eucalyptus*, com um impacto direto nas suas propriedades mecânicas e na qualidade do carvão vegetal. Neste estudo, a média de DBM foi $0,738 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 1), com valores genotípicos preditos que oscilaram de $0,732$ a $0,746 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 2). Esses valores são considerados elevados e desejáveis para *Eucalyptus*, especialmente para fins energéticos e siderúrgicos, onde uma densidade superior associa-se a maior teor de carbono fixo e ao rendimento de carvão (Oliveira et al., 2010; Trugilho et al., 2015). Os valores de DBM aqui obtidos para *E. tereticornis* situam-se no limite superior ou até excedem a faixa comum ($0,57$ a $0,65 \text{ g cm}^{-3}$), evidenciando o potencial dessa espécie para produzir madeira densa. Assim, a alta DBM observada possibilita que *Eucalyptus tereticornis* seja considerada uma fonte interessante de biomassa densa, tanto para uso direto da madeira quanto para sua conversão em biocarvão de alta qualidade.

A média geral do RGCar de 35,38% obtida para *E. tereticornis* (Tabela 1) encontra-se dentro da faixa esperada e corrobora as observações de Trugilho et al. (2015) que destacaram essa espécie, dentre outras estudadas, por seus elevados RGCar. Os valores genotípicos preditos para RGCar variaram de 34,89%, na progênie 181, a 35,96% na progênie 174 (Tabela 2), consolidando a consistência do alto potencial da espécie para conversão em biocarvão. Esses valores são semelhantes aos reportados por Ramos et al. (2023), para clones de *Eucalyptus* de 9-10 anos, e por Oliveira et al. (2020) em híbridos de eucalipto aos 7 anos.

Analogamente, a média geral da DBCar de $0,520 \text{ g cm}^{-3}$ (equivalente a 520 kg m^{-3}), e sua variação entre progênies ($0,501$ a $0,537 \text{ g cm}^{-3}$, Tabela 2) são consideradas vantajosas para a produção de carvão vegetal, especialmente no contexto siderúrgico. Uma DBCar elevada é desejável, pois impacta diretamente o volume transportado e armazenado do carvão influenciando, assim, a eficiência logística e econômica (Martins et al., 2016). Ramos et al. (2023) observaram para *Eucalyptus* de 9-10 anos uma densidade aparente do carvão entre 356 e 458 kg m^{-3} ,

Tabela 2. Valores genotípicos preditos dos caracteres de crescimento, de qualidade da madeira e carvão, em 30 progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas.

Procedência	Progênie	DAP	HCom	VCCC	PCasV	DBM	BIOMT	PCasB	RGCar	DBCar	DGCar
Ravenshoe	153	22,33	23,67	0,452	3,79	0,737	311,78	2,85	34,97	0,508	191,84
	154	22,34	24,64	0,456	3,79	0,738	314,50	2,85	35,31	0,516	191,61
	155	22,37	24,24	0,455	3,80	0,736	313,62	2,98	35,25	0,519	193,96
	156	22,34	23,77	0,454	3,79	0,739	313,07	2,86	35,29	0,518	194,11
	157	22,34	24,40	0,455	3,79	0,738	313,61	2,84	35,04	0,519	192,35
	158	22,28	23,15	0,451	3,80	0,738	310,98	2,93	35,24	0,515	194,03
	159	22,36	25,72	0,458	3,79	0,740	316,47	2,79	35,00	0,534	193,39
	160	22,39	25,56	0,458	3,79	0,740	316,16	2,82	35,21	0,519	191,83
	161	22,39	24,49	0,455	3,80	0,735	313,35	3,00	35,49	0,508	191,82
	162	22,33	23,78	0,453	3,80	0,737	312,67	2,95	35,40	0,511	192,54
	163	22,36	24,82	0,455	3,79	0,737	313,69	2,76	35,71	0,515	194,02
	164	22,39	23,76	0,455	3,79	0,736	313,17	2,83	35,67	0,505	193,94
	165	22,35	24,03	0,453	3,80	0,739	312,90	2,93	35,35	0,525	194,35
	166	22,30	23,43	0,452	3,79	0,740	312,04	2,85	35,35	0,521	191,95
	167	22,33	23,55	0,454	3,79	0,738	312,88	2,90	35,59	0,528	191,08
	168	22,35	23,79	0,454	3,79	0,737	313,19	2,86	35,71	0,524	190,90
	169	22,35	23,76	0,454	3,79	0,738	312,96	2,87	35,23	0,515	193,61
	170	22,39	23,95	0,456	3,79	0,737	314,96	2,83	35,44	0,515	193,69
Mt. Garnet	171	22,31	23,63	0,452	3,80	0,740	312,29	2,84	35,70	0,537	195,95
	172	22,33	23,45	0,453	3,79	0,737	311,86	2,82	35,32	0,527	192,23
	173	22,37	23,48	0,455	3,80	0,737	313,94	2,99	35,42	0,502	189,07
	174	22,38	24,09	0,455	3,79	0,737	313,90	2,90	35,95	0,513	190,59
	175	22,34	22,99	0,452	3,79	0,740	312,31	2,81	35,06	0,528	190,91
	176	22,29	23,43	0,452	3,80	0,736	311,45	2,88	35,68	0,512	196,13
	177	22,37	25,21	0,457	3,79	0,739	315,60	2,87	35,60	0,523	194,53
	178	22,34	24,23	0,454	3,79	0,739	313,53	2,80	35,07	0,519	192,10
	179	22,34	23,55	0,453	3,80	0,736	312,19	2,87	35,53	0,505	190,03
	180	22,34	24,68	0,455	3,79	0,738	314,12	2,87	35,57	0,516	194,97
	181	22,37	25,13	0,457	3,79	0,737	315,12	2,85	34,89	0,501	188,63
	182	22,32	22,96	0,452	3,80	0,733	311,15	2,97	35,11	0,505	192,68
Variação	Mínimo	22,28	22,96	0,451	3,79	0,733	310,98	2,76	34,89	0,501	188,63
	Máximo	22,39	25,72	0,458	3,80	0,740	316,47	3,00	35,95	0,537	196,13

DAP: diâmetro à altura do peito (cm); HCom: altura comercial (m); VCCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{árvore}^{-1}$); PCasV: porcentagem de casca em volume (%); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOMT: biomassa do tronco (kg árvore^{-1}); PCasB: porcentagem de casca em biomassa (%); RGCar: rendimento gravimétrico do carvão (%); DBCar: densidade básica do carvão (g cm^{-3}); DGCar: densidade a granel do carvão (kg m^{-3}).

portanto, inferior aos valores aqui obtidos. Esses resultados confirmam a alta qualidade intrínseca do biocarvão de *E. tereticornis* para uso siderúrgico, mesmo quando proveniente de árvores mais maduras.

Quanto à DGCar, a média geral de 192,630 kg m⁻³ (Tabela 1), com uma variação de 188,633 a 196,132 kg m⁻³ (Tabela 2), corrobora a adequação de *E. tereticornis* para uso industrial. A densidade a granel possui um papel crucial na otimização do carregamento e da capacidade dos altos-fornos. Os valores observados indicam que o biocarvão derivado dessas progênes possui propriedades físicas que o qualificam como um insumo valioso para a siderurgia, contribuindo para a eficiência do processo de redução do minério de ferro, tal como destacado na literatura referente à importância dessas características para o "aço verde" (IBÁ, 2023). Em termos comparativos, esses valores se alinham à faixa de 180 a 205 kg m⁻³ descrita por Figueiró et al. (2019) para carvão de *Eucalyptus* de 7 anos. Contudo, são pouco menores que a média de 234,61 kg m⁻³ verificada por Oliveira et al. (2020) em híbridos de eucaliptos na mesma idade. Mesmo com essa diferença, a manutenção de uma DGCar dentro dos padrões aceitáveis da literatura, mesmo em árvores de 31 anos, sugere que a idade avançada não prejudicou de forma significativa essa propriedade. Assim, os resultados de DGCar são considerados satisfatórios para as demandas do setor siderúrgico (IBÁ, 2023).

A análise dos valores genotípicos preditos na Tabela 2, juntamente com suas faixas de variação mínima e máxima, confirma a variabilidade disponível para o melhoramento. A amplitude entre os valores extremos (mínimo e máximo) de cada caráter constitui um indicador direto do potencial de ganho genético via seleção. Os caracteres de crescimento (DAP, VCCC e BIOMT), mesmo com médias expressivas, apresentam pequena amplitude de variação (DAP variando de 22,28 a 22,39 cm; BIOMT de 310,981 a 316,475 kg árvore⁻¹). Isso indica uma limitação na variabilidade genética existente para essas características o que pode, consequentemente, restringir os ganhos esperados pela seleção para esses atributos. A HCom foi o caráter com maior amplitude de variação, o que corrobora os resultados de CVgi% e CVgp%, seguido por PCasB e DBCar (Tabelas 1 e 2). Isso torna-se ainda mais evidente quando se consideram as maiores acurácias e herdabilidades ajustadas para a média de progênie observadas para essas características. Essa variabilidade,

mesmo que moderada, é suficiente para viabilizar a identificação e a seleção de progênies superiores para as propriedades desejáveis de carvão, a exemplo das progênies 174, 163, 168 e 171 com RGCar superior a 35,70%. A progênie 171 apresentou, também, a maior DBCar ($0,537 \text{ g cm}^{-3}$) entre as 30 progênies aqui estudadas. Essas progênies com valores superiores para os caracteres de interesse, são passíveis de serem exploradas em gerações futuras do programa de melhoramento, direcionando a seleção para a maximização dos atributos de interesse na produção de biocarvão.

4.3 Análises de Agrupamento

A análise de agrupamento hierárquico, empregando o método de Ward e adotando-se o ponto de corte em 55,10% da distância máxima de ligação a partir do método de Mojena (1977), identificado pela linha tracejada vermelha (Figura 8), possibilitou a distinção de quatro agrupamentos entre as 30 progênies de *Eucalyptus tereticornis*, cuja caracterização, a partir das médias genotípicas de cada caráter (Tabela 3), reflete a estrutura da variabilidade genética presente entre as progênies avaliadas.

O Grupo 1, composto por 11 progênies, caracterizou-se por apresentar médias genotípicas intermediárias a baixas para a maioria dos caracteres de crescimento e biomassa, como HCom (23,82 m) e BIOMT ($312,8 \text{ kg árvore}^{-1}$). No entanto, este grupo destacou-se por possuir as maiores médias para DBM ($0,739 \text{ g cm}^{-3}$) e DBCar ($0,521 \text{ g cm}^{-3}$). Para os demais caracteres de qualidade do carvão (RGCar: 35,25% e DGCar: $192,822 \text{ kg m}^{-3}$), as médias se posicionaram em patamares medianos. Este grupo, embora não apresente extremos em todos os aspectos de desempenho, pode representar uma base interessante para estratégias de melhoramento que buscam um perfil balanceado ou que priorizam a densidade do carvão.

O Grupo 2, formado por 8 progênies, destacou-se por apresentar, em geral, as menores médias para caracteres de crescimento (DAP: 22,33 cm; HCom: 23,64 m; BIOMT: $312,4 \text{ kg árvore}^{-1}$), indicando a menor produtividade volumétrica. Além disso, este grupo registrou as menores médias para DBM ($0,510 \text{ g cm}^{-3}$) e DBCar ($0,510 \text{ g cm}^{-3}$) e a segunda menor DGCar ($192,536 \text{ kg m}^{-3}$). O RGCar (35,40%) foi o segundo

maior entre os quatro grupos. Este perfil sugere que as progênes deste grupo, apesar de sua menor produtividade e qualidade do carvão, podem ser importantes para manter a amplitude da variabilidade genética na população, embora não sejam as mais promissoras para seleção direta visando a produção de biocarvão de alta qualidade.

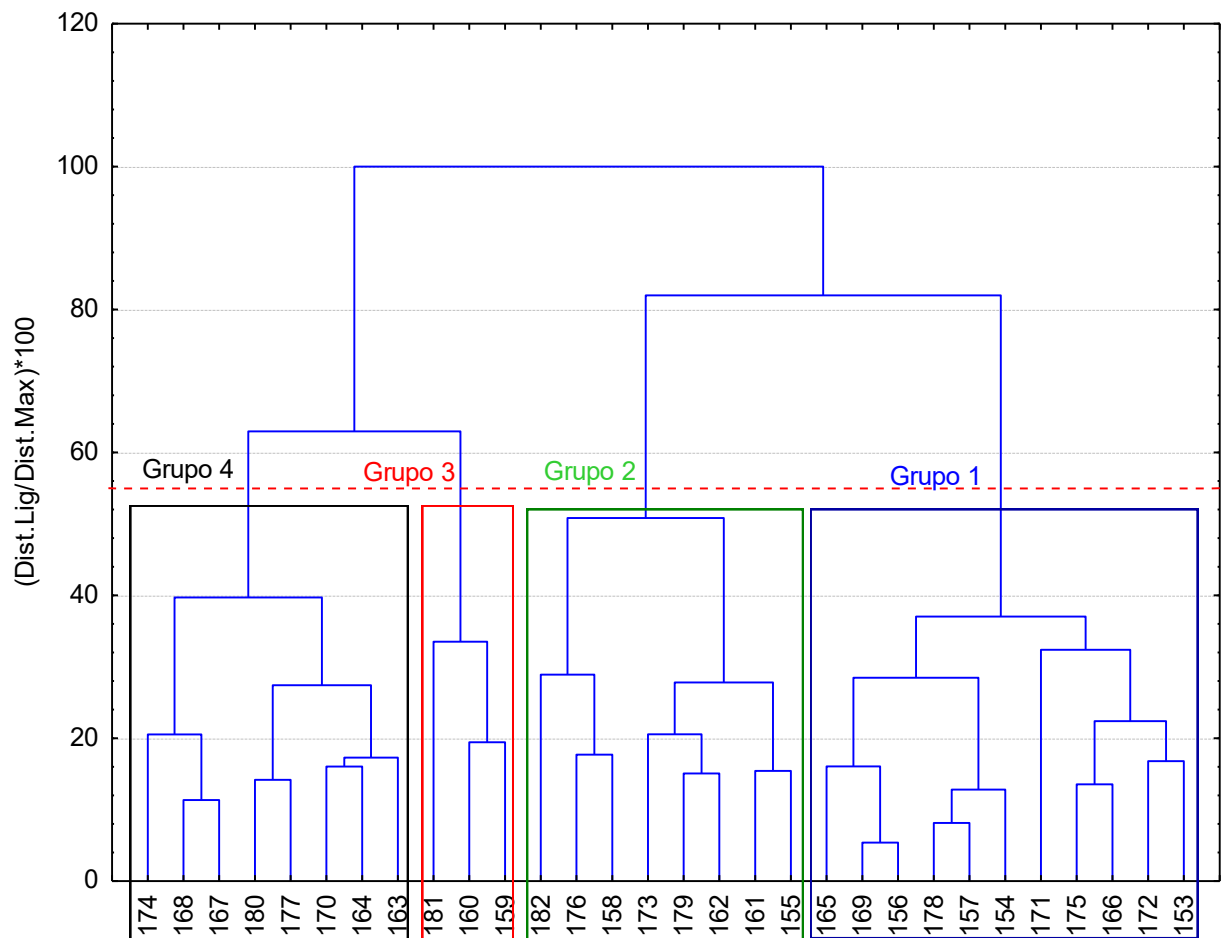


Figura 8. Dendrograma baseado na Distância Euclidiana entre 30 progênes de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas, obtido pelo método Ward a partir de dez caracteres de crescimento, da densidade básica da madeira e de qualidade do carvão. (Procedência 1 - P153 a P170; Procedência 2 – P171 a P182).

Tabela 3. Médias genotípicas dos caracteres de crescimento, de qualidade da madeira e do carvão, dos grupos formados pelo método de Ward, em 30 progênes de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas.

Características	Médias			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
DAP	22,33	22,33	22,37	22,36
HCom	23,82	23,64	25,47	24,23
VCCC	0,4533	0,4533	0,4574	0,4552
PCasV	3,80	3,80	3,80	3,80
DBM	0,739	0,736	0,739	0,737
BIOMT	312,8	312,4	315,9	313,9
PCasB	2,85	2,95	2,83	2,86
RGCar	35,25	35,40	35,04	35,66
DBCar	0,521	0,510	0,518	0,517
DGCar	192,822	192,536	191,288	192,970

DAP: diâmetro à altura do peito (cm); HCom: altura comercial (m); VCCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); PCasV: porcentagem de casca em volume (%); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOMT: biomassa do tronco (kg árvore^{-1}); PCasB: porcentagem de casca em biomassa (%); RGCar: rendimento gravimétrico do carvão (%); DBCar: densidade básica do carvão (g cm^{-3}); DGCar: densidade a granel do carvão (kg m^{-3}).

O Grupo 3 é formado por apenas 3 progênes (P159, P160 e P181) e sobressaiu-se por apresentar as maiores médias para a maioria dos caracteres de crescimento e biomassa, incluindo HCom (25,47 m) e BIOMT (315,9 kg árvore^{-1}). No entanto, este grupo registrou as menores médias de RGCar (35,04%) e de DGCar (191,288 kg m^{-3}). Este grupo é particularmente interessante para programas que buscam maximizar o crescimento e a biomassa, servindo como uma fonte de genótipos de alta produtividade.

O Grupo 4, abrangendo 8 progênes, caracterizou-se por apresentar um equilíbrio entre produtividade e qualidade do carvão. Suas médias para crescimento (HCom: 24,23 m; BIOMT: 313,9 kg árvore^{-1}) mostraram-se robustas, sendo a segunda maior em termos de produtividade. Para os caracteres de carvão, este grupo se destaca por apresentar o maior RGCar (35,66%) e a maior DGCar (192,970 kg m^{-3}), além de uma boa DBCar (0,517 g cm^{-3}). Este grupo é uma fonte promissora de progênes que atendem de forma satisfatória tanto a produtividade quanto a alta qualidade do biocarvão, sendo o mais indicado para a seleção combinada.

A formação desses quatro grupos geneticamente distintos é um indicativo da estrutura e da amplitude da diversidade genética presente no germoplasma estudado. A seleção do ponto de corte em 55,10% da distância máxima (critério de Mojena) é um critério prático que visa equilibrar a formação de grupos com significado biológico

e a representatividade da variabilidade total. Essa abordagem é similar à utilizada em estudos de caracterização de germoplasma de *Eucalyptus* que também optaram por um ponto de corte que maximizasse a identificação de grupos divergentes para fins de melhoramento (Zanatto et al., 2020).

Para validar a robustez da estrutura de divergência genética presente, foi usada a análise não hierárquica *K-means* adotando-se o mesmo número de grupos identificados no método de Ward (Figura 9). Essa análise corroborou a existência de quatro grupos principais, ainda que com algumas pequenas variações na composição das progênies dentro de cada agrupamento. Por exemplo, os grupos 1 de Ward e de *K-means*, ambos com 11 progênies, compartilham 9 progênies em comum e os grupos 2 de Ward e 3 de *K-means* compartilham 5 progênies em comum.

Também, a presença de progênies de ambas as procedências (Ravenshoe e Mt. Garnet) em todos os grupos formados, tanto por Ward quanto por *K-means*, reforça que a divergência genética observada não se relaciona necessariamente à origem geográfica das sementes, mas sim à variabilidade intrínseca dentro das populações, conforme corroborado pelo estudo de Zanatto et al. (2020) a partir de outros caracteres nesse mesmo teste. Essa desassociação em relação à procedência revela-se fundamental para o direcionamento de cruzamentos e para a manutenção da base genética em programas de melhoramento, possibilitando o cruzamento e recombinação de progênies pertencentes a uma mesma procedência, desde que divergentes.

A identificação de grupos divergentes é importante para o melhoramento genético. Cruzamentos entre acessos de grupos geneticamente distintos e distantes tendem a gerar progênies com maior variabilidade genética e, conseqüentemente, maior potencial para a ocorrência de heterose e a obtenção de ganhos genéticos significativos (Falconer e Mackay, 1996; Borém e Miranda, 2013). Esta estratégia permite a recombinação de genes favoráveis de diferentes "pools" genéticos, possibilitando o surgimento de novas combinações que podem superar o desempenho dos pais. Nesse sentido, cruzamentos entre progênies do Grupo 3 (alta produtividade) com progênies do Grupo 4 (combinação de produtividade e alta qualidade de carvão) seriam estratégias promissoras para combinar características desejáveis e otimizar a produção de biocarvão.

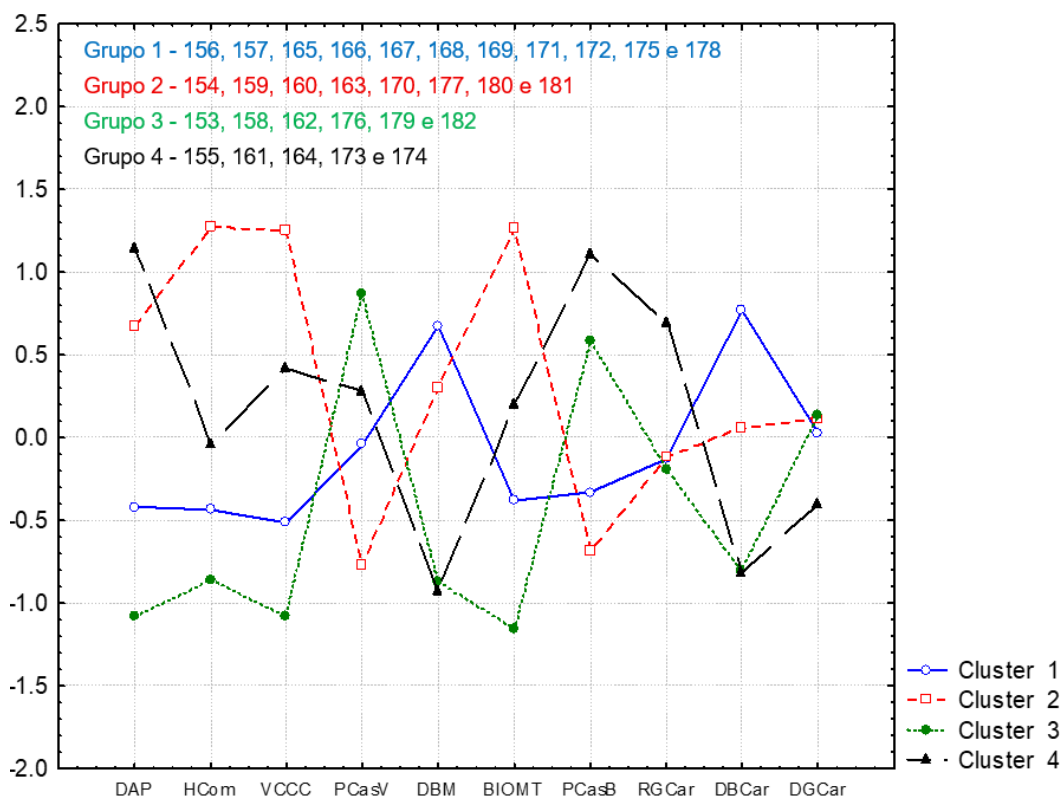


Figura 9. Caracterização dos grupos pelo método não-hierárquico K-means, formados a partir da avaliação de caracteres de crescimento, densidade básica da madeira e de qualidade do carvão, em 30 progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas.

DAP: diâmetro à altura do peito (cm); HCom: altura comercial (m); VCCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); PCasV: porcentagem de casca em volume (%); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOMT: biomassa do tronco (kg árvore^{-1}); PCasB: porcentagem de casca em biomassa (%); RGCar: rendimento gravimétrico do carvão (%); DBCar: densidade básica do carvão (g cm^{-3}); DGCar: densidade a granel do carvão (kg m^{-3}).

4.4 Análise de Componentes Principais

Na ACP, os três primeiros componentes principais (CP1, CP2 e CP3) explicaram 76,91% da variação total presente (Figuras 10 e 11), possibilitando confiabilidade na interpretação dos resultados (Kaiser, 1961). Os caracteres mais influentes em cada componente principal podem ser visualizados nas correlações componente principal x variável (Tabela 4) e suas projeções no gráfico biplot de dispersão das progênies (Figuras 10 e 11). Assim, o CP1 apresentou forte correlação com os caracteres de crescimento e biomassa, tais como VCCC (-0,927), BIOMT

(-0,955), HCom (-0,888) e DAP (-0,699). O sinal negativo associado a essas correlações indica que progênies com valores mais elevados para esses caracteres localizam-se à esquerda desse componente. Por outro lado, a PCasV, com correlação

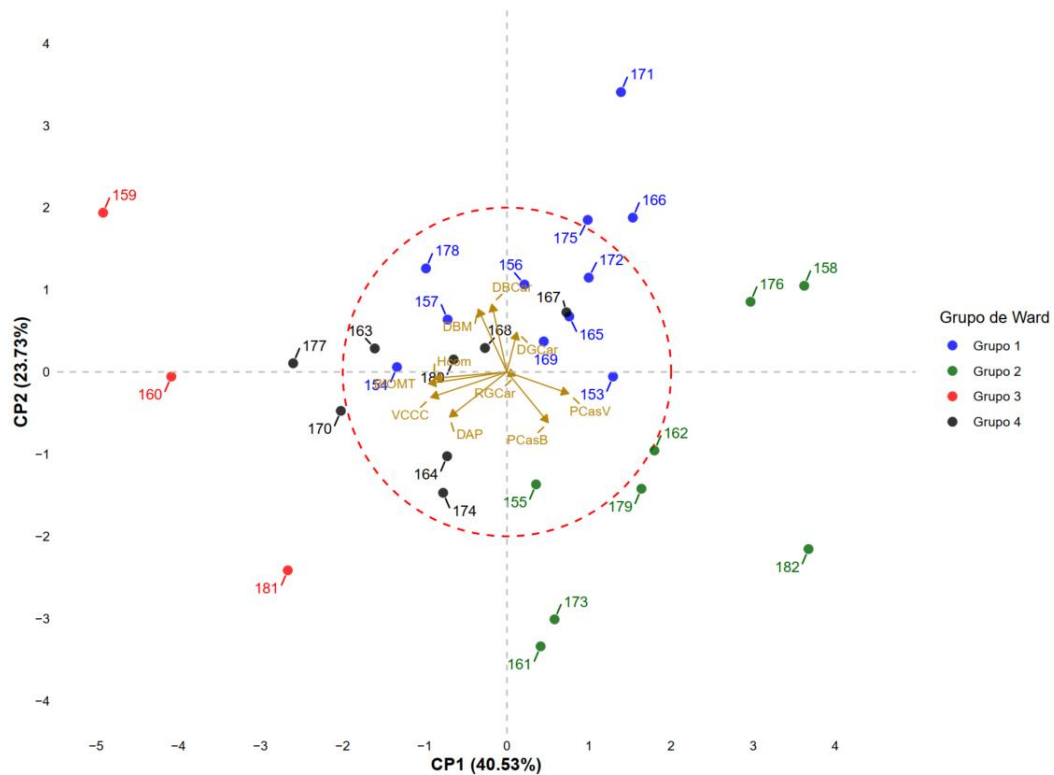


Figura 10. Gráfico biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) mostrando a dispersão das 30 progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas e as cargas dos caracteres, para os Componentes Principais 1 (CP1) e 2 (CP2). Os pontos representam as progênies (com seus respectivos pontos e números coloridos conforme os grupos de Ward: Grupo 1 - azul, Grupo 2 - verde, Grupo 3 - vermelho, Grupo 4 - preto). As setas em dourado indicam a direção e a magnitude da influência de cada caráter na formação dos componentes.

DAP: diâmetro à altura do peito (cm); HCom: altura comercial (m); VCCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); PCasV: porcentagem de casca em volume (%); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOMT: biomassa do tronco (kg árvore^{-1}); PCasB: porcentagem de casca em biomassa (%); RGCAR: rendimento gravimétrico do carvão (%); DBCAR: densidade básica do carvão (g cm^{-3}); DGCAR: densidade a granel do carvão (kg m^{-3}).

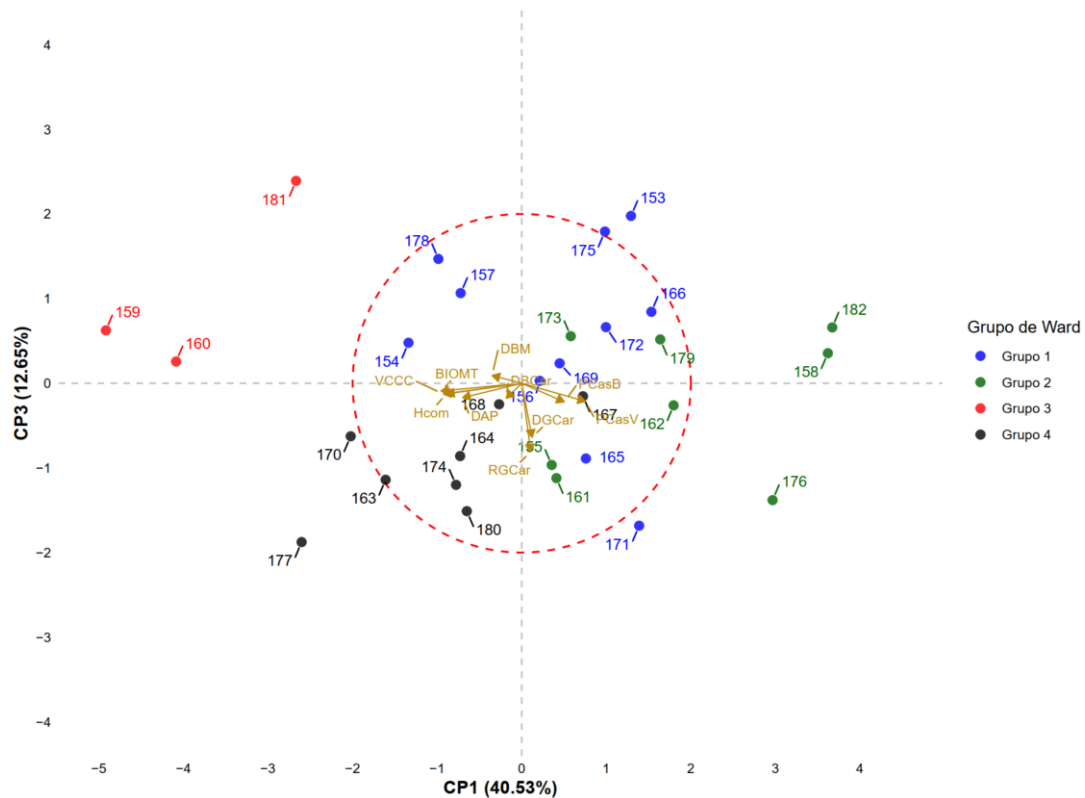


Figura 11. Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) mostrando a dispersão das 30 progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas e as cargas dos caracteres, para os Componentes Principais 1 (CP1) e 3 (CP3). Os pontos representam as progênies (com seus respectivos pontos e números coloridos conforme os grupos de Ward: Grupo 1 - azul, Grupo 2 - verde, Grupo 3 - vermelho, Grupo 4 - preto). As setas em dourado indicam a direção e a magnitude da influência de cada caráter na formação dos componentes.

DAP: diâmetro à altura do peito (cm); HCom: altura comercial (m); VCCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); PCasV: porcentagem de casca em volume (%); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOMT: biomassa do tronco (kg árvore^{-1}); PCasB: porcentagem de casca em biomassa (%); RGCar: rendimento gravimétrico do carvão (%); DBCar: densidade básica do carvão (g cm^{-3}); DGCar: densidade a granel do carvão (kg m^{-3}).

de 0,753 com o CP1, indica que progênies com maiores medias de PCacV situam-se à direita do CP1 e divergem daquelas com maior crescimento e biomassa. Em outras palavras, progênies com maior PCasV e PCasB, porém em menor proporção (correlação de 0,503 com o CP1), tendem a apresentar menor crescimento e BIOMT. Com isso, o CP1 reflete, predominantemente, o potencial produtivo das progênies.

Tabela 4. Correlações fator-variáveis dos caracteres de crescimento, de qualidade da madeira e do carvão, nos três primeiros componentes principais para 30 progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* pertencentes a duas procedências Australianas

Características	Correlações fator-variáveis dos caracteres		
	CP1	CP2	CP3
DAP	-0,699	-0,548	-0,171
HCom	-0,888	-0,078	-0,125
VCCC	-0,927	-0,310	-0,127
PCasV	0,753	-0,263	-0,213
DBM	-0,351	0,765	0,091
BIOMT	-0,955	-0,142	-0,092
PCasB	0,503	-0,616	-0,219
RGCar	0,107	-0,046	-0,810
DBCar	-0,185	0,825	-0,176
DGCar	0,122	0,483	-0,638

DAP: diâmetro à altura do peito (cm); HCom: altura comercial (m); VCCC: volume comercial com casca ($\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$); PCasV: porcentagem de casca em volume (%); DBM: densidade básica da madeira (g cm^{-3}); BIOMT: biomassa do tronco (kg árvore^{-1}); PCasB: porcentagem de casca em biomassa (%); RGCar: rendimento gravimétrico do carvão (%); DBCar: densidade básica do carvão (g cm^{-3}); DGCar: densidade a granel do carvão (kg m^{-3}).

No CP2, as maiores correlações foram observadas com as DBM (0,765) e DBCar (0,825) e de forma inversa com a PCasB (-0,616). As altas e positivas correlações entre esses dois atributos no CP2 indicam que progênies com maior DBM e DBCar se posicionam na parte superior do CP2 (Figura 10), enquanto as progênies de maior PCasB na porção inferior. Isso indica que progênies com menor PCasB tendem a possuir maior DBM e DBCar o que é um aspecto favorável.

Os caracteres diretamente relacionados ao CP3 referem-se ao RGCar (-0,810) e à DGCar (-0,638), ambos com sinal negativo, indicando que progênies com maiores médias nesses dois caracteres encontram-se dispersas na parte inferior do CP3 (Figura 11).

Com base nas Figuras 10 e 11, pode-se observar uma quase independência entre os caracteres de crescimento (alocados no quadrante inferior à esquerda no CP1) com as DBM e DBCar (quadrante superior à esquerda do CP2) ou mesmo daqueles com a DGCar e o RGCar (alocados no quadrante inferior à direita do CP3), com ângulos próximos a 90° entre seus respectivos vetores (Zanatto et al., 2020; Hamilton et al., 2009). Isso facilita a implementação de estratégias de seleção

simultâneas e independentes para produtividade e qualidade do biocarvão, tornando possível selecionar para alta produtividade sem comprometer a qualidade do carvão, e vice-versa, permitindo a formação de genótipos especializados.

Ainda pelas Figuras 10 (CP1/CP2) e 11 (CP1/CP3), o interesse maior reside nas progênies localizadas nas extremidades dos eixos ou em direções específicas que se destacam por um ou mais caracteres objetivos do programa, configurando-se como genótipos especialistas. Essas progênies localizam-se fora da elipse traçada nessas figuras. Assim, progênies localizadas na extremidade esquerda do CP1 correspondem àquelas de alta produtividade a exemplo das progênies 159, 160 e 181, pertencentes ao Grupo 3 (vermelho). Por outro lado, aquelas posicionadas na extremidade superior do CP2 são as de maiores densidades de madeira e de carvão, como as progênies 157, 165 e 171 do Grupo 1 (azul), e algumas do Grupo 4 (preto). Essas progênies, em conjunto, combinam boa produtividade com maiores densidades da madeira e carvão, que são determinantes para a eficiência da carbonização e a qualidade final do carvão (Trugilho et al., 2015; Carneiro et al., 2013).

Na Figura 11 (CP1/CP3), é possível ter melhor visualização das progênies em relação ao seu potencial de crescimento (CP1) e ao RGC_{Car} e à DGC_{Car} (CP3). Progênies na extremidade esquerda do CP1 indicam, novamente, alta produtividade (ex: progênies do Grupo 3, como 159, 160 e 181). As progênies posicionadas na extremidade inferior do CP3 são as de maiores RGC_{Car} e DGC_{Car} (Progênies 171 e 176).

O uso de diferentes técnicas de análise multivariada possibilita uma seleção mais assertiva das progênies mais promissoras para os objetivos traçados no programa de melhoramento. São análises complementares que reforçam o potencial e as características próprias de cada genótipo avaliado, possibilitando uma compreensão mais ampla da variabilidade disponível e passível de exploração pelo melhorista (Alves et al., 2003).

As técnicas multivariadas reforçam os resultados das análises individuais e direcionam as melhores estratégias para a obtenção da população melhorada ao identificar genótipos superiores de grupos distintos para os cruzamentos. Assim, na análise individual é possível identificar genótipos "elite" para caracteres específicos: a progênie 174 obteve o maior RGC_{Car} (35,95%); a 171 apresentou as maiores DBC_{Car}

(0,537 g cm⁻³) e DBM (0,740 g cm⁻³); a 176 a máxima DGCar (196,132 kg m⁻³) e a progênie 159 a maior BIOMT (316,46 kg). Essas progênies pertencem a grupos distintos na análise de Ward. A identificação dessas progênies de desempenho superior, mesmo que algumas pertençam a grupos com perfil geral menos favorável (como o Grupo 2 de Ward, por exemplo), ressalta a variabilidade genética aditiva disponível e valida a estratégia de selecionar genótipos especializados para otimizar a produção de biocarvão.

5 CONCLUSÕES

Há variabilidade e divergência genética, para os caracteres de crescimento, densidade básica da madeira e de qualidade do biocarvão, entre as 30 progênies de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* avaliadas. Contudo, isso não se associa à procedência ou à fonte geográfica das sementes, mas sim à intrínseca variação genética presente nas populações.

A distribuição das 30 progênies em quatro grupos, na análise de agrupamento pelo método de Ward e validada pela análise pelo método *K-means*, evidencia a possibilidade de adotar estratégias de melhoramento compatíveis com a variabilidade detectada, mesmo quando essa não é tão expressiva. Nesse sentido, obteve-se um grupo com progênies de maior potencial de crescimento; outro com progênies superiores para os caracteres relacionados à produção de carvão; outro grupo que contempla progênies de bom crescimento e boa qualidade de carvão, além de um grupo com progênies de comportamento intermediário.

A independência relativa entre os caracteres de crescimento e de qualidade do biocarvão, observada na análise de componentes principais, cria possibilidades para seleção de genótipos que combinem esses atributos ou para objetivos específicos o que permite o direcionamento de cruzamentos entre genótipos superiores e divergentes.

Assim, diante da divergência genética identificada e da complementaridade entre as progênies, recomenda-se a realização de cruzamentos controlados entre genótipos superiores e divergentes como estratégia para a obtenção de ganhos genéticos simultâneos. Como proposta prática, sugere-se, por exemplo, cruzamentos

entre as progênies 159, 171, 174 e 176, as quais, além de pertencerem a grupos distintos nas análises de divergência, apresentam destaques individuais para alguns caracteres de interesse. Enquanto a progênie 159 apresenta o máximo potencial produtivo (VCCC e BIOMT), as progênies 171 (máximas DBCar e DBM), 174 (máximo RGCcar) e 176 (máxima DGCcar) sobressaem-se em parâmetros específicos de qualidade da madeira e do biocarvão. Esses cruzamentos possibilitam explorar a variabilidade existente para o desenvolvimento de genótipos de *Eucalyptus tereticornis* que aliem alta produtividade de biomassa a uma qualidade tecnológica superior para a siderurgia verde.

6 REFERÊNCIAS

Alves e Silva S, Venturini OJ, Leme MMV, Moura DC, Heck TO (2024) Enhancing sustainability in charcoal production: Integrated Life Cycle Assessment and by-product utilization to promote circular systems and minimize energy loss. **Biomass and Bioenergy** 182:107115. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107115>. Acesso em: 05 out. 2025.

Alves RM, Garcia AAF, Cruz ED, Figueira A (2003) Seleção de descritores botânico-agronômicos para a caracterização de germoplasma de cupuaçuzeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 38:807-818.

Assis MR, Brancheriau L, Napoli A, Trugilho PF (2016) Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology** 1:1-18. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0812-6>.

Australian Bureau Of Meteorology (2024) Climate statistics for Australian locations: Ravenshoe Post Office. Disponível em: <http://www.bom.gov.au/>.

Borém A, Miranda GV (2013) **Melhoramento de plantas**. 6. ed. Viçosa, MG: Editora UFV.

Bowyer JL, Shmulsky R, Haygreen JG (2003) Forest products and wood science. An Introduction. **Blackwell Publishing**. New York.

Brooker MHI, Kleinig DA (2006) **Field guide to *Eucalyptus***. 3. ed. v. 1 Melbourne: Boomings books.

Carneiro ACO, Santos RC, Oliveira AC, Pereira BLC (2013) Conversão direta da madeira em calor e energia. In: Santos F, Colodette JL, Queiroz JH (eds.) **Bioenergia e Biorrefinaria - Cana-de-açúcar e Espécies Florestais**. Viçosa, MG, p. 355–378.

Climate-Data.Org (2024) Dados Climáticos para Luiz Antônio. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

Costa LJ, Trugilho PF, Lima JT, Simetti R, Bastos TA (2017) Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones *Corymbia*. **Scientia Forestalis** 45:629-639. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n116.04>. Acesso em: 15 jul. 2025.

Cruz CD, Carneiro PCS (2003) **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV. 579p.

Cruz CD, Carneiro PCS, Regazzi AJ (2014) **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. v. 2. 3. ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária.

Eldridge K, Davidson J, Harwood C, Van Wyk G (1993) ***Eucalypt* domestication and breeding**. New York: Oxford University Press.

Estopa RA, Milagres RF, Gomes FJB, Amaral CAS (2017) Caracterização química da madeira de *Eucalyptus benthamii* por meio de espectroscopia NIR. **O PAPEL**. vol. 78, num. 2, pp. 75 – 81.

Fabozzi A, Cerciello F, Senneca O (2025) Direct reduction of iron ore using biomass biochar: Reduction rate, microstructural and morphological analysis. **Fuel**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236124031260?via%3Dihub>. Acesso em: 05 out. 2025.

Falconer DS, Mackay TFC (1996) **Introduction to quantitative genetics**. 4. ed. Longman.

Figueiró CG, Carneiro ACO, Santos GR, Carneiro APS, Fialho LF, Magalhães MA, Silva CMS, Castro VR (2019) Caracterização do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife 14:e5659. Disponível em: <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i3a5659>. Acesso em: 11 jul. 2025.

Flores TB, Alvares CA, Souza VC, Stape JL (2016) **Eucalyptus no Brasil: Zoneamento climático e guia para identificação**. Piracicaba: IPEF. 448p.

Fonseca SM, Resende MDV, Alfenas AC, Guimarães LMS, Assis TF, Grattapaglia D (2010) **Manual prático de Melhoramento genético do eucalipto**. Viçosa: UFV. 200p.

Frederico PGU (2009) **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Garcia CH (1989) Tabelas para classificação do coeficiente de variação. **Circular Técnica IPEF**, n 171. Piracicaba: IPEF.

Hamilton MG, Raymond CA, Harwood CE, Potts BM (2009) Genetic variation in *Eucalyptus nitens* pulpwood and wood shrinkage traits. **Tree Genetics & Genomes** 5:307-316. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11295-008-0179-4>. Acesso em: 15 jul. 2025.

IBÁ (2017) Relatório Anual 2017. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/05/iba-relatorioanual2017.pdf>. Acesso em: 05 out. 2025.

IBÁ (2023) Relatório Anual 2023. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/05/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 05 out. 2025.

IBÁ (2024) Relatório Anual 2024. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/05/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2025.

IBÁ (2025) Relatório Anual 2025. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf> Acesso em: 17 out. 2025.

IPCC (2022) Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 05 out. 2025.

Kaiser HF (1961) A note on guttman's lower bound for the number of common factors. **British Journal of Statistical Psychology** 14:1-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1961.tb00061.x>.

Martins MP, Benício EL, Dias Junior AF, Almeida RB, Carvalho AM, Yamaji FM (2016) Produção e avaliação de briquetes de finos de carvão vegetal compactados com resíduos celulósico proveniente da indústria de papel e celulose. **Revista Árvore** 40:173-180. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000100019>.

Mojena R (1977) Hierarchical grouping methods and stopping rules: an evaluation. **The Computer Journal** 20:359-363. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/comjnl/20.4.359>.

Morais SAL, Nascimento EA, Melo DC (2005) Análise da madeira de *Pinus oocarpa*. Parte I Estudos dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, Viçosa, MG 29:461-470.

Oda S, Menck ALM, Vencovsky R (1989) Problemas no melhoramento genético clássico do *Eucalypto* em função da alta intensidade de seleção. **IPEF**, Piracicaba 41/42:8-17.

Oliveira AC, Carneiro ACO, Vital BR, Almeida W, Pereira BLC, Cardoso MT (2010) Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis** 38:431-439. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr87/cap10.pdf>.

Oliveira AC, Ramos DC, Pereira BLC, Carneiro ACO (2020) Carbonization temperature and charcoal properties at different positions in rectangular kiln. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 15:e8493. Disponível em: <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8493>.

Paula RC, Borges RCG, Pires IE, Barros NF, Cruz CD (1996) Estimativas de parâmetros genéticos em famílias de meios-irmãos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. I - Características de crescimento e densidade básica da madeira. **Revista Árvore** 20:309-317.

Pereira JCD, Sturion JA, Higa AR, Higa RCV, Shimizu JY (2000) **Características da madeira de algumas espécies de eucalypto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas. (Documentos, 38). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/297469/1/doc38.pdf>.

Pereira BLC, Carvalho AMML, Oliveira AC, Santos LC, Carneiro ACO, Magalhães MA (2016) Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria 26:545-557.

Ramos DC, Carneiro ACO, Siqueira HF, Oliveira AC, Pereira BLC (2023) Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* com idades entre 108 e 120 meses. **Ciência Florestal** 33:e48302. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509848302>. Acesso em: 11 jul. 2025.

R Core Team (2025) R: A language and environment for statistical computing. Versão 4.4.1 Patched. [Software]. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 17 ago. 2025.

Resende MDV, Dias LAS (2000) Aplicação da metodologia de modelos mistos (REML/BLUP) na estimação de parâmetros genéticos e predição de valores genéticos em espécies frutíferas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 44-52.

Resende MDV (1995) Delineamento de experimentos de seleção para maximização da acurácia seletiva e do progresso genético. **Revista Árvore** 19:479-500.

Resende MDV (2007) **SELEGEN-REML/BLUP**: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Colombo: Embrapa Florestas, 259 p.

Rowell RM, Pettersen R, Han JS, Rowell JS, Tshabalala MA (2005) Cell wall chemistry. In: ROWELL, R. M. (Ed). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. New York: Editora Taylor & Francis Group, Cap. 3.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Cunha TJF, Oliveira JB (2018) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa.

Silva JC, Matos JLM, Oliveira JTS, Evangelista WV (2005) Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore** [online]. vol.29, n.3, p.455-460.

Silva LFF (2020) **Análise da qualidade do carvão vegetal produzido a partir dos resíduos do manejo florestal Sustentável no estado do Pará, para fins siderúrgicos**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Federal do Paraná, Palotina. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/70172>. Acesso em: 10 jul. 2025.

Silva FP, Silva MDD, Brune A, Arnhold A (2007) Avaliação do desempenho inicial de procedências de *Eucalyptus tereticornis* Smith no Vale do Rio Doce-MG. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza 38:270-275.

Soares CPB, Paula Neto F, Souza AL (2006) **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: UFV. 272 p.

STATSOFT (2024) **STATISTICA**: Data analysis software system. Version 7. Disponível em: <http://www.statsoft.com/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

Trugilho PF, Melo ICNA, Protásio TP, Araújo ACC, Hein PRG (2015) Efeito da idade e material genético no rendimento e qualidade do carvão vegetal de eucalipto. **Ciência da Madeira** 6:202-216.

Vital BR (1984) **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa: SIF. (Boletim técnico, 1).

Vital BR, Carneiro ACO, Pereira BLC (2013) Qualidade da madeira para fins energéticos. In: Santos F, Colodette JL, Queiroz JH (eds.) **Bioenergia e Biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, MG, p. 321-354.

Wang L, Wang G, Xu R, Ning X, Zhang J, Guo X, Jiang C, Wang C (2023) Life cycle assessment of blast furnace ironmaking processes: a comparison of fossil fuels and biomass hydrochar applications. **Fuel** 345:128138. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236123007512>. Acesso em: 05 out. 2025.

Williams ER, Matheson AC, Harwood CE (2002) **Experimental design and analysis for tree improvement**. 2. ed. Collingwood: CSIRO Publishing. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/9780643090132>. Acesso em: 07 ago. 2025.

Zanatto B. (2019) Divergência genética entre progênes de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* Smith para caracteres de crescimento e de tecnológicos da madeira. 52 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Genética e Melhoramento de Plantas). Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/9d4bbe84-e861-493c-af58-47ec1dbc061b/content>. Acesso em: 17 out. 2025.

Zanatto B, Paula RC, Paula NF, Freitas MLM, Araújo MJ (2020) Divergência genética entre progênes de polinização aberta de *Eucalyptus tereticornis* Smith para caracteres de crescimento e de qualidade da madeira. **Scientia Forestalis** 48:e3327. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.15>. Acesso em: 11 dez. 2024.