

## Carvão vegetal da madeira de quatro espécies florestais nativas do Cerrado de Minas Gerais

Talita Baldin<sup>1</sup>, Patrick Cruz<sup>2</sup>, Gabriel Ferreira Silva<sup>2</sup>, Warley Davisom Barroso de Souza<sup>2</sup>, Edy Eime Pereira Baraúna<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, Brasil (talita.baldin@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, Brasil

**Resumo:** Avaliou-se a qualidade do carvão vegetal de espécies florestais nativas do Cerrado de Minas Gerais (*Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii*, *Meliosma sellowii*, e *Qualea selloii*). A carbonização foi realizada em mufla, e então analisados o rendimento gravimétrico, índice de quebra, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo, umidade e densidade relativa aparente. O rendimento foi próximo ao encontrado no gênero eucalipto. A quebra, voláteis e carbono fixo não estão dentro do recomendável para utilização na siderurgia.

**Palavras-chave:** Qualidade do carvão vegetal; carbonização da madeira; química imediata; espécies nativas; Cerrado *stricto sensu*

### INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, responsável por cerca de 12% de toda a produção. Esta posição deve-se especialmente a grande demanda do insumo pela siderurgia, visando a produção do ferro gusa e do aço para a construção civil, além das demandas domésticas, como no uso residencial (Ibá, 2022). A competitividade da siderurgia brasileira relacionada a carvão vegetal manifesta-se, sobretudo, no aspecto ambiental, pois o carvão mineral além de ser um combustível fóssil não renovável, libera enxofre quando queimado, um gás nocivo para a vida humana, e precursor da chuva ácida.

Internacionalmente o carvão vegetal também vem ganhando espaço. Nos últimos dois anos a procura pelo insumo experimentou um aumento na Europa, sobretudo pelas empresas do setor elétrico, onde o carvão é cada vez mais utilizado para substituir o gás, que está em falta e sofreu grandes picos de preços após a invasão da Ucrânia pela Rússia.

Nacionalmente, o estado de Minas Gerais é um dos principais polos de consumo de carvão vegetal do país, sendo responsável sozinho por mais de 45% (Ibá, 2022). Pioneiro na siderurgia no século XIX, em vista de sua floresta e de suas jazidas de minério de ferro, Minas tornou-se na década de 1970 o maior polo siderúrgico a carvão vegetal em escala global (Teixeira e Rodrigues, 2018). O estado também é líder em áreas de árvores plantadas no Brasil, com mais de 2,13 milhões de hectares cultivados destinados para, entre muitos fins, o aproveitamento pelo setor siderúrgico (Ibá, 2022).

Embora o uso de florestas exóticas na produção de carvão vegetal seja altamente benéfico para a economia e para a preservação das matas nativas, há incertezas sobre o suprimento e qualidade de matéria-prima nos próximos anos. Ademais, decorrem dos maciços florestais de eucalipto embates controversos relacionados aos impactos socioambientais de sua monocultura, como a concentração fundiária, o êxodo rural e as alterações no equilíbrio dinâmico dos sistemas ambientais (Teixeira e Rodrigues, 2018). Por isso, é tarefa do setor florestal pesquisar e disponibilizar alternativas para a implantação de florestas nativas, visando suprir e alternar a demanda energética. As espécies nativas apresentam como vantagem a adaptação ao solo e clima dos biomas, além da qualidade das madeiras, que normalmente são de elevada densidade e poder calorífico (Silva, Seye e Patelli Jr, 2021). Outrossim, recomenda-se o estudo da qualidade do carvão vegetal de nativas pelas inúmeras possibilidades de utilização de madeiras legalmente retiradas em áreas de supressão, com plano de manejo florestal sustentável.

No cerrado há evidência de espécies endêmicas com grande importância ecológica e comercial, muitas vezes usadas por pequenos produtores locais na produção de carvão vegetal para uso doméstico, respaldando a necessidade de informações acerca das propriedades e potencialidades energéticas dessas espécies. Como reforçado por Silva, Seye e Patelli Jr (2021) o uso de madeira nativa do cerrado ocorre em razão do aproveitamento lenhoso, proveniente de supressão vegetal de pastagens e lavouras existentes (sem desmatamento), cujos resíduos de árvores e madeira de propriedades rurais devem ter destinação

econômica, conforme legislação em vigor. Assim, atividades rurais tais como agricultura e pecuária, principais no bioma, conseguem ampliar áreas de uso de maneira sustentável e controlada, obtendo retorno econômico com a venda de matéria-prima para produção do carvão vegetal.

Nesse cenário, os autores propõem avaliar a qualidade do carvão vegetal da madeira de quatro espécies florestais nativas do Cerrado de Minas Gerais (*Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii*, *Meliosma sellowii*, e *Qualea selloi*) como matéria-prima complementar e alternativa ao setor siderúrgico.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Coleta do material vegetal

As espécies foram coletadas no bioma cerrado, em vegetação de floresta estacional semidecidual em Minas Gerais, conforme coordenadas: *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr. (grábia) – 18°51'39"S 43°23'52"W; *Cupania ludowigii* Somner & Ferrucci (camboatá-vermelho) – 18°51'21"S 43°24'33"W; *Meliosma sellowii* Urb (piguacaba) – 18°53'35"S 43°25'39"W e *Qualea selloi* Warm. (pau-terra) – 18°53'34"S 43°25'42"W

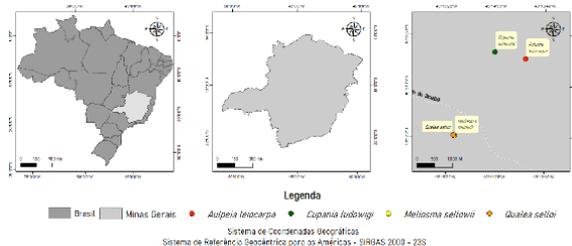


Figura 1: Localização geográfica das espécies no estado de Minas Gerais.

Os discos com cinco centímetros foram retirados na região do DAP e confeccionadas três amostras em formato de cunha para carbonização em forno mufla laboratorial.

### Carbonização da madeira

Anteriormente à carbonização foi determinado o teor de umidade da madeira. O carvão vegetal foi produzido em triplicata, em forno elétrico laboratorial do tipo mufla, com o controle do aquecimento de temperatura manual: adição de 50°C a cada 30 minutos, sendo a temperatura inicial de 100°C e a final de 450°C, totalizando quatro horas e meia de carbonização (Tabela 1), conforme recomendação de Truguilho et al. (2005).

Tabela 1. Rampa de carbonização da madeira.

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

### Análises do carvão vegetal

#### Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico foi determinado partir da relação seca do carvão vegetal e o peso da madeira anterior à carbonização, sendo expresso pela seguinte equação: <sup>(2)</sup>

$$Rgc = \frac{P_{carvão}}{P_{madeira}} \times 100 \quad (1)$$

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

#### Índice de quebra

Para realização do cálculo do índice de quebra o carvão foi submetido a três quedas livres de uma altura de 1,83 metros, sendo o peso do maior fragmento restante de cada corpo de prova anotado (Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 7416, 1984). O índice de quebra foi então calculado:

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

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

#### Densidade relativa aparente

A obtenção da densidade relativa aparente do carvão foi realizada conforme a Norma NBR 11941 (ABNT, 2003), onde as amostras de carvão foram previamente pesadas e depositadas no interior de um cesto de arame, o qual foi mergulhado em um galão de água, em temperatura ambiente, por 15 minutos. Após isso o orifício do galão foi aberto e a água deslocada medida, junto também ao peso do carvão úmido. Os cálculos foram obtidos a partir da seguinte equação:

$$Da = \frac{Pcs}{[Pad + (Pcm - Pcs)]} \quad (3)$$

Onde: Da= densidade relativa aparente do carvão ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); Pcs= massa do carvão seco, após passar pelo dessecador (g); Pad= peso da água deslocada (g); Pcm= peso do carvão úmido (g).

#### Análise estatística

Para a análise de qualidade do carvão vegetal foi empregado um delineamento inteiramente casualizado, contendo 4 tratamentos (espécies – *Apuleia leiocarpa*, *Cupania ludowigii*, *Meliosma sellowii*, e *Qualea selloi*) e 3 repetições (amostras de madeira carbonizadas e ensaiadas). Os resultados obtidos foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) e utilizou-se o teste de Tukey, com probabilidade de 1% e 5%, para se comparar as médias.

#### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para a análise de variância das propriedades do carvão podem ser consultados na Tabela 2. O fator tratamento (espécies) apresentou efeito significativo em todos os parâmetros avaliados, com exceção do teor de materiais voláteis.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi significativo pelo teste F, a nível de significância de 1%, o que indica que há diferenças entre as médias dos tratamentos, que variaram de 33,60% em *C. ludowigii*, a 39,71% em *M. sellowii*. Essa última espécie, inclusive, em conjunto com *A. leiocarpa* mostraram os melhores resultados para o rendimento.

Embora o carvão vegetal de *C. ludowigii* apresentou a menor média para o rendimento gravimétrico, o ensaio de carbono fixo expressou o maior valor absoluto entre os carvões analisados.

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey para os tratamentos (espécies), quanto o rendimento gravimétrico, índice de quebra, teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

Análise de variância	Rendimento Gravimétrico	Índice de quebra	Materiais Voláteis	Cinzas	Carbono fixo
F Tratamentos	9,02**	6,20*	2,9	5,28*	5,76*
Média geral	36,94	45,52	32,82	2,33	64,86
Desvio-padrão	1,47	16,69	2,16	0,98	2,18
DMS (5%)	3,83	43,63	5,66	2,56	5,71
CV (%)	3,97	36,66	6,59	42,14	3,36
Teste de Tukey a 5%:					
<i>Apuleia leiocarpa</i>	37,66 a	35,13 b	30,40 a	2,53 ab	67,07 a
<i>Cupania ludowigii</i>	33,60 b	81,36 a	31,87 a	1,00 b	67,13 a
<i>Qualea selloi</i>	36,80 ab	35,04 b	35,27 a	4,03 a	60,70 b
<i>Meliosma sellowii</i>	39,71 a	30,55 b	33,73 a	1,73 ab	64,53 ab

Nível de significância: \*\*: 1%; \*: 5%.

DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação

Um dos principais desafios no Brasil é elevar os valores do rendimento em carvão vegetal acima de 30%, conforme desejado pelas siderurgias (Loureiro et al., 2019). Nesse sentido, as espécies investigadas no estudo atendem ao requisito. O rendimento gravimétrico é uma das principais variáveis de serem obtidas afim de se conhecer a qualidade da madeira para a produção de carvão, visto que ele é altamente influenciado pelas propriedades do material de origem, bem como pelo tipo de unidade produtora e tempo de carbonização (Oliveira et al., 2010). Quanto maior forem os valores de rendimento, maior o potencial da espécie para a produção de carvão, e nesse sentido as madeiras avaliadas no estudo assemelham-se as médias encontradas para outras

nativas da região (Medeiros Neto et al., 2012; Silva, Seye e Patelli Jr, 2021), o que reforça o potencial dessas para a utilização energética.

Outro fator relevante de ser interpretado é a relação entre o rendimento gravimétrico do carvão e o teor de carbono fixo, que costumam ter razões inversas, como observado em *C. ludowigii*. Quanto mais elevada a temperatura da carbonização, maior será a degradação da estrutura química da madeira, a perda de massa leva a diminuição do rendimento gravimétrico. Agora, por outro lado, com o aumento da temperatura, se aumenta a concentração de carbono fixo (Azevedo et al., 2013). Como pontuado por Oliveira et al, (2010) temperaturas elevadas na carbonização inferem em aumento do teor de carbono fixo, cinzas e do poder

calorífico superior, contrariamente o teor de materiais voláteis e o rendimento gravimétrico diminuem, o que torna o carvão mais friável e compromete sua eficiência no alto forno.

O rendimento do carvão vegetal pode ser afetado por características da intrínsecas da madeira como por exemplo diâmetro, tortuosidade, densidade básica, umidade, porcentagem de cerne e alburno e composição química, aliado a temperatura de carbonização e taxa de aquecimento. Por isso, no intuito de aumentar os valores de rendimento, o maior número destas variáveis deve ser controlado.

O índice de quebra apresentou diferença entre os tratamentos pelo teste F, a nível de 5% de probabilidade. As espécies *A. leiocarpa*, *Q. selloi* e *M. sellowii* não diferiram estatisticamente entre si, por outro lado, *C. ludowigii* apresentou o pior índice de quebra (81,36%). Ao comparar o resultado com o rendimento gravimétrico médio dessa espécie, comprova-se a costumeira relação estabelecida entre carvão com menor rendimento, maior teor de carbono e também mais friável.

Todas as espécies, se comparadas à estudos de Silva et al. (2018), apresentaram altas médias para os índices de quebra. São fatores que influenciam nos resultados a qualidade da madeira e a condução da carbonização. Menores índices de quebra são obtidos em carvões de madeiras densas, e por isso, para estabelecer essa correlação, os autores sugerem avaliar esse parâmetro nos próximos estudos. O processo exerce influência na friabilidade, considerando que a maior temperatura da carbonização pode diminuir a resistência mecânica, em função da saída dos gases voláteis da parte interna das peças, que aumenta a porosidade do carvão (Silva et al., 2018).

Na análise química imediata da madeira não é observada diferença estatística quanto aos tratamentos para os testes de voláteis, e foi significativa, à 5% de probabilidade, para os testes de cinzas e carbono fixo.

O teor de carbono fixo do carvão vegetal foi inferior para *Q. selloi*, que também apresentou maior porcentagem de cinza e materiais voláteis. Contrariamente, *C. ludowigii* foi a espécie que originou carvão vegetal com maior concentração de carbono e menor teor de inorgânicos.

O setor siderúrgico prioriza carvão vegetal com faixa de carbono fixo variando de 75% a 80% (Sturion et al., 1988; Brand, 2010), costumeiramente encontrada para espécies do gênero *Eucalyptus* (Chaves et al., 2013). Por esse viés, as espécies analisadas não atendem aos requisitos de qualidade especificados pela siderurgia para a química imediata. O carbono fixo nessa atividade é a fração de carvão que é queimada no estado sólido, e seu aumento é desejável pela indústria siderúrgica visto que eleva a produtividade nos altos-

fornos, tendo ainda boa estabilidade térmica e alto poder energético. (Protásio et al. 2011b).

Já para os materiais voláteis as médias almejadas pela siderurgia devem permanecer abaixo de 25% (Santos, 2008). O maior teor de voláteis no carvão acelera a queima do material combustível, reduzindo o teor de carbono fixo, que é justamente o material energético mais buscado para a produção de carvão vegetal (Brand, 2010). Aliado aos baixos valores de materiais voláteis devem estar os percentuais de cinzas, que também reduzirão o poder calorífico do carvão vegetal. A resolução SAA-40 (2015) estipula médias de cinzas inferiores a 1,5% para poder classificar o carvão como sendo de boa qualidade (Santos, 2008).

Quanto ao teor de umidade para o carvão, esse variou de 4,76% (*A. leiocarpa*) a 6,24% (*Q. selloi*) (Figura 2), alguns estudos avaliam que o teor de umidade ideal do carvão deve estar em faixas inferiores a de 8% ou 5% (Gomes, 2006; São Paulo, 2015), valores de umidade do carvão superiores a isso reduzem o calor da combustão, diminuindo a qualidade do carvão vegetal para uso energético, tendo relação inversa ao poder calorífico do carvão.

A umidade da madeira para a carbonização foi abaixo do recomendado de 25%, conforme Brand (2010). Quando os teores de umidade da madeira são muito elevados, a taxa de aquecimento do processo no forno ocorre mais devagar, devido a necessidade de retirar a água por meio do vapor d'água do processo, o que acarreta uma maior perda de calor do processo, devido a absorção de energia térmica pelo vapor d'água, o que afeta o rendimento final em carvão, maiores teores de umidade na madeira também podem resultar em um produto mais friável (Arruda et al., 2011).

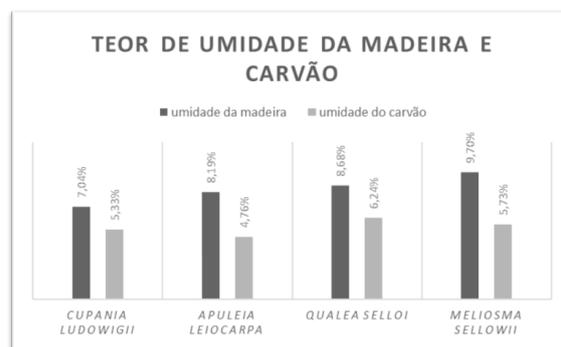


Figura 2. Umidade (%) do carvão e madeira para as espécies avaliadas.

A densidade aparente do carvão variou de 0,100 g/cm<sup>3</sup> (*A. leiocarpa*) a 0,337 g/cm<sup>3</sup> (*C. ludowigii*). Já *Q. selloi* e *M. sellowii* obtiveram valores de 0,330 e 0,259 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Com exceção da densidade aparente de *A. leiocarpa*, que foi muito abaixo da média, o que nem sempre é indicado para a produção de carvão, os valores encontrados para as demais

corroboram com dados literários de espécies nativas anteriormente avaliadas (Albuquerque, 2012).

A madeira da espécie *C. ludowigii* embora com baixo rendimento gravimétrico quando convertida em carvão vegetal, resulta num material de maior densidade aparente e teores de carbono e, por isso indicada para a siderurgia. Caso contrário é evidenciado em *Q. selloi*, embora com a segunda maior densidade relativa aparente do carvão, deve ser cuidadosamente avaliada quando em uso siderúrgico, face as desvantagens devido aos elevados teores de cinza e voláteis.

A maior densidade aparente também implica em menores gastos com transporte, visto que a madeira transportada terá maior unidade por volume de área ocupada (Santos et al., 2011). A densidade aparente encontrada para a *C. ludowigii* também apresenta valor próximo as médias obtidas para espécies do gênero eucalipto já utilizadas na siderurgia (Figueiredo et al., 2018).

#### CONCLUSÃO

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal nas madeiras estudadas foi próximo aquele usualmente encontrado no gênero eucalipto. Ademais, as espécies nativas são vantajosas devido à sua adaptação as características edafoclimáticas do bioma cerrado.

*Cupania ludowigii* foi a madeira que originou a maior densidade relativa aparente do carvão vegetal, embora com menor rendimento gravimétrico e alto índice de quebra, o que indica uma propensão maior a formação de finos. Essa espécie devido aos baixos teores de cinzas, é a única que pode ser recomendada para utilização siderúrgica. *Apuleia leiocarpa* e *Meliosma sellowii* foram muito próximas quanto ao rendimento gravimétrico, índice de quebra, teores de carbono fixo, voláteis e cinzas, umidade da madeira e carvão. *Qualea selloi* destacou-se negativamente pelos maiores teores de materiais voláteis e cinzas, e o menor teor de carbono fixo, podendo resultar em um carvão de baixa qualidade como redutor do minério de ferro.

Nenhuma das espécies apresentou percentuais de índice de quebra, teor de voláteis e teor de carbono fixo dentro do recomendável pela literatura para utilização no setor siderúrgico.

Os autores apontam para a necessidade de ampliação de pesquisas sobre a qualidade da madeira de espécies nativas e novas metodologias de carbonização.

#### REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. R. Anatomia comparada do lenho e do carvão aplicada na identificação de 75 espécies da floresta Amazônica, no Estado do Pará, Brasil. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências) -

Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, São Paulo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7416: Carvão vegetal: determinação do índice de quebra. Rio de Janeiro, 1984

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - NBR 14929: Madeira: determinação do teor de umidade de cavacos – método por secagem em estufa. 2003.

BRAND, M. A. Energia de Biomassa Florestal. Ed. Interciência. Rio de Janeiro, p. 114-131, 2010.

DE PAULA PROTÁSIO, Thiago et al. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 68, p. 295-295, 2011.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório IBA 2021. Disponível em: [relatorioiba2021-compactado.pdf](#). Acesso em: 01 dez. 2022.

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

GEORGIA TEIXEIRA, G.; RODRIGUES, G. S. S. C. Silvicultura e siderurgia a carvão vegetal: implicações na organização territorial no vale do Jequitinhonha, Minas Gerais. Caminhos de Geografia, v. 19, n. 66, p. 297-312, 2018.

GOMES, M. T. M. Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsas de mercadoria. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

MEDEIROS NETO, P. N. et al. Características físico-químicas e energéticas de duas espécies de ocorrência no Semiárido Brasileiro. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 579-588, 2012.

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

ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. Produção e uso industriais do carvão vegetal. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira. Campinas, SP: Unicamp, 447 p. 2005.

SANTOS, R. C. dos et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão

vegetal de clones de eucalipto. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SILVA, R. L.; SEYE, O.; PATELLI JR, J. R. Carvão vegetal de madeiras nativas do Cerrado em aplicações siderúrgicas e energéticas. *Rev Agro Amb*, v. 14, n. 4, p. 1087-1099, 2021.

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.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 16, p. 55-59, 1988.