

VARIABILIDADE NA DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTO

Anna Júlia Leite de Oliveira¹; Dalton Longue Júnior²; Rafaella Dias Ramos³; João Vitor Morais da Silva⁴; Henrique Rocha Lima⁵

¹Graduanda em Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (annajulialeiteuesb@gmail.com); ²Professor Titular, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (dalton@uesb.edu.br); ³Mestranda em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (ra.fadias@hotmail.com); ⁴Mestrando em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (joaomoraisart@gmail.com); ⁵Graduando em Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (henlima18@gmail.com).

RESUMO

A qualidade do carvão vegetal é influenciada por diversas propriedades tecnológicas, dentre essas, a composição química imediata se destaca por informar sobre a eficiência energética e indicar a melhor destinação do carvão vegetal para diferentes usos. Por isso, compreender a variação da composição química imediata do carvão vegetal e sua variabilidade é essencial para melhorar a qualidade do produto e aumentar a competitividade no mercado global, uma vez que é desejável produtos mais homogêneos e otimizar o processo de carbonização para maximizar o rendimento energético. O objetivo deste trabalho foi determinar a variabilidade da análise de composição química imediata do carvão vegetal de eucalipto. Foram realizadas carbonizações de seis clones de eucalipto em um forno elétrico (mufla) com condensador resfriado à água e coletor de gases condensáveis (licor pirolenhoso) com temperatura final de carbonização de 450°C e taxa de aquecimento de 1,7°C/min. A composição química imediata do carvão vegetal foi determinada de acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986). Os resultados indicaram que existe uma variação da composição química imediata do carvão nos clones avaliados, em que os clones 1404 e Seminal apresentaram menor variabilidade quanto ao teor de carbono fixo e materiais voláteis, informações que sugerem maior controle nas carbonizações dos demais clones estudados.

Palavras-chave: Carbono Fixo; Energia da Biomassa; Propriedade Química; Qualidade do Carvão.

INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é o principal produto da madeira obtido através do processo de pirólise lenta, por meio do fornecimento contínuo de calor em atmosfera limitada ou livre de oxigênio. A produção brasileira de carvão vegetal em 2022 foi de 7,0 milhões de toneladas, 98,5% desse total foi proveniente de madeiras de plantações florestais (IBÁ, 2023). Segundo Cirineu (2020), o carvão vegetal é produzido principalmente em cultivos florestais de eucalipto, destacando o Brasil como o único país a utilizar esse insumo renovável no setor siderúrgico.

Utilizado como agente redutor na produção de ferro-gusa, o carvão vegetal desempenha papel crucial na economia, na indústria brasileira e na sustentabilidade. O uso do carvão vegetal em processos metalúrgicos resulta em um balanço negativo de CO₂, visto que as árvores usadas nos processos de carbonização absorvem mais carbono durante o período de seu crescimento do que é

liberado no processo de produção de ferro (RODRIGUES & JÚNIOR, 2019). Para garantir a eficácia e a qualidade do produto final é necessário compreender as propriedades do carvão vegetal, como densidade aparente, poder calorífico, resistência mecânica e composição química imediata (GUIMARÃES, 2021). A análise imediata determina o teor de carbono fixo, de materiais voláteis e cinzas (SILVA, 1988). O carbono fixo é uma das propriedades que mais se destaca, uma vez que pode ser compreendido como a quantidade de carbono contida no carvão vegetal após a carbonização.

Contudo, a principal problemática associada ao uso de carvão vegetal consiste na variabilidade do processo de carbonização e na análise da sua composição química, resultando em características diferentes no produto final. A produção do carvão vegetal exige a padronização dos processos produtivos para garantir a uniformidade e qualidade necessárias (DITTMAR, 2022). Nesse contexto, estudar a variabilidade da composição química imediata do carvão vegetal é essencial para a otimização dos processos industriais, pois essa propriedade influencia diretamente no poder calorífico do carvão vegetal. Além disso, uma maior compreensão dessa variabilidade permite o desenvolvimento de técnicas de produção mais controladas, assegurando um produto de alta qualidade que atenda às exigências industriais.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi determinar a variabilidade da análise de composição química imediata do carvão vegetal de clones de eucalipto cultivados na região sudoeste da Bahia, em simulação de laboratório.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área e amostragem da madeira

O experimento foi conduzido no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (*Woodtech*) da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), no campus de Vitória da Conquista, BA. Foram coletadas sete árvores de *Eucalyptus* spp. (cinco híbridos reproduzidos por via clonal e a espécie *Eucalyptus urophylla* reproduzida por via seminal) com sete anos de idade, espaçamento de 3,0 m x 4,0 m, localizado no distrito de Pradoso, pertencente ao município de Vitória da Conquista, Bahia. Durante a coleta, foram retirados três discos de madeira de cada árvore.

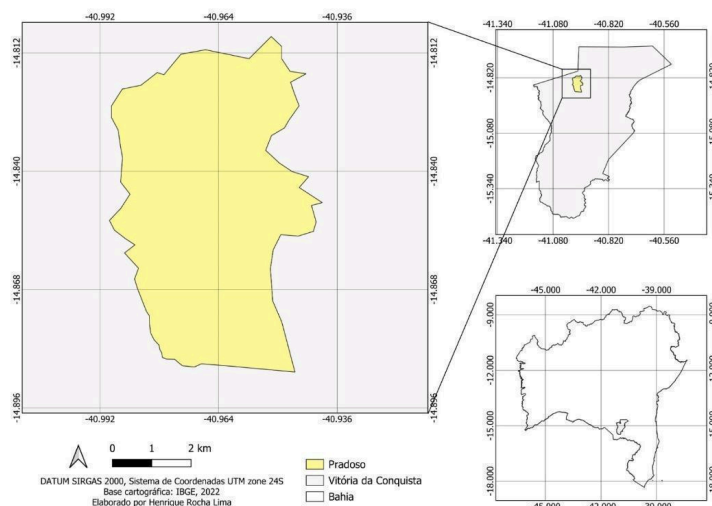


Figura 1 – Localização do cultivo de eucalipto em Vitória da Conquista – BA, utilizado neste estudo.

Carbonização da madeira

Foram realizadas carbonizações em um forno elétrico tipo mufla com condensador resfriado

à água e coletor de gases condensáveis (licor pirolenhoso), com temperatura final de carbonização de 450°C e taxa de aquecimento de 1,7°C/min (ou 100°C/h). Cerca de 350 g de amostras de madeira foram previamente secas em estufa (103 ± 2°C) e a temperatura inicial do ensaio foi de 100°C. Cada carbonização foi realizada com três repetições.

Caracterização química do carvão vegetal

As amostras de carvão vegetal foram trituradas em um cadinho metálico e classificadas em peneiras de 40/60 mesh conforme ABNT NBR 6923. Posteriormente, as frações retidas na peneira de 60 mesh foram secas em estufa a 103 ± 2°C. Foram adotados os procedimentos da ABNT NBR 8112, para a determinação dos teores de carbono fixo, conforme Equação 1; materiais voláteis, conforme Equação 2; e cinzas, em base seca, conforme Equação 3.

$$CF (\%) = 100 - (TCZ + TMV) \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo: CF = Teor de carbono fixo (%); CZ = Teor de cinzas no carvão vegetal (%); e MV = Teor de materiais voláteis (%).

$$TMV = Ms - Mf \div Ms * 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo: TMV = Teor de materiais voláteis (%); Ms = Massa inicial da amostra seca em estufa (g); e Mf = Massa final da amostra após mufla (g).

$$TCZ = Mr \div Ms * 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo: TCZ = Teor de cinzas no carvão vegetal (%); Ms = Massa da amostra seca em estufa; Mr = Massa do resíduo – cinzas (g).

Análise estatística e técnica dos dados

A análise dos dados foi realizada por meio de estatística descritiva, utilizando como dados de saída para fins de avaliação: a média, o coeficiente de variação, o desvio padrão, valor máximo e valor mínimo. As médias foram discutidas conforme o estabelecido no Selo Carvão Premium (2015), que define normas de padrões mínimos de qualidade para o carvão vegetal como carbono fixo acima de 73% e teor de cinzas abaixo de 1,5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da composição química imediata do carvão vegetal estão apresentados na Tabela 1. Foi possível observar que o clone seminal apresentou a maior média de carbono fixo (78,5%), enquanto o clone I-144 apresentou a menor média (75,2%). Em relação aos materiais voláteis o clone 1249 apresentou a maior média (23,6%) e o clone seminal a menor média (20,3%). Já para o teor de cinzas, o clone I-144 apresentou maior média (1,6%) e o clone VM058 menor média (0,9%).

Tabela 1- Análise estatística descritiva da composição química imediata dos carvões vegetais produzidos a partir de clones de eucaliptos cultivados na região Sudoeste da Bahia.

CLONE	CARBONO FIXO (%)		MATERIAIS VOLÁTEIS (%)		CINZAS (%)	
I-144	M = 75,2	DP = 8,3	M = 23,3	DP = 8,3	M = 1,6	DP = 0,1

	CV = 11,1 Max = 80,1	Min = 65,5	CV = 35,9 Max = 32,9	Min = 18,3	CV = 4,2 Max = 1,9	Min = 1,53
1404	M = 78,2 CV = 1,1 Max = 79,2	DP = 0,89 Min = 77,5	M = 20,5 CV = 3,7 Max = 21,2	DP = 0,8 Min = 19,7	M = 1,2 CV = 45,6 Max = 1,7	DP = 0,6 Min = 0,6
1296	M = 78,3 CV = 3,6 Max = 81,5	DP = 2,83 Min = 76,6	M = 20,8 CV = 12,4 Max = 22,4	DP = 2,6 Min = 17,8	M = 1,0 CV = 33,5 Max = 1,3	DP = 0,3 Min = 0,7
Seminal	M = 78,5 CV = 1,3 Max = 79,5	DP = 1,01 Min = 77,5	M = 20,3 CV = 5,4 Max = 21,4	DP = 1,1 Min = 19,2	M = 1,1 CV = 13,5 Max = 1,3	DP = 0,2 Min = 1,0
1249	M = 75,4 CV = 3,9 Max = 78,5	DP = 2,98 Min = 72,5	M = 23,6 CV = 13,8 Max = 26,7	DP = 3,3 Min = 20,2	M = 1,0 CV = 27,1 Max = 1,3	DP = 0,3 Min = 0,8
VM058	M = 76,2 CV = 3,1 Max = 78,7	DP = 2,37 Min = 74,0	M = 23,0 CV = 13,8 Max = 24,9	DP = 2,1 Min = 20,7	M = 0,9 CV = 26,9 Max = 1,0	DP = 0,2 Min = 0,6

Em que: M (média), DP (desvio padrão), CV (coeficiente de variação), Max (valor máximo) e Min (valor mínimo).

De acordo com o estabelecido no Selo Carvão Premium (2015), todos os carvões produzidos atenderam as orientações quanto ao teor de carbono fixo maior que 73%. Apenas o clone I-144 apresentou um teor de cinzas superior a 1,5%, com um valor médio de 1,6%. Isso indica que todos os clones testados neste estudo têm excelente potencial para produção de carvão vegetal em termos de composição química imediata nas condições produzidas (temperatura de 450 °C, taxa de aquecimento 1,7 °C/min ou 100 °C/h, e tempo de carbonização de 4 horas).

Quanto à variabilidade da composição química imediata do carvão vegetal para diferentes clones de eucalipto, os clones 1404 e Seminal, apresentaram as menores variabilidades de carbono fixo, variando entre 77,5% e 79,2% (CV = 1,1%) e entre 77,5% e 79,5% (1,3%), respectivamente, indicando uma maior homogeneidade do material na produção do carvão vegetal, conforme Figura 2A. Valores próximos foram constatados por Ramos *et al.* (2023) que avaliaram a qualidade do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* e obteve uma variação de carbono fixo do carvão vegetal entre 75,9% e 78,1% com média de 76,9%. De acordo Protásio *et al.* (2014) é desejável que a faixa de carbono fixo no carvão vegetal para uso siderúrgico seja entre 75% e 80%, uma vez que elevados teores de carbono fixo contribuem para o aumento na produtividade dos altos-fornos. Rocha & Klitzke (1998) afirmam que a quantidade de carbono fixo do carvão vegetal impacta diretamente na utilização do volume do forno e destacam que, quanto maior a quantidade de carbono fixo, menor será o volume ocupado pelo carvão no forno. Assim, o carvão vegetal proveniente dos clones 1404, 1296 e Seminal apresentaram valores médios mais satisfatórios.

O clone I-144 apresentou a maior variabilidade de carbono fixo do carvão vegetal, variando entre 65,5% e 80,1% (CV = 11,1%), sugerindo que as amostras de carvão destes clones apresentam maior heterogeneidade. As diferenças no carbono fixo do carvão vegetal dos clones estudados podem ser atribuídas a características de produtividade e de qualidade do carvão vegetal (ANDRADE, 1989).

Em relação aos teores de materiais voláteis do carvão vegetal, os clones 1404 e Seminal, apresentaram menor variabilidade, variando entre 19,7% e 21,2% (CV = 3,7%) e entre 19,2% e 21,4% (CV = 5,4%), respectivamente, indicando uma maior uniformidade do material na produção do carvão vegetal, conforme Figura 2B. Valores superiores foram encontrados por Ramos *et al.* (2023), que avaliaram a qualidade do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* obtiveram uma

variação de materiais voláteis entre 21,7% e 23,9% com média de 22,8%.

Os clones I-144, 1296, 1249 e VM058 apresentaram maior variabilidade de materiais voláteis do carvão vegetal, variando entre 18,3% e 32,9% (CV = 35,9%), entre 17,8% e 22,4%, (CV = 12,4%) entre 20,2% e 26,7% (CV = 13,8%) e entre 20,7% e 24,9% (CV = 13,8%), respectivamente, sugerindo maior heterogeneidade das amostras. A variabilidade dos materiais voláteis dentro do mesmo clone está relacionada com a variabilidade do carbono fixo, uma vez que o teor de materiais voláteis é inversamente proporcional ao teor de carbono fixo. Além disso, clones que possuem menores teores de materiais voláteis apresentam melhor rendimento, pois queimam mais lentamente (LEITE *et al.*, 2015).

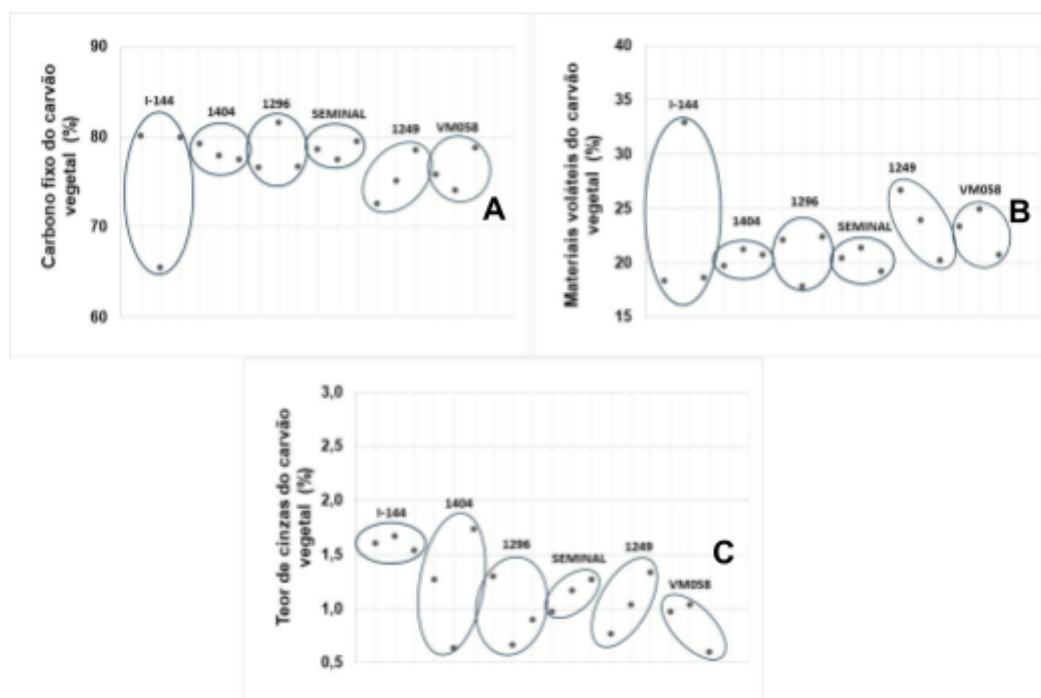


Figura 2 – Variação da composição química imediata do carvão vegetal de sete clones de *Eucalyptus*.

Quanto ao teor de cinzas do carvão vegetal, o clone I-144 apresentou a menor variabilidade dentro do clone, variando entre 1,53% e 1,67% (CV = 4,2%), apesar da média ter sido superior a 1,5% indicando pior qualidade quanto ao teor de cinzas. Santos (2010), ao avaliar os parâmetros de qualidade do carvão vegetal de cinco clones de eucalipto, encontrou valores inferiores, variando entre 0,5% e 1,6%, com uma média de 0,8%. Em geral, a indústria do aço deseja um carvão vegetal com altos teores de carbono fixo (74-77%), baixos teores de materiais voláteis (22-25%) e baixos teores de cinzas (<1,5%), conforme citado por Assis *et al.*, e preconiza o Selo Carvão Premium de São Paulo (2015), pois tendem a queimar mais lentamente, refletindo na melhoria do consumo específico. Além disso, quanto menor o teor de cinzas e maior teor de carbono fixo, maior o poder calorífico do carvão vegetal (MACHADO *et al.*, 2014).

CONCLUSÃO

Dessa forma, foi possível entender a variabilidade da composição química imediata do carvão vegetal nos clones estudados, e que os clones 1404 e Seminal apresentaram menor variabilidade quanto ao carbono fixo e materiais voláteis e o clone I-144 apresentou menor variabilidade quanto ao teor de cinzas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, A. M. **Influência da casca de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no rendimento e qualidade de carvão vegetal**. 1989. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1989.
- ASSIS, M. R. *et al.* Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 3, p. 519-536, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6923**: Carvão vegetal – amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal - Análise imediata. Rio de Janeiro, p. 5, 1986.
- CIRINEU, G. R. F. **AÇO VERDE: estado da arte, desafios e perspectivas para a siderurgia sustentável no Brasil**. 2020. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.
- DITTMAR, H. **Da sustentabilidade social e ambiental da cadeia produtiva do carvão vegetal nativo do Brasil aos crimes ambientais**. 2022. Tese (Doutorado em Sustentabilidade Social e Desenvolvimento) – Universidade Aberta, 2022.
- GUIMARÃES, L. K. **Carbonização de mix de resíduos de exploração de plano de manejo florestal e análises qualitativas do carvão**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021.
- IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2023 ano base 2022**. Brasília: 2023. 46 p.
- LEITE, E. R. da S. *et al.* Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. **Coffee Science**, v. 10, n. 2, p. 251-261, 2015.
- MACHADO, G. de O. *et al.* Influence of temperature carbonization in physical, chemical and energy of charcoal from cinamomo (*Melia azedarach* L.). **Ambiência**, v. 10, n. 1, p. 83-96, 2014.
- PROTÁSIO, T. de P. *et al.* Qualidade e avaliação energética do carvão vegetal dos resíduos do coco babaçu para uso siderúrgico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 435-444, 2014.
- RAMOS, D. C. *et al.* Qualidade da madeira de carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* com idades entre 108 e 120 meses. **Ciência Florestal**, v. 33, 2023.
- ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J. **Energia da madeira**. Curitiba: FUPEF, p.86, 1998.
- RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: a discussion on carbonization kilns. **Journal Of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, p. 104670, 2019.
- SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. Tese (Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.