

ANÁLISE QUÍMICA DO CARVÃO DE *Eucalyptus* sp PRODUZIDO NO MUNICÍPIO DE PAULISTAS – MG

Lucimeiri Alves Nascimento¹, Irlaine Nathaly Ferreira Dos Anjos², Karine Nunes de Oliveira², Ana Flávia Silva Sousa², Ricardo Gomes de Oliveira², Bruno Oliveira Lafetá², Caroline Junqueira Sartori²

¹ Universidade Federal de Lavras/ Departamento de Ciências Florestais, Trevo Rotatório Professor Edmir Sá Santos, 37203-202, Lavras, MG, Brasil, lucimeire.a.nascimento@gmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais / Departamento de Engenharia Florestal, Avenida Primeiro de Junho, 1043, Centro - 39705-000 - São João Evangelista-MG, Brasil, irlainenathaly1223@gmail.com, kakanunesoliveira@hotmail.com, anaflavia2018905@gmail.com, ricardo.gomes@ifmg.edu.br, bruno.lafeta@ifmg.edu.br, caroline.sartori@ifmg.edu.br

Resumo

O objetivo deste trabalho foi realizar uma caracterização química imediata de um carvão vegetal. Foram obtidas amostras de carvão vegetal proveniente de madeira de *Eucalyptus* sp., produzido em Paulistas, MG. Com relação à análise imediata determinou-se a umidade, teor de cinzas, teor de voláteis e carbono fixo. O Poder calorífico superior foi determinado em bomba calorimétrica e estimado com emprego da Equação de Goutal. Os valores médios verificados para o carvão vegetal proveniente de madeira de *Eucalyptus* sp, no município de Paulistas foram de: 6,85% de umidade, 27,77% de materiais voláteis, 0,51% de cinzas e 64,87% de carbono fixo. O Poder calorífico superior determinado pela bomba calorimétrica foi de 7086 Kcal/Kg, enquanto que pelo emprego da fórmula de Goutal, este valor foi de 5327,84 Kcal/Kg.

Palavras-chave: Materiais Voláteis; Cinzas; Carbono Fixo; Poder Calorífico.

Área do Conhecimento: Engenharia Agrônômica.

Introdução

As florestas de eucalipto têm sido as mais indicadas para fins energéticos em razão de sua excelente produção volumétrica e da boa qualidade da madeira. Esse bom desempenho da cultura é em grande parte resultante do intenso melhoramento genético realizado com a espécie e do manejo adequado dos povoamentos (Goulart *et al.*, 2003). O aproveitamento da madeira como fonte de energia remonta à pré-história. Com o domínio do fogo pelo homem primitivo a lenha passou a ser utilizada como principal combustível, o que acontece até hoje em muitos países ao longo do mundo (Souza, 2016).

Se a madeira tem grande destaque como fonte de energia no Brasil, grande parte desse fato é devido ao carvão vegetal que dela é oriundo. A produção brasileira de carvão vegetal em 2022 foi de 7,0 milhões de toneladas. Dentro desse total, 6,9 milhões de toneladas de carvão vegetal foram obtidos a partir da madeira de florestas plantadas, o que representa um aumento de 15% nos últimos 5 anos. O setor de Siderurgia e Aço produziu 7,8 milhões de toneladas de ferro-gusa a partir do carvão vegetal em 2022, totalizando 24,1% da sua produção total (32,4 milhões) originada de carvão vegetal (IBÁ, 2023).

A indústria siderúrgica é um dos pilares da economia de uma nação, sua produção está diretamente ligada com o desenvolvimento econômico e social de um país. No Brasil o carvão vegetal destinado ao uso siderúrgico representa uma das mais importantes atividades que alavancam o nosso desenvolvimento industrial. O Brasil utiliza exclusivamente carvão vegetal em escala industrial, substituindo o carvão na produção de ferro gusa e aço, resultando em vantagens ambientais e sociais substanciais. A composição livre de enxofre do carvão vegetal melhora a qualidade do aço (Rodrigues *et al.*, 2023).

Em 2022 o setor de Siderurgia e Aço produziu 7,8 milhões de toneladas de ferro-gusa a partir do carvão vegetal, totalizando 24,1% da sua produção total (32,4 milhões) originada de carvão vegetal. O carvão vegetal possui uma posição de grande importância na economia brasileira, em especial

para Minas Gerais, principal estado produtor e consumidor. A produção de ferro gusa em Minas Gerais representa 75% da produção nacional (SINDIFER-MG, 2023).

O carvão vegetal é superior à madeira quanto à produção de energia, em razão de sua maior concentração de carbono fixo e, conseqüentemente, de seu maior poder calorífico. No entanto, as propriedades do carvão vegetal são bastante variáveis, pois sofrem influência direta da matéria prima que lhe deu origem e do processo de carbonização, que são aspectos de difícil controle. São muitas as variáveis da madeira que influenciam a qualidade do carvão vegetal, como: a idade da madeira, a percentagem de cerne e alburno, o teor de extrativos, o teor de lignina total, entre outras. Madeiras mais velhas apresentam maior densidade e dão origem a carvão vegetal mais denso (Castro, 2013)

A avaliação realizada por meio da chamada análise imediata fornece parâmetros importantes para prever a qualidade do carvão vegetal e é a mais comum nesse aspecto. O conteúdo de materiais voláteis determina a facilidade de ignição, a estabilidade da chama e a velocidade da combustão. O alto teor de voláteis facilita a ignição e a combustão (Schneider, 2018). Segundo Ribeiro & Vale, (2006); Arantes, (2009) o carbono fixo é a quantidade de carbono presente no carvão. Durante a carbonização, ocorre uma sequência de reações químicas e físicas, dependendo do tempo e da temperatura, resultando na liberação de vapor d'água, líquidos orgânicos, gases condensáveis e não condensáveis, tendo como produto o carvão vegetal.

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma caracterização química imediata de um carvão vegetal proveniente do município de Paulistas - MG.

Metodologia

Para a execução deste estudo, obtiveram-se amostras de carvão vegetal de *Eucalyptus* sp nas idades de 6 a 7 anos, originárias do município de Paulistas, em Minas Gerais (-18°25'38,68"; -42°52'7,61"). O carvão foi produzido em fornos de superfície.

O carvão foi submetido a processos de trituração em moinho de facas do tipo Wiley e peneiramento em peneiras de 40 e 60 mesh, em que foi utilizado o material retido na peneira de 60 mesh. As análises foram realizadas em triplicata.

Para a determinação da umidade do carvão, utilizou-se aproximadamente 1,0 g do material, empregando uma balança de precisão e cadinhos de porcelana previamente secos e tarados. Após a obtenção das massas úmidas (M_u), as amostras foram submetidas a um período de secagem por 2 horas em estufa com circulação de ar a 102 °C, seguido pelo armazenamento em dessecador por 20 minutos para resfriamento. Esse processo permitiu uma nova pesagem, resultando na obtenção da massa seca (M_s) e determinação da umidade em base úmida (U_{bu}), conforme Equação 1.

$$U_{bu} = \frac{M_u - M_s}{M_u} * 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Após a determinação da massa seca do carvão, as amostras tampadas foram utilizadas para a análise dos materiais voláteis, sendo submetidas à mufla a temperaturas de 950 °C. Antes desse processo, foi realizado um pré-aquecimento de dois minutos na porta da mufla para aclimação, seguido por mais três minutos na entrada da mufla, e em seguida, as amostras permaneceram por seis minutos no interior da mufla fechada.

Logo após, aguardou-se aproximadamente 30 minutos para o resfriamento e foi determinada em balança de precisão a massa seca sem voláteis (M_{ms}), a fim de calcular o teor de materiais voláteis conforme a Equação 2.

$$TMV = \left(\frac{M_f - M_{ms}}{M_f} \right) * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Para a determinação do teor de cinzas do carvão, as amostras foram levadas à mufla, a 750 °C e destampadas, mantendo-se por um período de 6 horas, e a massa residual de cinzas (M_r) foi determinada em balança de precisão após o resfriamento em dessecador. Aplicou-se a Equação 3 para calcular o teor de cinzas, levando em consideração a massa residual inorgânica resultante da incineração.

$$TCz = \left(\frac{M_r}{M_f} \right) * 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Com base nos parâmetros previamente estabelecidos, calculou-se o teor de carbono fixo (TCF) do carvão por meio da aplicação da Equação 4.

$$TCF = 100 - Ubu - TMV - TCz \quad (\text{Eq. 4})$$

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado seguindo as diretrizes da NBR 8633 (ABNT, 1984), empregando a bomba calorimétrica IKA C200, com as amostras devidamente secas em estufa.

Adicionalmente, o PCS foi estimado utilizando a Equação de Goutal (SATER et al., 2011) (Equação 5), considerando os valores de carbono fixo (Cf, % em peso), materiais voláteis (V, % em peso) e o coeficiente A, derivado da relação $V/(V+Cf)$.

$$PCS = (82 \cdot Cf + A \cdot V) \quad (\text{Eq. 5})$$

Resultados

Os valores médios de umidade em base úmida (Ubu), Teor de materiais voláteis (TMV), Teor de cinzas (TCz) e Teor de carbono fixo (TCF), bem como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação encontram-se discriminados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados da análise química imediata do carvão vegetal de *Eucalyptus* sp.

	Média	Desvio Padrão	CV
Ubu	6,85	0,04	0,55
TMV	27,77	0,03	0,10
TCz	0,51	0,03	6,81
TCF	64,87	0,05	0,08

Verificou-se teores médios de umidade na base úmida do carvão com valores de 6,85%. O resultado da análise química do carvão de *Eucalyptus* sp, indicando uma média de 27,77% de materiais voláteis, sugere a presença de uma quantidade significativa de componentes voláteis no carvão. O teor médio de cinzas verificado foi de 0,51%. O teor médio verificado de carbono fixo foi de 64,87%.

O Poder calorífico superior determinado pela bomba calorimétrica foi de 7086 Kcal/Kg, enquanto que pelo emprego da fórmula de Goutal, este valor foi de 5327,84 Kcal/Kg. O valor encontrado através da fórmula de Goutal é considerado baixo, quando comparado ao valor encontrado pela bomba, pois levou em conta o teor de carbono fixo, que foi de 64,87%.

Discussão

Os resultados sugerem que o carvão de *Eucalyptus* sp tem um teor de umidade dentro do recomendado por Santos (2008) (2% a 8%). Rousset et al. (2011) afirmam que para uso no setor siderúrgico é desejável que o carvão tenha baixa umidade, o ideal é que o valor fique abaixo dos 7%. A entrada de carvão vegetal com elevados teores de umidade afeta a operação do alto-forno, visto que a vaporização da água, ocasionada pela elevada temperatura do equipamento, resulta em perdas de energia e geração de finos (Brito, 1993).

Segundo São Paulo (2003) o teor de materiais voláteis deve ser inferior a 23,5%. Santos et al. (2016) citam que os valores médios ideais para o teor de materiais voláteis do carvão vegetal devem variar entre 20 e 25% e que porcentagens inferiores a 25% são desejadas para o uso siderúrgico. Para uso doméstico, altos teores de materiais voláteis estão associados à geração de fumaça, baixa eficiência energética além de acarretar maior consumo de carvão vegetal (Oliveira et al. (2012).

O teor médio de cinzas verificado foi de 0,51%, o que sugere que o carvão de *Eucalyptus* sp produzido em Paulistas, tem uma baixa quantidade de impurezas inorgânicas não combustíveis, pois

Segundo São Paulo (2003), o teor de cinzas ideal para o carvão é inferior a 1,5%. Isso é positivo em termos de eficiência de combustão e produção de energia. Pequenas quantidades de cinzas são preferíveis no consumo de carvão vegetal, uma vez que os minerais não passam pelo processo de combustão, resultando na diminuição do valor calórico do combustível, além aumentarem a corrosão dos equipamentos de conversão energética (Chaves *et al.*, 2022).

Os teores de carbono fixo encontrados estão em proximidade com os valores documentados por Paes (2012) em sua pesquisa sobre três espécies da Caatinga que exibem boa eficiência energética, e que apresentaram uma média de teor de carbono fixo situada entre 65,99% e 72,36%. Segundo São Paulo (2003), o teor de carbono fixo ideal para uso na siderurgia deve ser superior a 75%, o valor verificado nesta pesquisa, fica abaixo do mínimo estabelecido.

O carbono fixo está diretamente relacionado ao poder calorífico, pois um teor mais elevado de carbono fixo implica em um maior tempo de permanência dentro do dispositivo de queima (Chaves *et al.*, 2013). Em seu trabalho, Interaminense (2019) também afirma que um aumento na quantidade de carbono fixo está diretamente associado a uma maior geração de energia, pois essa relação é proporcional ao rendimento do poder calorífico.

Em seu trabalho, Chaves *et al.* (2013) encontraram um valor médio de PCS de 7588 Kcal/Kg para carvão vegetal de clones de *E. urophylla* x *E. grandis*, que é superior aos valores encontrados neste estudo, tanto para o determinado na bomba calorimétrica, quanto ao valor estimado pela Equação de Goutal. Já Silva *et al.* (2022) encontraram um PCS no valor de 7411,01 kcal/kg para o *Eucalyptus urograndis*. À medida que os teores de carbono fixo aumentam e os teores de materiais voláteis e cinzas diminuem, o poder calorífico superior do combustível também aumenta (Chaves *et al.*, 2022).

Conclusão

Pode-se concluir que o carvão vegetal analisado apresenta boas propriedades energéticas, sendo apropriado para uso industrial e energético.

Os valores médios verificados para o carvão vegetal proveniente de madeira de *Eucalyptus* sp, no município de Paulistas, foram: 6,85% de umidade; 27,77% de materiais voláteis; 0,51% de cinzas e 64,87% de carbono fixo.

Referências

ANDRADE, A.M.; CARVALHO, L.M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do Estado do Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, v. 5, n. p. 24-42, 1998

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL-ABTCP. Normas técnicas ABCP. São Paulo: ABTCP, 1974. n.p.

BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. Piracicaba: IPEF, 1993. 6 p. (Circular Técnica, 181).

CASTRO, A. F. N. M. et al. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 627-635, 2013.

CHAVES, A. et al. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 17, 2013.

CHAVES, B. F. et al. Clone de *Eucalyptus* sp. como alternativa para florestas energéticas na região Sul do Tocantins. In: MARCHESAN, R. Tecnologia de Produtos Florestais: pesquisas e desenvolvimento. Guarujá: **Editora Científica**, v. 1, cap. 9, p. 120-140. 2022.

DA SILVA, R. C. et al. Avaliação dos índices de qualidade energética do fuste e do galho do clone de *Eucalyptus* spp.. In: MARCHESAN, R. Tecnologia de Produtos Florestais: pesquisas e desenvolvimento. Guarujá: **Editora Científica**, v. 1, cap. 5, p. 69-81. 2022.

GOULART, M.; HASELEIN, C.R.; HOPPE, J.M.; FARIAS, J.A.; PAULESKI, D.T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, v.13, p.167-175, 2003.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. Relatório 2023. São Paulo: IBÁ, 2023. 93p.
Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>.
Acesso em: 21 nov. 2023.

INTERAMINENSE, P. P. B. **Influência da taxa de aquecimento na produção do carvão da madeira de *Eucalyptus* spp.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2019.

OLIVEIRA, A.C.; ROCHA, M.F.V.; PEREIRA, B.L.C.; CARNEIRO, A.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L.; VITAL, B.R. Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, v. 42, n.1, p. 56-68, 2012.

Paes, J. B., LIMA, C. R., OLIVEIRA, E., SANTOS, H. C. M. (2012). Rendimento e caracterização do carvão vegetal de três espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. **Ciência da Madeira**, v.3n.1, p.1-10.
<http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v03n01a01>

RIBEIRO, P.G.; VALE A.T. Qualidade do carvão vegetal de resíduos de serraria para o uso doméstico. In: Anais da Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência; 2006; Florianópolis. Belém: Universidade Federal do Paraná; 2006.

RODRIGUES, T.; BARCELLOS, D. C.; JUNIOR, A. Braghini. State of the art on development and improvement of slow carbonization kilns for charcoal production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, p. 106-257, 2023.

ROUSSET, P. et al. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. *Fuel Processing Technology*, Amsterdam, v. 92, n. 10, p. 1890-1897, 2011.

SANTOS, I. D. Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e na contração da madeira e no rendimento e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado. 57 f. Dissertação. Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SANTOS, R. C. S. et al. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/ guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SÃO PAULO. Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo. Resolução nº10 SAA, de 11 de julho de 2003. São Paulo: 2003.

SCHNEIDER, J. K. Utilização de biomassas brasileiras para produção de carvão ativado de alta qualidade: caracterização e aplicação como adsorvente. 2018.

SINDIFER-MG, Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. Produção de ferro gusa em Minas Gerais e no Brasil, 2023. Disponível em: < <https://sindifer.com.br/sndfr/o-produto-ferro-gusa/>>. Acesso em: 21 nov. 2023.

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