

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

ENGENHARIA FLORESTAL

Qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii* e *Qualea selloi* nativas da Floresta Estacional Semidecidual

WARLLEY DAVISOM BARROSO DE SOUZA



Warley Davisom Barroso de Souza

Qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii* e *Qualea selloi* nativas da Floresta Estacional Semidecidual

Trabalho de Conclusão de Curso II (TCCII) apresentado ao curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Minas Gerais, *Campus* de Montes Claros, como requisito avaliativo parcial da disciplina TCC II e obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador (a): Prof.^a Dr.^a Talita Baldin

Montes Claros

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ICA - COLEGIADO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA/TCC

Aos vinte e três dias do mês de janeiro de 2025, às 14h10min, o/a estudante Warley Davisom Barroso de Souza, matrícula 2019089526, defendeu o Trabalho intitulado “ Qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii* e *Qualea selloi* nativas da floresta estacional semidecidual.” tendo obtido a média (88,00).

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 88,00 (oitenta e oito)

Orientador(a): Talita Baldin

Nota: 88,00 (oitenta e oito)

Examinador(a): Edy Eime Pereira Baraúna

Nota: 88,00 (oitenta e oito)

Examinador(a): Sâmara Magdalene Vieira Nunes



Documento assinado eletronicamente por **Talita Baldin, Professora do Magistério Superior**, em 23/01/2025, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edy Eime Pereira Barauna, Membro**, em 27/01/2025, às 15:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sâmara Magdalene Vieira Nunes, Usuário Externo**, em 27/01/2025, às 17:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3906735** e o código CRC **EDFAA229**.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

RESUMO

O Brasil destaca-se como o maior produtor mundial de carvão vegetal, devido à alta demanda de carvão pela siderurgia. No entanto, ainda há um grande gargalo relacionado às propriedades do carvão vegetal, uma vez que a sua qualidade é diretamente influenciada pelo material de origem. Diante disso, pesquisas sobre as propriedades da madeira provenientes de espécies alternativas tornam-se essenciais para o aprimorar a qualidade do produto e atender as exigências do setor siderúrgico. Nesse contexto, o presente trabalho analisou as propriedades físicas e anatômicas da madeira de três espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual do Cerrado Mineiro (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbr., *Cupania ludowigii* Sommer & Ferrucci e *Qualea selloi* Warm) e avaliou a qualidade do carvão vegetal produzido a partir dessas espécies para uso siderúrgico. Foram analisadas as propriedades físicas da madeira, incluindo densidade básica e teor de umidade, além das propriedades anatômicas, como biometria das fibras e vasos. Nas análises da madeira, a *Apuleia leiocarpa* apresentou uma densidade de 0,615 g/cm³ e umidade de 8,19%, enquanto a *Cupania ludowigii* registrou densidade de 0,631 g/cm³ e umidade de 7,04%. A *Qualea selloi* destacou-se com densidade de 0,638 g/cm³ e umidade de 8,68%. Em relação às fibras, *Apuleia leiocarpa* apresentou comprimento de 998,22 µm e espessura da parede de 3,18 µm, *Cupania ludowigii* registrou 1121,27 µm de comprimento e 3,10 µm de espessura, enquanto *Qualea selloi* obteve 1023,69 µm de comprimento e 3,82 µm de espessura da parede. Os tamanhos médios dos vasos foram 241,69 µm para *Apuleia leiocarpa*, 455,50 µm para *Cupania ludowigii* e 247,00 µm para *Qualea selloi*. Nas análises do carvão vegetal, foram mensurados o rendimento gravimétrico, o índice de quebra, o teor de umidade e a densidade relativa aparente. O rendimento gravimétrico foi de 37,66% para *Apuleia leiocarpa*, 33,59% para *Cupania ludowigii* e 39,71% para *Qualea selloi*. O índice de quebra foi de 35,13% para *Apuleia leiocarpa*, 81,36% para *Cupania ludowigii* e 35,04% para *Qualea selloi*. O teor de umidade do carvão foi de 4,76% (*Apuleia leiocarpa*), 5,33% (*Cupania ludowigii*) e 6,24% (*Qualea selloi*). Para a densidade relativa aparente, os valores obtidos foram 0,1007 g/cm³ (*Apuleia leiocarpa*), 0,3371 g/cm³ (*Cupania ludowigii*) e 0,3301 g/cm³ (*Qualea selloi*). Dentre as espécies a *Qualea selloi* demonstrou a maior aptidão para a produção de carvão vegetal, destacando-se pela alta densidade básica, maior rendimento gravimétrico e menor índice de quebra, proporcionam um carvão de alta qualidade, adequado às exigências da siderurgia.

Palavras-chave: Propriedades físicas da madeira, carbonização, siderurgia, combustível renovável, cerrado.

ABSTRACT

Brazil stands out as the world's largest producer of charcoal due to the high demand from the steel industry. However, a major challenge remains regarding the properties of charcoal, as its quality is directly influenced by the raw material. In this context, research on the properties of wood from alternative species is essential to improve product quality and meet the requirements of the steel sector. This study analyzed the physical and anatomical properties of the wood from three native species of the Seasonal Semideciduous Forest in the Cerrado Mineiro region (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbr., *Cupania ludowigii* Sommer & Ferrucci, and *Qualea selloi* Warm) and evaluated the quality of the charcoal produced from these species for steelmaking applications. The physical properties analyzed included basic density and moisture content, while anatomical properties involved fiber and vessel biometrics. In the wood analyses, *Apuleia leiocarpa* showed a density of 0.615 g/cm³ and a moisture content of 8.19%, while *Cupania ludowigii* recorded a density of 0.631 g/cm³ and a moisture content of 7.04%. *Qualea selloi* stood out with a density of 0.638 g/cm³ and a moisture content of 8.68%. Regarding fiber properties, *Apuleia leiocarpa* had a fiber length of 998.22 μm and a wall thickness of 3.18 μm, *Cupania ludowigii* showed a fiber length of 1121.27 μm and a wall thickness of 3.10 μm, while *Qualea selloi* presented a fiber length of 1023.69 μm and a wall thickness of 3.82 μm. The average vessel diameters were 241.69 μm for *Apuleia leiocarpa*, 455.50 μm for *Cupania ludowigii*, and 247.00 μm for *Qualea selloi*.

For the charcoal analyses, gravimetric yield, breakage index, charcoal moisture content, and apparent relative density were measured. The gravimetric yield was 37.66% for *Apuleia leiocarpa*, 33.59% for *Cupania ludowigii*, and 39.71% for *Qualea selloi*. The breakage index was 35.13% for *Apuleia leiocarpa*, 81.36% for *Cupania ludowigii*, and 35.04% for *Qualea selloi*. The charcoal moisture content was 4.76% (*Apuleia leiocarpa*), 5.33% (*Cupania ludowigii*), and 6.24% (*Qualea selloi*). The apparent relative density values were 0.1007 g/cm³ (*Apuleia leiocarpa*), 0.3371 g/cm³ (*Cupania ludowigii*), and 0.3301 g/cm³ (*Qualea selloi*). Among the species analyzed, *Qualea selloi* demonstrated the greatest suitability for charcoal production, standing out for its high basic density, higher gravimetric yield, and lower breakage index, resulting in high-quality charcoal that meets the requirements of the steel industry.

Keywords: Physical properties of wood, carbonization, steel industry, renewable fuel, savannah.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- EXEMPLAR DE <i>APULEIA LEIOCARPA</i>	11
FIGURA 2- IMAGEM DA ESPÉCIE <i>QUALEA SELLOI</i>	13
FIGURA 3- MÉTODO SEPARATÓRIO DOS DISCOS PARA AS ANÁLISES.....	16
FIGURA 4- DENSIDADE BÁSICA E UMIDADE DA MADEIRA.....	21

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- RAMPA DE AQUECIMENTO NA CARBONIZAÇÃO DE <i>APULEIA LEIOCARPA</i> , <i>CUPANIA LUDOWIGII</i> E <i>QUALEA SELLOI</i>	18
TABELA 2- TESTE DE TUKEY, COM PROBABILIDADE DE A 5%, RELACIONADO A BIOMETRIA DE FIBRAS E VASOS.	21
TABELA 3- TESTE DE TUKEY, COM PROBABILIDADE A 5%, RELACIONADO AS PROPRIEDADES DO CARVÃO.	23
TABELA 4- DADOS UNITÁRIOS DE DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO E TEOR DE UMIDADE DO CARVÃO.	24

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	8
2.OBJETIVOS	9
2.1.Objetivo geral	9
2.2.Objetivos específicos	9
3.REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1.Floresta Estacional Semidecidual (FES)	10
3.2. <i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel). J.F.Macbr	10
3.3. <i>Cupania ludowigii</i> SOMNER & FERRUCCI	11
3.4. <i>Qualea selloi</i> Warm.....	12
3.5.Produção de Carvão vegetal	13
3.6.Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal.....	14
4.MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4.1.Coleta do material vegetal	15
4.2.Análise da madeira.....	16
4.2.1.Densidade básica.....	16
4.2.2.Umidade da madeira.....	16
4.2.3.Biometria de fibras e vasos.....	17
4.3.Carbonização da madeira	17
4.4.Análise do carvão vegetal.....	18
4.4.1.Rendimento gravimétrico	18
4.4.2.Índice de quebra	18
4.4.3.Umidade do carvão	19
4.4.4.Densidade relativa aparente.....	19
4.5.Análise estatística.....	20
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
6.CONCLUSÃO.....	25
7.REFERÊNCIAS.....	26

1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como o maior produtor mundial de carvão vegetal, mantendo uma posição estável ao longo dos anos, apresentando apenas uma leve queda de 3,7% na produção em 2023 (IBÁ, 2024). Esse desempenho é impulsionado principalmente pela grande demanda do setor siderúrgico, que utiliza o carvão vegetal na produção de ferro gusa e aço. Neste contexto, a siderurgia brasileira valoriza o carvão vegetal como combustível e redutor devido às suas qualidades renováveis e sustentáveis, especialmente quando proveniente de florestas manejadas (Passos, 2015; Loureiro *et al.*, 2021). Sendo assim, o carvão vegetal passa a ser uma excelente alternativa para esta indústria, por ser originado de matéria-prima renovável (Silva, 2007). Diante disso, pesquisas sobre as propriedades da madeira e o comportamento da carbonização são de extrema relevância para aprimorar a qualidade do produto.

As propriedades da madeira têm influência direta nas características do carvão vegetal. A elevada umidade torna o carvão mais quebradiço, devido à pressão interna gerada pelo vapor durante o processo de carbonização. A densidade da madeira, que é determinada pela idade, espécie e clima, afeta tanto a densidade do carvão quanto a concentração de carbono fixo. Outros fatores como o teor de umidade, matérias voláteis, carbono fixo e cinzas da madeira impactam os balanços de massa nos processos que utilizam o carvão como redutor (Leandro *et al.*, 2014). A densidade básica é uma propriedade crucial na produção de carvão vegetal, pois valores mais elevados resultam em maior produção de massa de carvão. Essa característica está relacionada às dimensões das fibras, vasos e parênquimas radiais e axiais da madeira (Pereira *et al.*, 2016).

Sendo assim, para que o carvão vegetal apresente boa qualidade, é essencial que possua propriedades como alta densidade relativa, elevado teor de carbono fixo, baixa umidade, baixo teor de materiais voláteis e reduzido teor de cinzas (Rosa *et al.*, 2012). O eucalipto é amplamente utilizado na produção de carvão vegetal devido às suas características favoráveis, que resultam em um produto de maior qualidade (Ramos *et al.*, 2020). Essa ampla utilização também se deve à adaptação da espécie ao clima do país, embora apresente uma alta taxa de mortalidade devido à baixa pluviosidade. Entretanto, com o intuito de contribuir para a diversificação da silvicultura no Brasil, pesquisas sobre vegetação nativa adaptada às condições de déficit hídrico podem identificar demais espécies com potencial para a geração de bioenergia (Araujo *et al.*, 2018).

A diversificação dos planos de manejo com espécies nativas é uma estratégia sustentável de grande relevância, tanto para a conservação da biodiversidade quanto para o aproveitamento

energético. Espécies nativas, adaptadas às condições locais, apresentam maior resiliência a estresses ambientais, como déficit hídrico e pragas, além de reduzirem a dependência de insumos químicos, promovendo maior eficiência nos sistemas produtivos (Silva *et al.*, 2021). Adicionalmente, a inclusão dessas espécies em planos de manejo favorece a regeneração natural das florestas e a manutenção dos serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono e a proteção do solo (Oliveira *et al.*, 2020). Essa abordagem também abre novas oportunidades econômicas, permitindo a exploração sustentável de produtos madeireiros e não madeireiros, além de valorizar a floresta em pé e beneficiar as comunidades locais envolvidas (Ferreira *et al.*, 2019).

Em vistas as necessidades acima respaldadas, o trabalho busca analisar as propriedades físicas e anatômicas da madeira de três espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual (*Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii* e *Qualea selloi*), e a qualidade do carvão vegetal gerado para o uso siderúrgico, uma vez que as famílias dessas espécies (Fabaceae, Sapindaceae e Vochysiaceae) contribuem de maneira significativa para o setor madeireiro, fornecendo espécies arbóreas que atendem a diversas necessidades da indústria, desde a produção de madeira para construção até a fabricação de móveis e outros produtos (Silva, 2008).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii* e *Qualea selloi* nativas da Floresta Estacional Semidecidual.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar propriedades físicas e anatômicas das espécies avaliadas (*Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii*, e *Qualea selloi*).
- Comparar a qualidade dos carvões nativos das espécies deste estudo com às exigidas para o carvão siderúrgico.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Floresta Estacional Semidecidual (FES)

A Floresta Estacional Semidecidual é uma tipologia avançada de sucessão ecológica, pertencente ao bioma Mata Atlântica (Ferreira, 2022). Também conhecida como "Mata Seca", caracteriza-se pela possível perda de folhas durante o período de seca. Essa formação florestal é composta por espécies capazes de atingir até 20 metros de altura, predominando na região sudoeste da Mata Sul, incluindo o Agreste (Filho, 2009).

A (FES) é composta por florestas com características variáveis, marcadas por duas estações bem definidas: uma seca e outra chuvosa. Essa alternância resulta de uma intensa estacionalidade foliar, em resposta ao déficit hídrico ou à queda de temperaturas nos períodos mais frios do ano (Mikich, 2000). A precipitação média anual da FES é de 1360 mm, com temperatura média de 18°C. A vegetação dessa área é predominantemente composta por gêneros encontrados na Amazônia, conforme a distribuição brasileira descrita no Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012; Martins *et al.*, 1999).

Apesar de sua importância ecológica, a Floresta Estacional Semidecidual é uma das mais impactadas pela ação humana, principalmente por ser menos priorizada pela legislação ambiental. Desde o século XIX, atividades como caça predatória, expansão da cafeicultura, pecuária e exploração madeireira têm causado degradação significativa, resultando na perda da cobertura florestal (Cruz *et al.*, 2017; Marangon *et al.*, 2007).

3.2 *Apuleia leiocarpa* (Vogel). J.F. Macbr

A *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F. Macbr, também conhecida como Grápia (Figura 1), pertence à família Fabaceae e é nativa do Rio Grande do Sul. Essa árvore pode atingir até 100 cm de DAP (diâmetro à altura do peito) e alcançar 35 metros de altura (Felippi, 2012). A Grápia é uma árvore caducifólia, com tronco irregular e cilíndrico, podendo formar sapopemas basais. Sua ramificação é cimosa a simpódica, com folhas alternadas e compostas imparipinadas. A espécie apresenta sistema sexual monóico, com floração variando conforme o estado: em Minas Gerais, ocorre entre outubro e novembro; no Paraná, de agosto a outubro; e no Rio Grande do Sul, de setembro a outubro. A frutificação também varia de acordo com a região, e sua dispersão é realizada pelo vento (anemocoria). A Grápia se adapta a locais elevados e secos, com uma

necessidade de precipitação média anual variando entre 850 mm e 2900 mm, dependendo da região, conforme (Carvalho, 2003).

A Grápia possui madeira densa, com densidade variando entre 0,67 e 0,75 g/cm³, e apresenta crescimento lento a moderado. A espécie demonstra baixa resistência contra cupins e seca, sendo moderada quanto ao apodrecimento e com baixa resistência ao ataque de fungos. A madeira é difícil de secar, sendo recomendado o processo de secagem ao ar livre e de forma lenta. Devido ao alto teor de lignina, a Grápia é considerada uma boa opção para a produção de carvão, coque e álcool (Carvalho, 2003).

Figura 1- Exemplar de *Apuleia leiocarpa*



Fonte: Igor Augusto Goettens, 2022.

3.3 *Cupania ludowigii* SOMNER & FERRUCCI

A *Cupania ludowigii* SOMMER & FERRUCCI, também conhecida como Tapirira pertence à família Sapindaceae. Esta espécie é nativa e endêmica do Brasil, com distribuição geográfica nas regiões sudeste e nordeste, e se encontra predominantemente na Mata Atlântica, compondo a vegetação da Floresta Estacional Semidecidual, florestas ombrófilas e áreas antrópicas. O caule apresenta um indumento ramoso, e suas flores possuem sépalas com

indumento pubescente, discos nectaríferos glabros e folhas compostas por 2 a 17 folíolos com consistência subcoriácea (Flora do Brasil, 2014).

Em um estudo voltado para a identificação da espécie, a *Cupania ludowigii* é descrita como uma árvore que pode atingir de 3 a 6 metros de altura. Frequentemente é confundida com a *C. emarginata cambess*, devido à semelhança nas folhas (Miloski, 2017). Contudo, essas espécies podem ser diferenciadas na floresta por características como folíolos de margem inteira e revoluta, domácias foveoladas e cápsula obtriangular, fortemente comprimida lateralmente (Perdiz, 2014).

A *Cupania ludowigii* é também destacada por sua grande capacidade de recolonizar áreas impactadas, utilizando a rebrota tanto do caule quanto das raízes (Garcia *et al.*, 2016). Os autores ressaltam a importância da espécie em áreas afetadas por perturbações, como o corte raso da cobertura florestal, que pode ter ocorrido no passado em determinadas regiões da reserva.

3.4 *Qualea selloi* Warm

Também conhecida como Pau-Terra essa espécie é endêmica do Brasil, a *Qualea selloi* Warm é de origem nativa pertencente à família Vochysiaceae, com distribuição geográfica em ocorrência no nordeste e sudeste nos estados da Bahia, Minas Gerais e São Paulo, tendo domínio fitogeográfico no cerrado, e seu tipo de vegetação está relacionado ao campo rupestre, cerrado (*lato sensu*), e floresta estacional semidecidual. A *Qualea selloi* (**Figura 2**), tem porte médio, caule com ramos pubérulos/glabros e folhas com limbo coriáceos, opostas, pecioladas, glabros e pubérulos (Flora do Brasil, 2020).

Em sua pesquisa Sampaio (2017) retrata que a presente espécie possui semelhanças com a *Qualea cordata* var. *Elongata*, porém é possível que se defira através da análise referente a base foliar e pela observação das folhas sendo presente venação impressa na superfície adaxial das folhas.

As madeiras das espécies do gênero *Qualea* são recomendadas no setor de construção civil, construção naval e para utilidades geral, isso devido a sua boa trabalhabilidade a respeito de sua facilidade de tornear, colagem e acabamento. Por tanto existem poucos estudos sobre a madeira dessa espécie, no que faz a necessidade de desenvolvimento de trabalhos que aprofundem estudos anatômicos sobre a espécie (Silva *et al.*, 2021).

Figura 2- Imagem da espécie *Qualea selloi*



Fonte: Thomaz Razo, 2024.

3.5 Produção de Carvão vegetal

Segundo a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency, 2021), após as circunstâncias causadas pela Covid-19 no ano de 2020, houve uma busca intensa pela modificação de recursos de fontes não renováveis como combustíveis de origens fósseis, para produtos renováveis, sendo assim a biomassa uma das principais fontes de tal energia (Silva *et al.*, 2021).

No ano de 2021, os estados de Minas Gerais e Espírito Santo registraram um aumento de 9,4% na produção de carvão vegetal em comparação a 2020, alcançando a marca de 3,6 milhões de toneladas. Esse incremento contribuiu para a redução da emissão de gases pelas siderurgias, um dos principais objetivos ambientais da atualidade, conforme dados do Sindifer/IBÁ (IBÁ, 2022).

O Brasil destaca-se como um dos maiores produtores de aço bruto do mundo, com uma média anual de 51 milhões de toneladas (Instituto Aço Brasil, 2022). O sucesso dessa produção está associado à boa disponibilidade hídrica, condições edafoclimáticas favoráveis e à existência de áreas aptas para o cultivo de madeira destinada à produção de carvão vegetal

(Borges, 2016). Esses fatores, aliados à alta demanda do setor siderúrgico, posicionam o Brasil como um importante produtor no cenário global (Soares, 2014).

Historicamente grande parte da produção de carvão vegetal no Brasil dependia da exploração ilegal de espécies nativas, sendo cerca de 50% da matéria-prima proveniente de florestas naturais. Para enfrentar esse problema, foi implementado um plano de manejo sustentável, que exige melhorias contínuas no uso responsável dos recursos florestais e incentiva o uso de matéria-prima oriunda de fontes renováveis (Costa, 2014).

Dentro do contexto, o desafio atual é encontrar materiais genéticos de elevada densidade básica e que possam produzir carvão vegetal de alta qualidade, visando que os estudos atuais estão voltados para madeiras das espécies do gênero *Eucalyptus* e seus clones, que apresentam baixa densidade básica (Loureiro *et al.*, 2021).

A qualidade do carvão é proveniente do seu material de origem, no qual exige certas características para que seja qualificado adequado ou não, sendo elas maior rendimento gravimétrico, maior densidade básica, uma elevada resistência mecânica encontrada a partir do índice de quebra, extrativos e cinzas, (Soares, 2018).

A estrutura anatômica da madeira é diretamente influenciada pelas características de crescimento da árvore e por sua composição genética. Alterações nessas estruturas podem impactar significativamente sua aplicação industrial, refletindo diretamente na qualidade do material. Entre os principais parâmetros para a análise de qualidade da madeira, destacam-se a densidade, o comprimento e a espessura da parede dos elementos fibrosos. Nesse contexto, recomenda-se que, na seleção de árvores matrizes, além da densidade básica, as características anatômicas dos elementos fibrosos fossem consideradas como indicadores essenciais de qualidade.

3.6 Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal

No Brasil, a produção de florestas energéticas tem como principal objetivo abastecer termelétricas e indústrias que utilizam caldeiras. Contudo, a madeira possui características específicas que impactam diretamente a eficiência da produção, informações relacionadas ao desempenho físico-mecânico (Garcia *et al.*, 2014).

Para a análise do carvão vegetal, é fundamental compreender o processo de carbonização, que está diretamente relacionado à decomposição térmica de componentes como lignina, celulose e hemicelulose. Esse processo, conhecido como pirólise lenta, é influenciado

pela temperatura final de carbonização, a qual desempenha um papel crucial na determinação do teor de carbono fixo (Soares *et al.*, 2014).

A avaliação das propriedades da madeira exerce influência direta em seu uso comercial. Dentre essas propriedades, destaca-se a densidade básica, devido à sua relação com as características físicas, mecânicas e energéticas do xilema secundário, além da facilidade de determinação em condições de laboratório. A densidade básica está intimamente ligada à produção de energia, pois níveis mais elevados de densidade resultam em maiores quantidades de energia armazenada por metro cúbico (Lima *et al.*, 2020).

As características anatômicas da madeira, como as dimensões dos vasos e fibras, desempenham papel crucial em processos fisiológicos e na sustentação mecânica das folhas. Entre os parâmetros avaliados nas fibras, destacam-se o comprimento, a largura, o diâmetro do lumen e a espessura da parede. A espessura da parede das fibras está diretamente relacionada à densidade da madeira, apresentando variações semelhantes ao padrão de densidade entre e dentro das árvores. Essas propriedades anatômicas influenciam diretamente a qualidade e o uso comercial da madeira (Talgatti *et al.*, 2020).

Estudos anatômicos e das propriedades de madeiras ainda pouco exploradas são essenciais para identificar espécies, ampliar conhecimentos fisiológicos e ecológicos e orientar seu uso em aplicações específicas. Essas pesquisas são particularmente importantes devido à heterogeneidade da madeira (Junior *et al.*, 2010).

4 MATERIAL E MÉTODOS

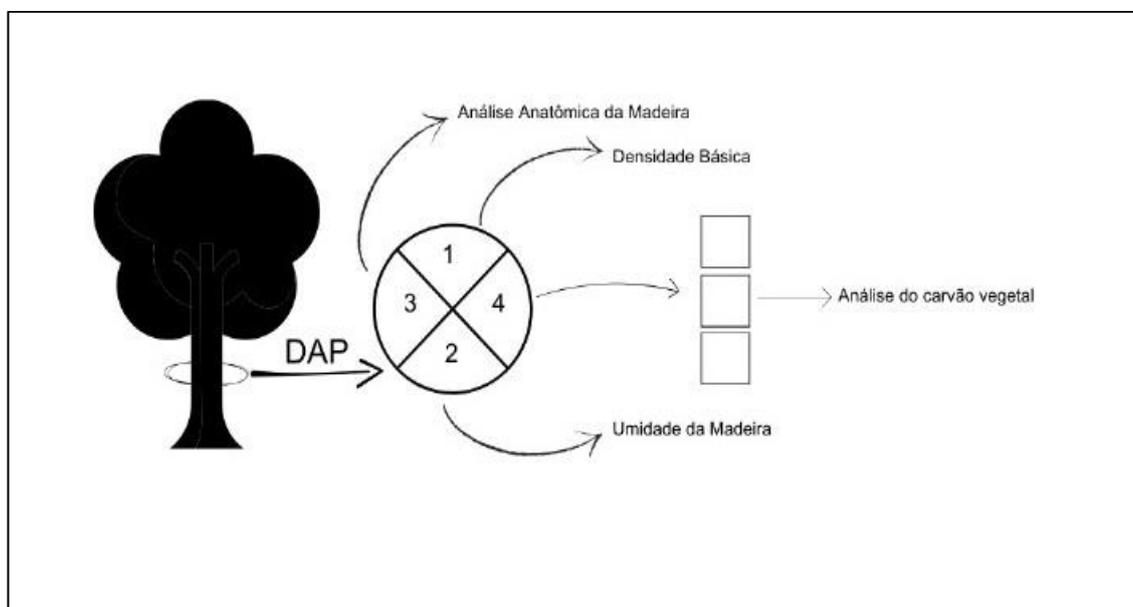
4.1 Coleta do material vegetal

As espécies foram coletadas em vegetação de Floresta Estacional Semidecidual: *Apuleia leiocarpa*, 18°51'39.6"S 43°23'52.6"W, Itapanhoacanga, Alvorada de Minas – MG, *Cupania ludowigii*, 18°51'21.06"S 43°24'33.948"W, Itapanhoacanga, Alvorada de Minas – MG e a *Qualea selloi*, 18°53'34.3"S 43°25'42.1"W, São Sebastião do Bom Sucesso, Conceição do Mato Dentro – MG.

A madeira foi coletada através do método destrutivo, com o corte de três árvores e retirada de um disco na região do DAP (Diâmetro à Altura do Peito). Para cada disco foram confeccionadas 4 cunhas conforme (**Figura 3**), para posteriores análises físicas de densidade

básica, umidade e anatômicas, como biometria das fibras e vasos. Outra porção do disco foi utilizada para carbonização em forno mufla.

Figura 3- Método separatório dos discos para as análises.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Análise da madeira

4.2.1 Densidade básica

A densidade básica foi encontrada de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003) em que foi preciso submergir as cunhas em água até alcançar o ponto de saturação das fibras para definir o volume verde. Depois, foi necessário pesá-lo em uma balança analítica e colocar em estufa ($105 \pm 2^\circ$), até que o peso se estabilizasse. Dessa forma, foi possível fazer a relação da massa seca em estufa pelo respectivo volume verde da madeira acima do ponto de saturação das fibras, sendo expresso pela seguinte equação:

$$Db(\text{g/cm}^3) = \frac{M}{V}$$

Onde: Db= Densidade básica (g/cm^3); M= Massa seca (g) ; V= volume verde (cm^3)

4.2.2 Umidade da madeira

Para encontrar a umidade da madeira foi utilizada a NBR 14929 (ABNT, 2017), no qual se estabeleceu a relação da massa de água de uma amostra e sua massa original antes da secagem em estufa a (105 ± 2) °C, até a massa constante. As amostras foram pesadas com uma balança analítica.

Os cálculos do teor de umidade foram obtidos a partir da seguinte equação:

$$U\% = \left(\frac{MU - MS}{MS} \right) \times 100$$

Visando-se que: U= Umidade da madeira (%); MU: massa úmida (g); MS= massa seca (g).

4.2.3 Biometria de fibras e vasos

A análise biométrica de fibras e vasos ocorreu através de lâmina de macerados, realizadas conforme descrito em “Técnicas para Microscopia da Madeira” (Mady, 2007), no qual estabelece que após as laminas de macerado estarem prontas, são levadas para o microscópio conectado a um computador, e com auxílio de software realizou-se a mensuração de 25 fibras e vasos, as variáveis mensuradas foram: comprimento da fibra (μm) determinado pela distância de uma extremidade à outra da célula, visto no aumento de 10x. O diâmetro da célula (μm) definido pela distância de um lado ao outro da célula, na região mediana do comprimento da fibra, visto com o aumento de 40x. O diâmetro do lúmen(μm) foi mensurado a distância de uma parede celular à outra, tomado na região mediana do comprimento da fibra, visto em um aumento de 40x. Por fim a espessura da parede (μm), foi obtida através do cálculo $[(\text{Diâmetro da célula} - \text{Diâmetro do lúmen}) / 2]$. Para os vasos foram mensurados os seus comprimentos visto com aumento de 10x.

4.3 Carbonização da madeira

Três cunhas de madeira de cada espécie foram carbonizadas em forno elétrico laboratorial do tipo mufla. A temperatura inicial do processo foi de 100°C com rampa de aquecimento de 50°C a cada 30 minutos e temperatura final de 450 °C (**Tabela 1**), conforme recomendação de Truguilho *et al.* (2005). Após a carbonização das amostras foi possível determinar as propriedades físicas do carvão.

Tabela 1- Rampa de aquecimento na carbonização de *Apuleia leiocarpa* , *Cupania ludowigii* e *Qualea selloi*.

Temperatura °C	Tempo (minutos)
100	30
150	30
200	30
250	30
300	30
350	30
400	30
450	60
Total	270

4.4 Análise do carvão vegetal

4.4.1 Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico foi determinado a partir da relação do peso do carvão vegetal e o peso da madeira antes de ser carbonizada. O peso foi obtido com o auxílio de uma balança analítica de precisão, sendo expresso pela seguinte equação:

$$Rgc = \frac{P \text{ carvão}}{P \text{ madeira}} \times 100$$

Onde: Rgc= rendimento gravimétrico de carvão (%); Pcarvão= peso seco do carvão produzido (g); Pmadeira= peso seco da madeira enfiada (g).

4.4.2 Índice de quebra

Para realização do cálculo do índice de quebra, foram selecionados os três corpos de prova carbonizados para cada uma das espécies, onde cada corpo de prova foi submetido a três

quedas livres de uma altura de 1,83 metros, sendo o peso do mais fragmento restante de cada corpo de prova anotado. O procedimento aconteceu conforme a NBR 7416 (ABNT, 1984). Para encontrar o índice de quebra foi utilizado a seguinte equação:

$$IQ\% = \left(1 - \frac{Pf}{PF}\right) \times 100$$

Onde: IQ= índice de quebra (%); Pf= peso do fragmento após o ensaio (g); PF= peso carvão antes do ensaio (g).

4.4.3 Umidade do carvão

O teor de umidade média do carvão vegetal (TUC) foi analisado conforme a Norma NBR 14929 (ABNT, 2003), onde foi realizada a mensuração do peso do carvão úmido. Logo após, as amostras foram secas em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante um determinado período. Após a secagem, as amostras foram levadas a estufa e obteve-se o peso seco. O TUC foi determinado através da relação entre a massa do carvão úmido e a massa do carvão seco. Os cálculos do teor de umidade foram obtidos a partir da seguinte equação:

$$UC\% = \frac{MC1 - MC2}{MC2} \times 100$$

Onde: UC%= Umidade do carvão vegetal (%); MC1= massa do carvão úmido (g); M2= massa do carvão seco (g).

4.4.4 Densidade relativa aparente

A Densidade Relativa Aparente foi medida conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 11941 (ABNT, 2003). As amostras foram previamente pesadas e, em seguida, submersas em um recipiente cheio de água por 15 minutos. Após este processo, a água deslocada foi coletada por meio de um orifício localizado na extremidade do recipiente. Depois da retirada do carvão da água, o material foi deixado em repouso por 2 minutos. Em seguida, foi realizada a mensuração do peso do carvão umedecido e do volume de água deslocada. Os cálculos foram efetuados utilizando a seguinte equação:

$$Da(g/cm^3) = \frac{Pcs}{[Pad + (Pcm - Pcs)]}$$

Onde: D_a = densidade relativa aparente do carvão (g/m^3); P_{cs} = massa do carvão seco, após passar pela estufa (kg); P_{ad} = peso de água deslocada (g); P_{cm} = peso do carvão úmido (g/cm^3).

4.5 Análise estatística

A qualidade da madeira foi avaliada por meio das variáveis densidade básica e teor de umidade, analisadas com base em dados individuais. Para a biometria de fibras e vasos, aplicou-se um teste de comparação de médias entre as variáveis comprimento de fibras, diâmetro total, diâmetro do lúmen e espessura da parede, utilizando 25 repetições.

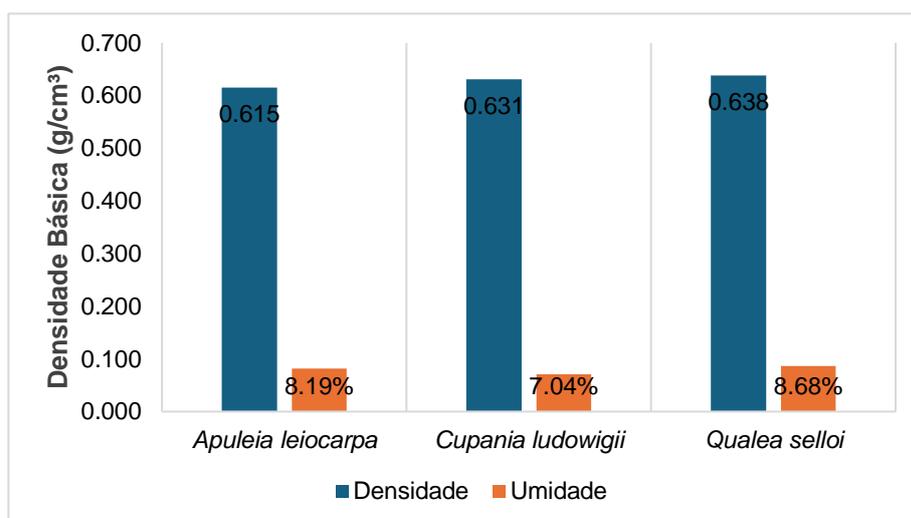
A umidade e a densidade relativa aparente do carvão foram determinadas a partir de análises individuais. Já o rendimento gravimétrico e o índice de quebra foram avaliados por meio de um teste de comparação de médias, considerando três tratamentos – as espécies *Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii* e *Qualea selloi* – e três repetições, correspondentes às amostras de madeira carbonizadas e ensaiadas. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias comparadas pelo teste de Tukey, adotando um nível de significância de 5%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de densidade básica e umidade (Figura 4) apresentaram pouca variação entre si. A densidade das amostras foi superior aos valores exigidos pela siderurgia, que variam entre 0,500 e 0,550 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, conforme os encontrados em clones de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus camaldulensis* × *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade (Pereira et al., 2016). Entre as espécies analisadas, *Qualea selloi* apresentou a maior densidade, seguida por *Cupania ludowigii*. Já *Apuleia leiocarpa* registrou um valor mais próximo ao exigido pelas siderurgias, porém inferior ao das demais espécies.

A densidade pode ser considerada uma das propriedades físicas mais relevantes, pois está diretamente relacionada à produção em massa e à resistência mecânica do material (Pereira et al., 2000; Trugilho et al., 2001; Pereira et al., 2012). No entanto, valores muito elevados podem ser inviáveis, pois dificultam o processo de carbonização.

Figura 4- Densidade básica e umidade da madeira.



As espécies analisadas apresentaram variação quanto à umidade da madeira. *Qualea selloi* registrou o maior teor de umidade (8,68%), seguida por *Apuleia leiocarpa* (8,19%). Já *Cupania ludowigii* apresentou o menor valor, com 7,04%. Essa última espécie se destaca justamente por esse menor teor de umidade, característica associada ao fato de que teores mais elevados favorecem a formação de partículas finas no carvão. Esse efeito ocorre porque, durante o aquecimento, a liberação de vapor d'água gera pressão interna, resultando em fissuras tanto internas quanto externas na estrutura do carvão. Essas fissuras tornam o material mais vulnerável a danos e quebras durante o manuseio (Soares, 2018).

Os resultados obtidos por meio do teste de Tukey, com nível de significância de 5%, relacionado à biometria de fibras e vasos, estão apresentados na Tabela 2. Todos os parâmetros, com exceção da espessura da fibra e dos vasos, apresentaram efeito significativo a 5% no teste de variância. Além disso, os dados atenderam aos pressupostos estatísticos de normalidade e homogeneidade.

Tabela 2- Teste de tukey, com probabilidade de a 5%, relacionado a biometria de fibras e vasos.

Espécie	Comprimento de Fibras (µm)	Diâmetro Total (µm)	Diâmetro do Lúmen(µm)	Espessura da parede (µm)	Comprimento de Vasos (µm)
<i>Apuleia leiocarpa</i>	998,22 b	14,17 c	7,79 c	3,18 b	241,69 b
<i>Cupania ludowigii</i>	1121,27 a	20,62 a	14,40 a	3,10 b	455,50 a
<i>Qualea selloi</i>	1023,69ab	18,07 b	10,41 b	3,82 a	247,00 b

A *Cupania ludowigii* apresentou os maiores valores para comprimento de fibras, diâmetro do lúmen, diâmetro total do lúmen e comprimento de vasos. Já *Apuleia leiocarpa* registrou os menores valores, enquanto *Qualea selloi* ocupou a segunda posição em relação ao comprimento de fibras. Fibras mais longas estão associadas a uma maior resistência mecânica do carvão vegetal, tornando-o mais robusto e menos suscetível a quebras durante o manuseio e transporte (Soares, 2018).

Madeiras do gênero *Eucalyptus* utilizadas para produção de carvão vegetal apresentam comprimentos de fibras entre 700 μm e 1300 μm , conforme descrito por Silva *et al.* (2005). Para a espessura da parede celular, esses valores chegam a 4,55 μm (Talgatti *et al.*, 2020). Considerando os comprimentos das fibras, as espécies avaliadas podem ser consideradas aptas para a produção de carvão vegetal.

Fibras com lumens maiores podem influenciar a porosidade do carvão, afetando sua densidade e, conseqüentemente, seu poder calorífico. Dessa forma, madeiras com lumens menores tendem a produzir carvões com maior densidade aparente, característica desejável para aplicações que exigem maior energia por unidade de volume, como a siderurgia (Pereira *et al.*, 2016). *Cupania ludowigii* apresentou os maiores valores em relação às fibras, mas densidade inferior à de *Qualea selloi*, conforme indicado na Figura 3.

A análise dos vasos revelou diferenças estatisticamente significativas entre as espécies. Essas dimensões podem estar correlacionadas aos comprimentos transversais, sendo que vasos mais longos, como os observados em *Cupania ludowigii*, resultam em maior presença de espaços vazios e menor quantidade de material lenhoso. Para a produção de carvão vegetal, o ideal é que os vasos tenham menor tamanho e menor frequência por mm^2 , evitando espaços internos sem material lenhoso. Vasos maiores não contribuem para o rendimento gravimétrico e podem comprometer a qualidade final do carvão (Baldin, 2015; Lima *et al.*, 2021). Essa pode ser uma das razões pelas quais *Cupania ludowigii* apresentou densidade inferior à de *Qualea selloi*.

A anatomia da madeira influencia diretamente suas características físicas, especialmente a densidade básica. A maior densidade básica de *Qualea selloi* está relacionada à sua maior espessura de parede das fibras (3,82 μm). Fibras com paredes mais espessas resultam em maior compactação da madeira, favorecendo a obtenção de um carvão vegetal com maior densidade aparente e resistência mecânica, propriedades desejáveis para aplicações industriais (Pereira *et al.*, 2016).

Embora *Cupania ludowigii* tenha uma densidade ligeiramente inferior à de *Qualea selloi*, seus vasos apresentam maior comprimento (455,50 μm). Vasos mais longos podem

reduzir a densidade da madeira devido ao aumento da porosidade. No entanto, essa característica pode facilitar a liberação de gases durante a carbonização, afetando o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão produzido (Soares, 2018).

Já *Apuleia leiocarpa*, que apresentou a menor densidade entre as espécies avaliadas (0,61 g/cm³), tende a produzir carvões com menor resistência mecânica. Isso se deve às suas fibras mais curtas e paredes celulares mais finas, fatores que influenciam negativamente a densidade e a resistência do carvão (Oliveira *et al.*, 2021). Para a análise das propriedades do carvão, constatou-se que as variáveis rendimento gravimétrico e índice de quebra apresentaram efeitos significativos na análise de variância, conforme indicado pelo teste de Tukey a 5% (Tabela 3).

Tabela 3- Teste de tukey, com probabilidade a 5%, relacionado as propriedades do carvão.

Espécies	Rendimento Gravimétrico (%)	Índice de quebra(%)
<i>Apuleia leiocarpa</i>	37,66 a	35,13 b
<i>Cupania ludowigii</i>	33,59 b	81,36 a
<i>Qualea selloi</i>	39,71 a	35,04 b

Em relação ao rendimento gravimétrico do carvão vegetal, *Apuleia leiocarpa* apresentou um valor de 37,66%, estatisticamente semelhante ao de *Qualea selloi* e superior ao de *Cupania ludowigii*. Esses resultados indicam que a estrutura anatômica da madeira de *Apuleia leiocarpa*, com densidade intermediária e fibras mais espessas, favorece a produção de um carvão vegetal de maior qualidade, com menor fragilidade. Estudos demonstram que madeiras com essas características anatômicas tendem a gerar carvões com alta resistência mecânica e baixo índice de quebra (Pereira *et al.*, 2016).

A madeira de *Cupania ludowigii* apresentou os maiores comprimentos de fibras, porém menor rendimento gravimétrico e o maior índice de quebra. Esse desempenho está correlacionado ao comprimento dos vasos, que foi significativamente maior em comparação às demais espécies. Vasos de grande diâmetro podem resultar em menor resistência mecânica do carvão vegetal, pois madeiras com essa característica tendem a formar estruturas menos compactas e mais propensas à fragmentação durante o transporte e o manuseio (Soares, 2018).

Qualea selloi destacou-se por apresentar o maior rendimento gravimétrico (39,71%) e o menor índice de quebra (35,04%). A alta densidade da madeira, associada à espessura das paredes das fibras, contribui para a produção de um carvão com maior compactação e resistência mecânica. Resultados semelhantes foram observados por Santos *et al.* (2016) em

quatro espécies de clones híbridos de *Eucalyptus* (três de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* e um de *Eucalyptus camaldulensis* × *Eucalyptus grandis*), ressaltando a importância da densidade e das características anatômicas da madeira para a produção de carvão vegetal de qualidade e alta eficiência.

Um dos principais desafios na pesquisa sobre carvão vegetal é o aumento da taxa de rendimento gravimétrico, que depende tanto das características da madeira de cada espécie quanto do processo de carbonização. À medida que esse rendimento aumenta, eleva-se o potencial de produção do carvão. De acordo com os valores encontrados na literatura e os requisitos da indústria siderúrgica, o rendimento gravimétrico deve ser superior a 30% (Loureiro *et al.*, 2021). Dessa forma, todas as espécies analisadas apresentaram valores aceitáveis para a produção de carvão vegetal.

Em relação ao índice de quebra, houve variação entre os tratamentos. As espécies *A. leiocarpa* e *Q. selloi* não apresentaram diferenças estatísticas entre si, enquanto *C. ludowigii* obteve o índice de quebra mais elevado, atingindo 81,36%. O menor índice de quebra foi de 35,04%, evidenciando a boa resistência mecânica do carvão de *Q. selloi*. Segundo Silva *et al.* (2018), valores elevados desse índice podem estar relacionados tanto ao teor de voláteis da madeira quanto à densidade básica da matéria-prima.

A densidade aparente do carvão variou entre as espécies (Tabela 4). *Apuleia leiocarpa* apresentou o menor valor, abaixo do recomendado e da média esperada, o que pode indicar uma qualidade inferior do carvão. Densidades aparentes mais elevadas estão associadas a maior resistência mecânica e maior capacidade de armazenamento energético, impactando diretamente no consumo específico dentro do reator. Já *Cupania ludowigii* e *Qualea selloi* apresentaram valores condizentes com aqueles preferidos pelas siderurgias, sendo superiores a 0,240 g/cm³ (Loureiro, 2021).

Tabela 4- Dados unitários de densidade aparente do carvão e teor de umidade do carvão.

Espécies	Densidade aparente do carvão (g/cm ³)	Teor de Umidade (%)
<i>Apuleia leiocarpa</i>	0,1007	4,76
<i>Cupania ludowigii</i>	0,3371	5,33
<i>Qualea selloi</i>	0,3301	6,24

O teor de umidade do carvão (Tabela 4) variou entre *Apuleia leiocarpa* e *Qualea selloi*, apresentando resultados satisfatórios. O carvão vegetal deve possuir baixos teores de umidade, preferencialmente entre 6% e 8%, pois esse fator influencia diretamente seu poder calorífico

(Gomes *et al.*, 2006; Fortaleza *et al.*, 2019). A espécie *Cupania ludowigii* registrou um teor de umidade de 5,33%, permanecendo dentro dos limites recomendados.

Qualea selloi destacou-se pelo melhor desempenho, apresentando alta densidade básica, maior rendimento gravimétrico e menor índice de quebra, resultando em um carvão de elevada resistência mecânica e qualidade superior. *Apuleia leiocarpa* obteve um desempenho intermediário, enquanto *Cupania ludowigii* apresentou resultados menos favoráveis, devido à sua maior porosidade e menor densidade.

As características anatômicas, como espessura das fibras e diâmetro dos vasos, influenciaram diretamente a qualidade do carvão produzido. Os resultados reforçam a importância do uso sustentável de espécies nativas, provenientes de manejo responsável, como alternativa renovável e eficiente para atender às demandas da siderurgia. Além disso, evidenciam o potencial dessas espécies para contribuir com a conservação ambiental e a valorização da biodiversidade.

6 CONCLUSÃO

A avaliação das três espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual revelou que *Qualea selloi* apresentou a maior aptidão para a produção de carvão vegetal destinado ao uso siderúrgico. Essa espécie destacou-se pela alta densidade básica da madeira, maior rendimento gravimétrico e menor índice de quebra do carvão vegetal. Sua combinação de características, como maior espessura das fibras e elevada densidade aparente, resulta em um carvão de alta qualidade, adequado às exigências da siderurgia.

A *Apuleia leiocarpa* obteve um desempenho intermediário, apresentando boa resistência mecânica e rendimento gravimétrico satisfatório. No entanto, sua menor densidade da madeira e densidade aparente do carvão podem limitar sua utilização em aplicações industriais que demandam maior robustez.

Por outro lado, *Cupania ludowigii* apresentou os menores índices de rendimento gravimétrico e o maior índice de quebra, comprometendo a resistência mecânica do carvão e restringindo seu uso para fins industriais. Apesar de possuir o maior comprimento de fibras, suas características anatômicas, como o maior diâmetro dos vasos, resultaram em menor densidade do carvão, tornando-o menos adequado para a produção de carvão de alta resistência.

Entre as espécies analisadas, *Qualea selloi* mostrou-se a mais recomendada, pois suas propriedades se aproximam das exigências da siderurgia brasileira.

7 REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Ana Clara Caxito de; COSTA, Luciano Junqueira; BRAGA, Pedro Paulo de Carvalho; NETO, Rosalvo Maciel Guimarães; ROCHA, Maria Fernanda Vieira; TRUGILHO, Paulo Fernando. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. *Pesquisa Florestal Brasileira*, [S. l.], v. 38, 2018. DOI: 10.4336/2018.pfb.38e201701546. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1546>. Acesso em: 13 jan. 2025;
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14929: Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa*. Rio de Janeiro, 1997;
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11941: Madeira - Determinação da densidade básica*. Rio de Janeiro, 2003;
- BALDIN, Talita et al. Anatomia do lenho do gênero *Calycophyllum* A. DC.(Rubiaceae). 2015.
- BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden ao nível do DAP: análise preliminar. IPEF, Piracicaba, n. 5, p. 81-90, 1972;
- BORGES, A. C. P.; SILVA, S. M.; ALVES, C. T.; et al. Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. *REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA*, v. 10, n. 2, p. 23-36, 2016;
- COSTA, Tattiane Gomes et al. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. *Cerne*, v. 20, p. 37-46, 2014;
- CRUZ, Carla Bernadete Madureira et al. Unidades de conservação no entorno da Bacia de Campos: análise da representatividade e distribuição espacial. In: *Atlas de Sensibilidade Ambiental Ao Óleo*. Campus, 2017. p. 31-47;
- DA SILVA, Renata Carvalho et al. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 38, 2018;
- DOS PASSOS, Bruna Mariá et al. Características do consumo residencial de lenha e carvão vegetal. *Floresta*, v. 46, n. 1, p. 21-29, 2016;
- DUBOC, Eny et al. Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado. 2007;
- FERREIRA, C. P. et al. Potencial econômico e ecológico de espécies nativas na silvicultura brasileira. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 39, n. 1, p. 87-95, 2019. Disponível em:

<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/2019v39n1p87>. Acesso em: 13 jan. 2025;

FORTALEZA, Amanda Pinheiro et al. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 29, n. 4, p. 1436-1451, out./dez. 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/38789>. Acesso em: 05/02/2025.

FROEHLICH, Paulo Leandro; MOURA, Angela. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. *Revista Tecnologia e Tendências*, v. 9, n. 1, p. 13–32, 2014;

JUNIOR, Luiz Santini et al. Análise anatômica qualitativa e quantitativa e densidade básica da madeira de *Alchornea sidifolia* Muell. Arg. (Euphorbiaceae). *Revista do Instituto Florestal*, v. 22, n. 2, p. 201-214, 2010;

GARCIA, Éder Aparecido et al. Análise química da madeira com casca em sistemas florestais de curta rotação. *Revista Árvore*, v. 40, p. 163-171, 2016;

GOMES, Marco Tulio Maciel. Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsa de mercadorias. 2006;

GUIMARÃES, Luana Kelly. Carbonização de mix de resíduos de exploração de plano de manejo florestal e análises qualitativas do carvão. 2021;

GUNNARSDÓTTIR, I.; DAVIDSDÓTTIR, B.; WORRELL, E.; SIGURGEIRSDÓTTIR, S. Sustainable energy development: History of the concept and emerging themes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 141, p. 110770, 2021;

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório IBA 2022*. Disponível em: <relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2023;

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. *Relatório IBA 2024*. Disponível em: <IBA2024_relatorio_2024-09-23_DV.indd>. Acesso em: 30 dez. 2024;

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Dados do setor (2022)*. Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br/site/noticia/anuario-estatistico-2022/>>. Acesso em: 03 mai. 2023;

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Manuais técnicos em geociências: divulga os procedimentos metodológicos utilizados nos estudos e pesquisas de geociências*. Rio de Janeiro, RJ: IBGE. ISSN 0103-9598;

LIMA, M. D. R.; BARROS JUNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; FIGUEIREDO, I. C. R.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de Eucalyptus. *Scientia Forestalis*, v. 48, n. 128, e3302, 2020. DOI: 10.18671/scifor.v48n128.04. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>. Acesso em: 13 jan. 2025;

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp* para uso industrial. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 214-232, 2021. DOI: 10.5902/1980509836120. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509836120>. Acesso em: 19 out. 2023;

MARANGON, Luiz Carlos et al. Relações florísticas, estrutura diamétrica e hipsométrica de um fragmento de floresta estacional semidecidual em Viçosa (MG). *Floresta*, v. 38, n. 4, 2008;

MARTINS, Sebastião Venâncio; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro. Produção de serapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP. *Brazilian Journal of Botany*, v. 22, p. 405-412, 1999;

MIKICH, Sandra Bos; SILVA, Sandro Menezes. Composição florística e fenologia das espécies zoocóricas de remanescentes de Floresta Estacional Semidecidual no centro-oeste do Paraná, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, v. 15, p. 89-113, 2001;

MILOSKI, Joana; SOMNER, Genise V.; SALIMENA, Fátima R.G.; MENINI NETO, Luiz. Sapindaceae na Serra Negra, Minas Gerais, Brasil. *Rodriguésia*, v. 68, n. 2, p. 671-690, 2017. Disponível em: <https://www.rodriguesia.jbrpf.org.br>. Acesso em: 13 jan. 2025;

MIRANDA, I.; PEREIRA, H. Influence of the fiber and vessel dimensions in the quality of charcoal from *Eucalyptus globulus* Labill. *Wood Science and Technology*, v. 36, p. 241-248, 2002. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-001-0135-7>. Acesso em: 14 jan. 2025;

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. R. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido. *Scientia Forestalis*, n. 99, p. 123-132, 2021. Disponível em: IPEF. Acesso em: 14 jan. 2025;

OLIVEIRA, L. R. et al. Contribuições das espécies nativas no manejo sustentável. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 123-135, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/2020v30n2p123>. Acesso em: 13 jan. 2025;

OLIVEIRA, Aylson Costa. *Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal*. 2012;

PERDIZ, Ricardo de Oliveira; FERRUCCI, María Silvia; AMORIM, André Márcio Araujo. Sapindaceae em remanescentes de florestas montanas no sul da Bahia, Brasil. *Rodriguésia*, v. 65, p. 987-1002, 2014;

PEREIRA, Bárbara Luísa Corradi et al. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de Eucalyptus. *Ciência Florestal*, v. 26, n. 02, p. 545-557, 2016;

PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G.; BAGGIO, A. J. Propriedades físicas e químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de Grevillea robusta. *Colombo: EMBRAPA Florestas*, 2000. 11 p;

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

RAMOS, Diego Correa et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de Eucalyptus com idades entre 108 e 120 meses. *Ciência Florestal*, v. 33, n. 1, p. e48302, 2023;

ROSA, Rafael Amorim et al. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 41-48, 2012. DOI: 10.20873/jbb.uft.cemaf.v3n2.rosa. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/196>. Acesso em: 13 jan. 2025;

SAMPAIO, Thiago Henrique Silva et al. Vochysiaceae A. St.-Hil. Nos Parques Estaduais da Serra de Caldas Novas e da Serra Dourada e sua sinopse para o estado de Goiás. 2017;

SANTOS, R. C. dos; CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. *Ciência Florestal*, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 657–669, 2016. DOI: 10.5902/1980509822765. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/22765>. Acesso em: 15 jan. 2025;

SANTOS, Rosimeire Cavalcante dos et al. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. *Cerne*, v. 18, p. 143-151, 2012;

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Selo Agrícola Ambiental: carvão vegetal. São Paulo: SAA, 2015. Disponível em: <https://codeagro.agricultura.sp.gov.br/arquivos/selo/SAA%2040%20Carvao%20Vegetal%202015.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SILVA, Marta César Freire; SOUZA, Fernanda Ilkiu Borges de; GOMES, Joaquim Ivanir. Caracterização anatômica da madeira de quatro espécies de Vochysiaceae conhecidas, na Amazônia brasileira, como “mandioqueira”. *Ciência Florestal*, v. 31, p. 1193-1215, 2021;

SILVA, J. A. et al. Manejo sustentável com espécies nativas em ecossistemas brasileiros. *Revista Brasileira de Florestas*, Brasília, v. 5, n. 3, p. 45-60, 2021. Disponível em: <https://www.revbrasflorestas.org.br/article/view/2021v5n3p45>. Acesso em: 13 jan. 2025;

SILVA, M. G. da et al. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. *Acta Amazonica*, Manaus, v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007;

SOARES, Jéssica Dornelas. Parâmetros para determinar a resistência mecânica de carvão vegetal em prensa hidráulica. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018;

SOARES, Vássia Carvalho et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 38, p. 543-549, 2014;

TALGATTI, M.; SILVEIRA, A. G. D. da; BALDIN, T.; OLIVEIRA, L. H. de; SANTINI, E. J.; PASA, D. L. Caracterização anatômica de clones comerciais de *Luhea* para a produção de papel. Universidade Federal do Paraná. *Biofix Scientific Journal*, v. 5, n. 1, p. 65-70, 2020;

TALGATTI, Maiara et al. Caracterização anatômica de clones comerciais de *Eucalyptus* para a produção de papel. *Biofix Scientific Journal*, v. 5, n. 1, p. 65-70, 2020;

TRUGILHO, P. F. et al. Efeito da idade e material genético no rendimento e qualidade do carvão vegetal de eucalipto. *Ciência da Madeira*, Pelotas, v. 6, n. 3, p. 202–216, nov. 2015;

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial da amostragem em clones de *Eucalyptus*. *Cerne*, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005;

VERÍSSIMO, Adalberto. Estratégia e mecanismos financeiros para florestas nativas do Brasil. Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2006;