

QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DE GALHOS E RAÍZES DE EUCALIPTO¹

Anna Júlia Leite de Oliveira¹, Dalton Longue Júnior²

RESUMO

O eucalipto é uma das principais fontes de matéria-prima para produção de carvão vegetal no Brasil, devido ao seu rápido crescimento e alta produtividade, além de elevada adaptação a diferentes condições edafoclimáticas. Além disso, o carvão vegetal proveniente da madeira é uma alternativa energética renovável e de menor impacto ambiental que o carvão mineral. O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de aproveitamento dos galhos e das raízes de eucalipto para produção de carvão vegetal. Para isso foram utilizados os resíduos: tronco (referência), galhos e raízes dos materiais AEC I144, 1296 e *E. urophylla* via seminal, cultivados na região Sudoeste da Bahia. As carbonizações foram realizadas em forno elétrico tipo mufla a 450 °C por 4 h. Foi avaliado o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e a composição química imediata. O material 1296 apresentou maior rendimento em carvão para tronco e melhor homogeneidade entre os resíduos, enquanto o material I144 apresentou melhores rendimentos gravimétricos para galhos e raízes. Os materiais 1296 e I144 apresentaram os maiores teores de carbono fixo.

PALAVRAS-CHAVE: Bioenergia, Biomassa, Renovável, Resíduos.

QUALITY OF CHARCOAL PRODUCED FROM EUCALYPTUS BRANCHES AND ROOTS

ABSTRACT

Eucalyptus is one of the main sources of raw material for charcoal production in Brazil due to its rapid growth and high productivity, as well as its excellent adaptation to different soil and climate conditions. Furthermore, charcoal from wood is a renewable energy alternative with a lower environmental impact than mineral coal. The objective of this study was to evaluate the potential use of eucalyptus branches and roots for charcoal production. The following residues were used: trunk (reference), branches, and roots of the materials AEC I144, 1296, and *E. urophylla* seed, grown in the southwestern region of Bahia State. Carbonizations were carried out in an electric muffle furnace at 450 °C for 4 h. The gravimetric yield of charcoal and the immediate chemical composition were evaluated. 1296 material presented a higher charcoal yield for trunk and better homogeneity among the residues, while material I144 presented better gravimetric yields for branches and roots. 1296 and I144 materials presented the highest fixed carbon contents.

¹ Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

¹ Graduanda em Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Campus Vitória da Conquista, BA (annajulialeiteuesb@gmail.com)

² Professor Titular, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Campus Vitória da Conquista, BA (dalton@uesb.edu.br)

KEYWORDS: bioenergy, biomass, renewable, waste.

INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial intensificou a dependência de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural, para sustentar grande parte da produção industrial, do setor de transportes e da geração de energia (CAMPOS, 2022). Contudo, o avanço no uso das fontes renováveis tem se mostrado estratégico, não apenas como alternativa energética, mas também pelos benefícios sociais, como a criação de empregos locais e a melhoria da qualidade de vida. Entre as alternativas energéticas mais estudadas, destaca-se a biomassa florestal, sobretudo a produção de carvão vegetal a partir de cultivos de eucalipto, com destaque para o reaproveitamento de resíduos como galhos e raízes.

O Brasil, maior produtor mundial de carvão vegetal, apresenta dificuldades na quantidade e na qualidade da madeira para o abastecimento do setor. Somado a isso, a predominância de métodos rudimentares, principalmente entre pequenos produtores, compromete a qualidade do produto final. Isso leva a uma produção heterogênea, com variações nas propriedades físico-químicas e no poder calorífico do carvão.

Diante desse cenário, torna-se essencial a busca por resíduos de biomassa florestal para aumentar a produção de material carbonífero, sem que isso comprometa a padronização e a qualidade do carvão produzido. O uso racional de galhos e raízes, muitas vezes descartados, pode reduzir impactos ambientais, agregar valor econômico e fortalecer a matriz energética renovável.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de aproveitamento dos galhos e das raízes de eucalipto para produção de carvão vegetal., visando manter produtividade e qualidade, e diminuir desperdícios de matéria-prima durante o processo de carbonização.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em Vitória da Conquista, Bahia (14°49'42.66"S; 40°59'8.75"O). A região apresenta relevo plano a suavemente ondulado, altitude entre 857 e 1.000 m, clima tropical de altitude (Cwb), temperatura média de 21 °C e precipitação de 700 mm.

Foram avaliados três materiais: *Eucalyptus urophylla* via seminal, AEC-I144 (*E. urophylla*) e 1296 (*E. urophylla* x *E. grandis*), com cinco anos de idade. No total, 72 árvores foram abatidas (24 por material), sendo o material coletado separado em tronco, galhos e raízes, denominados resíduos lignocelulósicos.

Todos os resíduos foram descascados e o excesso de minerais removido, visando a limpeza, homogeneização e padronização das amostras.

A carbonização ocorreu em forno-mufla elétrico, com taxa de aquecimento de 1,7 °C/min. Utilizaram-se cerca de 370 g de resíduos lignocelulósicos, com temperatura inicial de 100 °C e final de 450 °C, mantida por 4 h. Foram realizadas três repetições por material (3) e clone (3), totalizando 27 ensaios.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) foi determinado pela razão entre massa de carvão e de madeira seca. A análise química imediata foi realizada em triplicata, e seguiu a norma NBR 6923 (ABNT, 1981), com adaptações, para determinação dos materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF). As amostras foram peneiradas (40/60 mesh), secas a 103 ± 2 °C por 24 h, calcinadas em forno elétrico tipo mufla, a 950 °C para MV e posteriormente a 750 °C por 7 h para CZ. O CF foi obtido por diferença.

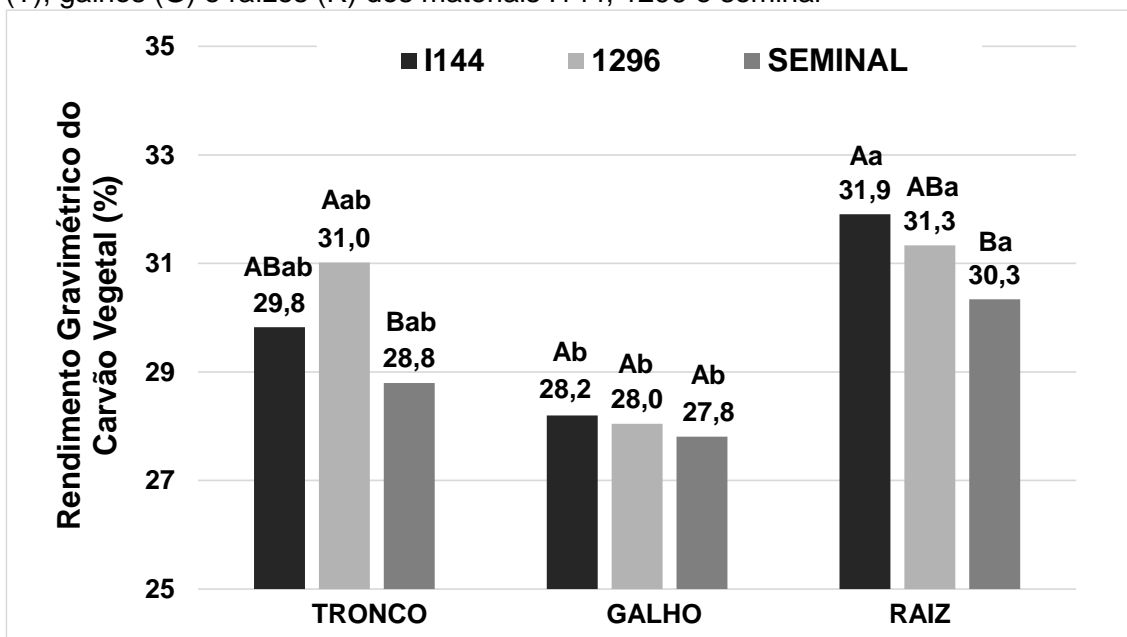
Os dados foram analisados estatisticamente para avaliação da normalidade das médias (teste de Shapiro-Wilk) e para homogeneidade das variâncias (teste de Levene). Foi realizado um delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 3x3 (três clones x três materiais). Aplicou-se a análise de variância (ANOVA) e, em seguida, o teste de Tukey para comparação múltipla de médias. Todas as análises foram realizadas no software PAST 4.03, adotando nível de significância de 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resíduo galho não apresentou diferença estatística significativa no RGCV entre os materiais genéticos. Para o tronco, observou-se que o material 1296 apresentou o maior RGCV, enquanto o seminal teve o menor valor; ambos foram estatisticamente diferentes entre si, e iguais ao I144. Considerando o resíduo raiz, o material I144 apresentou o maior RGCV e o seminal o menor, também distintos entre si, mas iguais ao 1296. De modo geral, o RGCV foi superior na raiz e inferior nos galhos, independentemente do material genético, enquanto o tronco apresentou valores estatisticamente semelhantes aos das raízes e dos galhos.

A maior proporção de lignina e extrativos no sistema radicular de árvores justifica o maior RGCV das raízes, pois conferem maior estabilidade térmica durante a pirólise, conforme já reportado por Trugilho *et al.* (2001) e Santos, (2008). Ademais, o menor RGCV dos galhos é apontado pela sua estrutura anatômica, caracterizada por maior proporção de tecidos de condução e menor densidade (TEIXEIRA, 2018).

FIGURA 1 – Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) dos resíduos tronco (T), galhos (G) e raízes (R) dos materiais I144, 1296 e seminal



Letras maiúsculas iguais indicam igualdade estatística dos mesmos resíduos entre os diferentes materiais; letras minúsculas iguais indicam igualdade estatística dos diferentes resíduos no mesmo material, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Em relação ao comportamento dos materiais, Rocha (2024) relata que essas diferenças estão associadas às características genéticas dos clones híbridos, que frequentemente apresentam ganhos em qualidade da madeira em comparação ao material seminal.

Na análise da química imediata dos carvões, com foco em carbono fixo, os materiais I144 e 1296 se mostraram mais similares estatisticamente, principalmente em relação aos resíduos galho e raiz. O material seminal apresentou diferença estatística dos demais, principalmente para o resíduo galho, conforme Tabela 1.

Para teor de carbono fixo dos resíduos, galho e raiz se mostraram estatisticamente iguais nos materiais I144 e seminal, que diferiram do tronco. Por outro lado, todos os resíduos apresentaram igualdade estatística no material 1296.

Em se tratando do teor de materiais voláteis do carvão, os materiais I144 e 1296 se mostraram mais parecidos estatisticamente por apresentarem similaridade em galhos e raízes, diferindo apenas no tronco, enquanto o material seminal se apresentou similar ao I144 para tronco e diferente estatisticamente dos demais para galhos e raiz.

TABELA 1 – Valores médios dos teores de materiais voláteis (MV), teores de cinzas (CZ) e teores de carbono fixo (CF), em porcentagem (%), do carvão vegetal dos diferentes clones, e seus materiais lignocelulósicos tronco, galho e raiz

| MATERIAL | RESÍDUOS | CF (%) | MV (%) | CZ (%) |
|----------|----------|----------|----------|---------|
| I144 | TRONCO | 80,4 Aa | 19,0 Bb | 0,61 Bb |
| | GALHO | 77,5 Bb | 21,0 Aa | 1,59 Aa |
| | RAIZ | 77,5 Bb | 20,9 Aa | 1,63 Aa |
| 1296 | TRONCO | 78,3 Ba | 20,8 Aa | 0,95 Aa |
| | GALHO | 78,3 Ba | 20,9 Aa | 0,84 Ba |
| | RAIZ | 77,5 ABa | 20,9 Aa | 1,63 Aa |
| SEMINAL | TRONCO | 78,5 ABb | 20,3 ABa | 1,15 Ab |
| | GALHO | 80,4 Aa | 18,0 Bb | 1,63 Aa |
| | RAIZ | 79,8 Aa | 19,0 Bab | 1,14 Bb |

Letras maiúsculas iguais indicam igualdade estatística dos mesmos resíduos entre os diferentes materiais; letras minúsculas iguais indicam igualdade estatística dos diferentes resíduos no mesmo material, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Ao continuar a análise do MV, os resíduos tronco e galho se apresentaram estatisticamente iguais para os três materiais. Porém, o tronco teve diferença estatística de galhos e raízes para I144 e seminal. Todos os resíduos do material 1296 apresentaram teor de voláteis estatisticamente iguais.

Ao comparar diferentes materiais em teor de CZ do carvão, não foi perceptível tendência clara de similaridade. Entretanto, galhos apresentaram os maiores valores de cinzas para o material seminal e raiz para o material 1296 e I144.

No material I144, o tronco apresentou menores teores de materiais voláteis (MV) e cinzas (CZ) e maior carbono fixo (CF), o que indica um carvão adequado para aplicações industriais em fornos e caldeiras, devido ao elevado poder calorífico e menor geração de gases e resíduos (Trugilho *et al.*, 2001; Dias Júnior *et al.*, 2017; Souza, 2023). Os resíduos galhos e raízes apresentaram os menores teores de CF e maiores teores de MV e CZ, sendo mais indicados para uso doméstico ou curta duração, conforme Froehlich *et al.* (2014).

CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES

O material 1296 se mostrou o mais indicado para reaproveitamento de resíduos, devido a composição química imediata ter sido mais homogênea e o rendimento gravimétrico em carvão ter sido elevado.

Todos os materiais e resíduos estudados apresentam potencial de reaproveitamento energético, devido a similaridade das características dos carvões produzidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARRUDA, Enoque Leda de; ANDRADE, Azarias Machado de; DIAS Júnior, Ananias Francisco. **Aproveitamento energético dos resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto**. *Floresta*, Curitiba, v. 47, n. 3, p. 323-332, jul./set. 2017. DOI: 10.5380/ufpr.v47i1.54063. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/download/54063/33614>. Acesso em: 27 set. 2025.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6923: Carvão vegetal – Determinação da análise química imediata**. Rio de Janeiro, 1981.
3. CAMPOS, A. M. A. **ALTERNATIVAS PARA A PRODUÇÃO DE AÇO COM BAIXA EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO: ALTERNATIVES FOR THE PRODUCTION OF STEEL WITH LOW EMISSION OF CARBON DIOXIDE**. 41º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, v. 41, n. 41, p. 1–16, 2022.
4. FROELICH, P. L.; MOURA, A. **CARVÃO VEGETAL: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E PRINCIPAIS APLICAÇÕES**. *Revista Tecnologia e Tendências*, v. 9, n. 1, p. 13–32, 2014.
5. PROTÁSIO, Thiago de Paula; ASSIS, Maíra Reis de; ASSIS, Claudinéia Olímpia de; TRUGILHO, Paulo Fernando; SANTANA, Wilma Michele Santos. **Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. *Pesquisa Florestal Brasileira*, [S. l.], v. 32, n. 71, p. 291, 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.71.291. Disponível em: <https://pfb.sede.embrapa.br/pfb/article/view/359>. Acesso em: 27 set. 2025.
6. ROCHA, Guilherme Nichele da. **Seleção de progênies estáveis e produtivas de *Eucalyptus urophylla* em multiambientes**. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-04112024-154103/>. Acesso em: 27 set. 2025.
7. SANTOS, Iris Dias. **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**. 2008. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
8. SANTOS, R. C. DOS et al. **Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. *Scientia Forestalis (Brazil)*, v. 39, n. 90, 2011.
9. SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2014. Acesso em: 03 nov. 2024
10. SOUZA, E. A. G. **Produção de biochar a partir do reaproveitamento de casca de eucalipto**. Orientadora: Maristela Gava. 2023. 48 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Industrial - Madeira) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Campus de Itapeva, 2023.
11. TEIXEIRA, V. L. **Seleção de genótipos de eucalipto para produção de carvão vegetal utilizando análise multivariada e redes neurais**. UFV, 2018. Disponível

em: <<https://locus.ufv.br/items/1050bd65-32ed-47e8-9c0b-09cb5756183a>>. Acesso em: 27 set. 2025.

12. TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 114-201, jul./dez. 2001.