

Produção e caracterização de carvão vegetal a partir de resíduos de *Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.

Amanda dos Santos Ferreira¹; Marcia Cristiane Alves¹; Maria Jhulia Cordeiro Santos¹;
Adriano Reis Prazeres Mascarenhas¹; Dayane Targino de Medeiros²; Felipe Gomes Batista²

¹Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Rolim de Moura/RO, Brasil; ²Departamento de Ciências Florestais (DCF), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil – sfamanda20@gmail.com

Resumo: O estudo objetivou-se por produzir carvão vegetal a partir de resíduos de *Aspidosperma polyneuron* Müll. Para produzir o carvão utilizou-se uma rampa de aquecimento em forno mufla. Em seguida realizou-se a caracterização elementar (carbono, oxigênio e hidrogênio) e imediata (carbono fixo, materiais voláteis e cinzas), poder calorífico, densidade e rendimentos (gravimétrico e volumétrico) do carvão. O carvão alcançou rendimento gravimétrico de 35,30% e volumétrico de 56,43%, densidade a granel de 500 kg/m³, 76,10% de carbono fixo (CF), 23,19% de materiais voláteis (MV) e 0,71% de cinzas (CZ). Sua composição elementar foi 59,03% de carbono (C), 34,17% de oxigênio (O) e 5,40% de hidrogênio (H). O poder calorífico superior (PCS) foi de 30,5 MJ/kg e o inferior (PCI) de 29,2 MJ/kg, e densidade energética de 19.921,40 MJ/m³ (PCI) e 20.855,84 MJ/m³ (PCS). O carvão de peroba-rosa apresenta características favoráveis à produção de energia.

Palavras-chave: Peroba-rosa, energia de biomassa, poder calorífico.

Production and characterization of charcoal from waste of *Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg.

Abstract: The study aimed to produce charcoal from residues of *Aspidosperma polyneuron* Müll. To produce the charcoal, a heating ramp in a muffle furnace was used. Next, the elementary (carbon, oxygen and hydrogen) and immediate (fixed carbon, volatile materials and ash) characterization, calorific value, density and yields (gravimetric and volumetric) of the coal were carried out. The coal achieved a gravimetric yield of 35.30% and volumetric yield of 56.43%, bulk density of 500 kg/m³, 76.10% fixed carbon (CF), 23.19% volatile materials (MV) and 0.71% ash (CZ). Its elemental composition was 59.03% carbon (C), 34.17% oxygen (O) and 5.40% hydrogen (H). The upper calorific value (PCS) was 30.5 MJ/kg and the lower calorific value (PCI) was 29.2 MJ/kg, and energy density was 19,921.40 MJ/m³ (PCI) and 20,855.84 MJ/m³ (PCS). Peroba-rosa charcoal has characteristics favorable to energy production.

Keywords: Peroba-rosa, biomass energy, calorific value.

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da atualidade é a produção de energia limpa suficiente para atender às demandas que surgem com a modernização, considerando que a expansão urbana, industrial e o avanço tecnológico têm contribuído

significativamente para o aumento do consumo energético (Fonseca *et al.*, 2022). Este desafio exige não apenas a redução do uso de combustíveis fósseis e a mitigação dos impactos ambientais relacionados à geração de energia, mas também a diversificação da matriz energética (Bertolo *et al.*, 2022). Assim, o uso de fontes renováveis, como energia solar, eólica, hidráulica, biomassa e carvão vegetal são alternativas viáveis para se alcançar o futuro sustentável (Estefano; Binoti, 2019).

O carvão vegetal é um material sólido obtido através da carbonização da madeira, processo no qual a matéria-prima é aquecida na ausência de oxigênio (Silva *et al.*, 2022). Segundo o relatório do IBÁ (2023), o Brasil é o principal produtor do mundo de carvão vegetal, com participação de cerca de 12% da produção mundial. O carvão produzido no país é principalmente destinado ao consumo interno, especialmente no setor siderúrgico de ferro-gusa e aço. O carvão vegetal tem impacto direto na economia do país e na mitigação de impactos ambientais, como a redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs).

Apesar do carvão vegetal ter sua importância reconhecida, poucas pesquisas são realizadas sobre a sua caracterização energética e aproveitamento de resíduos oriundos da exploração madeireira. A falta de estudos detalhados sobre as características energéticas e a qualidade do carvão produzidos a partir de espécie nativas, limita a compreensão sobre seu potencial energético e o uso eficiente dos recursos naturais. A hipótese do trabalho é que o carvão produzido a partir dos resíduos da exploração madeireira da espécie de peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg) apresentará alta qualidade e elevado poder calorífico. Com isso, este trabalho objetivou-se por produzir o carvão vegetal a partir de resíduos de madeira de peroba-rosa e realizar a sua caracterização energética.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do local de coleta e preparo das amostras

Para a realização do estudo foram utilizados resíduos de madeira de peroba-rosa oriunda de uma serraria localizada em Rolim de Moura, Rondônia. O experimento iniciou-se com a seleção de cinco corpos de prova com dimensões 1,9 x 2,4 x 9,6 cm, no qual foram obtidos o seu volume e massa anidra. Cada amostra foi cuidadosamente envolvida em papel alumínio, de forma que nenhuma das suas faces ficassem expostas. Posteriormente, essas amostras foram levadas ao forno mufla, seguindo uma rampa de aquecimento, subdividida em 5 fases: Fase 1: Inicialmente,

a temperatura ambiente foi elevada gradualmente até atingir 150°C, com taxa de aquecimento de 7,5°C por minuto, mantendo-se nessa temperatura por 67 minutos. Fase 2: A temperatura foi elevada de 150°C para 200°C, com taxa de aquecimento de 2,3°C por minuto, durante 97 minutos. Fase 3: A temperatura foi elevada de 200°C para 250°C, com taxa de aquecimento de 1,36°C por minuto, por 104 minutos. Fase 4: Ocorreu o aumento da temperatura de 250°C para 350°C, com taxa de aquecimento de 1,22°C por minuto, durante 74 minutos. Fase 5: A Temperatura foi elevada até a 450°C e mantida por 32 minutos. Após a conclusão de todas as etapas, a mufla foi desligada e permaneceu em esfriamento até a temperatura ambiente. Em seguida, o papel alumínio foi removido das amostras, que foram moídas em moinho de facas tipo Willye até obter pó fino. Este pó foi peneirado em malhas de 40 mesh e 60 mesh para a determinação da caracterização energética do carvão.

2.2 Rendimento gravimétrico e volumétrico e densidade a granel

Para determinar o volume das amostras, foram medidas as faces tangenciais, radiais e longitudinais com paquímetro, e as massas obtidas com balança analítica. A partir desses valores, foram calculados o rendimento gravimétrico (RG), o rendimento volumétrico (RV) e a densidade a granel (DG) do carvão, usando as equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$RG = \frac{MSC}{MSM} \times 100 \quad (1)$$

$$RV = \frac{VC}{VM} \times 100 \quad (2)$$

$$DG = \frac{MSC}{VC} \times 100 \quad (3)$$

Em que: RG= rendimento gravimétrico (%); RV=rendimento volumétrico (%); DG= densidade a granel (kg/m³); MSC= massa seca do carvão (g); MSM= massa seca da madeira (g); VC= volume do carvão (cm³); VM= volume da madeira (cm³); V= volume (m³); L= longitudinal (cm); T= tangencial (cm); R= radial (cm)

2.3 Caracterização imediata e elementar

Para a caracterização imediata do carvão, utilizou-se o pó seco retido em malha de 60 mesh. O teor de materiais voláteis (MV) foi determinado conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2007), e o teor de cinzas (CZ) foi determinado seguindo a norma NBR13999 (ABNT, 2017). A partir desses dados, o teor de carbono fixo (CF) foi obtido pela equação: CF = 100% - (MV + CZ).

2.4 Poder calorífico (superior e inferior) e densidade energética

O poder calorífico superior (PCS) das amostras foi obtido conforme a metodologia de Parikh *et al.* (2007). O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado segundo a metodologia estabelecida por Brand (2010). A densidade energética das amostras foi calculada com base na metodologia descrita por Parikh *et al.* (2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Rendimento gravimétrico e volumétrico e densidade a granel

O carvão vegetal produzido a partir da madeira de peroba-rosa contém RG de 35,30% e RV de 56,43%, indicando que a espécie apresenta alto potencial para a produção de carvão vegetal. Ao analisar esses resultados, é possível afirmar que o processo de conversão da madeira em carvão foi eficiente, resultando em um aproveitamento adequado, tanto em massa quanto em volume. Segundo Nones *et al.* (2015), o RG ideal para o carvão se encontra em torno de 35%. Essa afirmação é reforçada por estudos realizados por Lima *et al.* (2020), onde o RG variou entre 34,4% e 45,5% para 20 diferentes espécies nativas da Amazônia, demonstrando que o RG da peroba-rosa atende a faixa de recomendação para produção de carvão, conforme padrões ideais discutidos na literatura.

O RV do carvão indica que mais da metade do volume da madeira é mantido após o processo de produção. Segundo Brand (2013), as madeiras de maior densidade tendem a apresentar maiores rendimentos após a carbonização. Assim, pode-se afirmar que esse resultado foi influenciado diretamente pela alta densidade da madeira de peroba-rosa, que varia entre 0,66 e 0,85 g/cm³ (Carvalho, 2004).

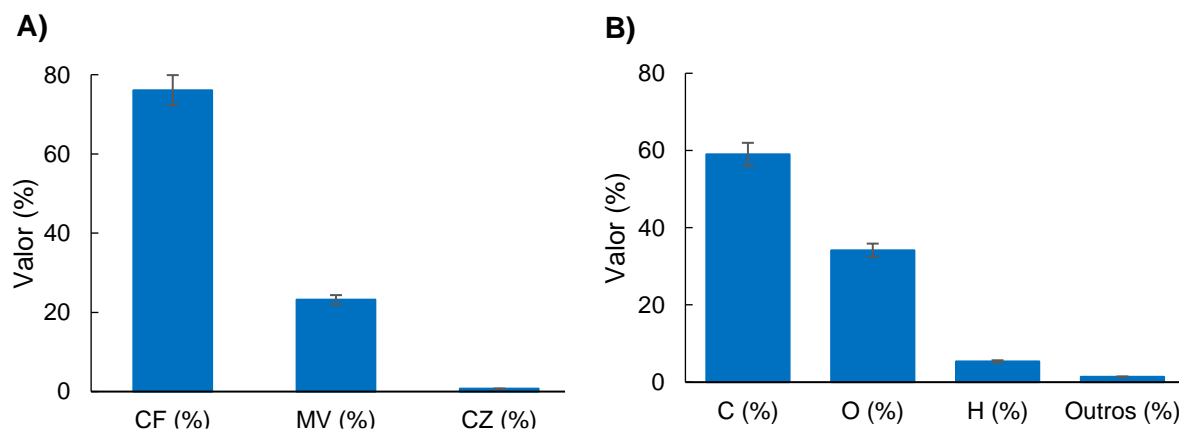
O carvão produzido contém aproximadamente 500 kg/m³ de DG e apresenta qualidade satisfatória. A DG está relacionada com o tamanho das partículas e a capacidade de compactação do material. Segundo Delatorre *et al.* (2020) as partículas menores tem menos espaços vazios entre si, o que resulta em uma maior DG e maior quantidade de material em um determinado espaço. Assim, uma alta DG é desejável pois facilita o transporte e armazenamento do material, gerando economias de custos.

3.2 Caracterização imediata e elementar

A análise imediata do carvão de peroba-rosa mostrou uma composição desejável, indicando que o carvão apresenta alta qualidade (Figura 1A). Os teores de CF, MV e CZ, encontram-se dentro dos parâmetros desejáveis estabelecidos na

literatura, com teores de CF superior a 75%, MV inferior a 23,5% e CZ menor que 1,5% (SAA-SP, 2003). Esses parâmetros confirmam que o carvão produzido atende aos critérios de qualidade necessários para seu uso eficaz como combustível em agroindústrias. Os teores de CF e MV são inversamente proporcionais, assim, os altos teores de CF e baixos teores de MV, reduzem a formação de finos e tornam o carvão menos friável (Brito, 1993). Além disso, o alto teor de CF eleva a eficiência energética do material e o tempo de queima, enquanto os baixos teores de MV reduzem a condensação de gases durante o processo de combustão (Teleken *et al.*, 2022). Já em relação às CZ, quando em elevadas concentrações, diminuem o poder calorífico do combustível e aumentam a demanda por manutenção dos sistemas de combustão. As CZ geram o acúmulo de material fundido no interior do forno, além da corrosão das paredes internas, e entupimento das tubulações e entradas de ar.

Figura 1. A) Teor de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) e B) Caracterização elemental (Teor de carbono, oxigênio e hidrogênio) do carvão de peroba-rosa.

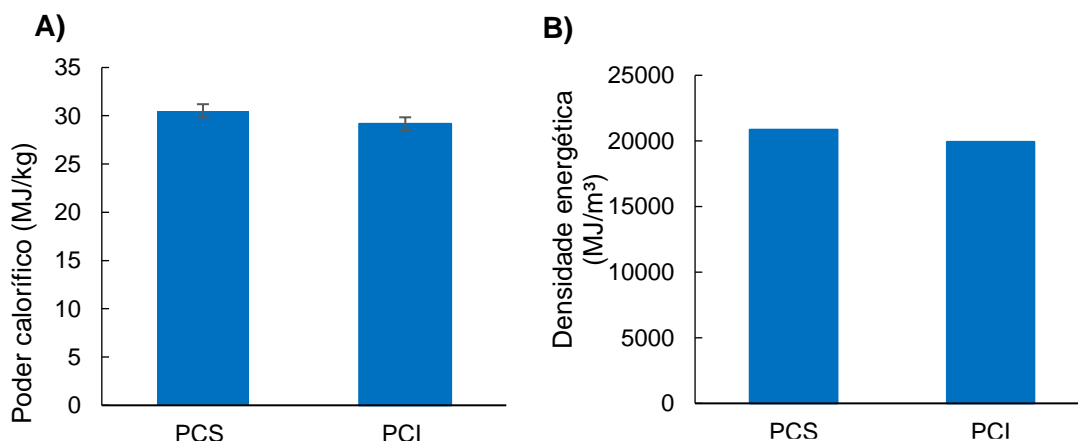


Analisando a composição elemental do carvão, pode se observar um alto teor C e H, e baixo teor de O (Figura 1B). Os teores de C e H estão ligeiramente ligados ao poder calorífico do carvão, sendo esses elementos responsáveis pela maior parte da energia liberada durante a queima (Teleken *et al.*, 2022). O baixo teor de oxigênio é desejável, pois embora desempenhe um papel inicial importante no processo de combustão, não contribui significativamente para a produção de calor (Protásio *et al.*, 2011). A composição elemental observada, reforça a afirmação de que o carvão produzido é combustível eficiente e adequado para diversas aplicações energéticas, incluindo as agroindustriais.

3.3 Poder calorífico (superior e inferior) e densidade energética

Para carvão de peroba-rosa obteve-se elevados valores PCS e PCI (Figura 3A). Como discutido anteriormente, o poder calorífico do carvão é resultado direto de sua composição química imediata e elementar, especialmente pelos altos teores de CF e C elementar. Considerando as características de PCS e PCI, o carvão de peroba-rosa apresenta características favoráveis a geração de energia térmica, visto que, se encontram dentro dos limites propostos em outras pesquisas, como a realizada por Medeiros *et al.* (2024), onde avaliou o carvão da espécie *Azadirachta indica* A. JUSS no qual encontrou valores médios de PCS (28,37 MJ/kg) e PCI (27,02 MJ/kg) semelhantes aos do carvão de peroba-rosa.

Figura 1. A) Poder Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Inferior (PCI) e B) Densidade energética do carvão com base no Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI).



O carvão também apresentou elevada DE, tanto com base PCS, quanto com base no PCI (Figura 3B). Essa DE é exclusivamente influenciada pela densidade aparente e o poder calorífico, indicando que o carvão apresenta uma maior quantidade de energia por unidade de volume. Comparando as propriedades do carvão e da matéria-prima, a madeira de peroba-rosa é reconhecida pela excelente qualidade como lenha, com PCS aproximado de 20,00 MJ/kg e DE para o PCS de cerca de 15.000 MJ/m³ (Carvalho, 2004). No entanto, o carvão produzido a partir dessa madeira apresentou um PCS duas vezes maior que o da lenha, demonstrando eficácia energética mais superior. Além disso, o uso do carvão otimiza e reduz os custos de transporte, considerando que uma maior quantidade de poder calorífico poderá ser transportado por carga.

Quando comparado com outras fontes de energia, como o etanol e a gasolina, o carvão vegetal também se mostra promissor. O PCS do etanol é aproximadamente 23,4 MJ/L (equivalente a 23.400 MJ/m³), enquanto o da gasolina é cerca de 34,9 MJ/L (equivalente a 34.900 MJ/m³) (Machado; Abreu, 2006). Por sua vez, o PCS do carvão de peroba-rosa é superior ao do etanol e se aproxima do da gasolina, destacando-se como uma alternativa vantajosa e eficiente para produção de energia em diversos setores agroindustriais.

4. CONCLUSÃO

O carvão produzido a partir da madeira de peroba-rosa apresenta RG e RV promissores, com alto teor de CF, C e H, baixo teor de MV e O e mínimos teores de CZ. Essas características concedem ao carvão excelente qualidade e eficiência energética, superando até mesmo a lenha e o etanol em seu PCS e DE. Com isso, o aproveitamento dos resíduos da peroba-rosa apresenta potencial para a indústria energética, oferecendo uma fonte de energia de alta qualidade e sustentável.

5. REFERÊNCIAS

ASTM (American Society for Testing and Materials). **ASTM D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2007.

BERTOLO, A. J., KOPPLIN, B. W., BERTOLO, J. P., SILVA, L., CASSOL, F. Combustíveis fósseis: panorama de produção e consumo no Brasil. **Gestão e Desenvolvimento em Revista**, v. 8, n. 1, p. 102-123, 2022.

BRAND, M. A. (2010). Energia da biomassa florestal. Rio de Janeiro: Editora Interciência.

BRAND, M. A., CUNHA, A. D. CARVALHO, A. D., BREHMER, D. R., KÜSTER, L. C. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar. **Biguaçu, Santa Catarina. Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 401-410, 2013.

CARVALHO, P. D. Peroba-rosa: *Aspidosperma polyneuron*. **Embrapa Florestas**, 2004. Disponível em:
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/287286/1/circtec96.pdf>

DELATORRE, F. M., CUPERTINO, G. F. M., SILVA, Á. M., SANTOS JUNIOR, A. J., MESQUITA, J. G., & JÚNIOR, A. F. D. Potencial energético dos finos de carvão vegetal. In: **Engenharia Florestal: Desafios, Limites e Potencialidade**. Editora Científica Digital, 2020. p. 639-653.

ESTEFANATO, R. A., & BINOTI, D. H. B. Fontes de energias renováveis no Brasil: estado atual e potencial. **Cadernos Camilliani e-ISSN: 2594-9640**, v. 16, n. 3, p.1443-1452, 2021.

FONSECA, H. A. B., PARMA, E., PERAÇA, C. D. S. T., BARROS, L. Transição energética: desafios e oportunidades. **ComCiência Revista Eletrônica de jornalismo científico. Artigo, Dossiê**, v. 238, 2022.

IBÁ - Instituto Brasileiro de árvores. Relatório anual. **Instituto Brasileiro de árvores**, 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>

LIMA, M. D. R., SIMETTI, R., ASSIS, M. R., TRUGILHO, P. F., CARNEIRO, A. D. C. O., BUFALINO, L., PROTÁSIO, T. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105804, 2020.

MACHADO, C. M. M., ABREU, F. R. Produção de álcool combustível a partir de carboidratos **Revista de Política Agrícola**, v. 15, n. 3, p. 64-78, 2006.

MEDEIROS, N. C. G., MEDEIROS NETO, P. N., SALES, F. D. C. V., CIRILO, N. R. M. Rendimento e qualidade do carvão vegetal da madeira de *Azadirachta indica* **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 1, p. e11700-e11700, 2024.

NONES, D. L., BRAND, M. A., CUNHA, A. B., CARVALHO, A., KRUG WEISE, S. M. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii* **Floresta**, v. 45, n. 1, 2015. DOI:

TELEKEN, J. G., OLIVEIRA, A. F., PARISOTTO, E. I. B., & SILVA, L. F. F. Produção de carvão vegetal de uso siderúrgico a partir de resíduos da exploração florestal. In **Open science research viii**. Editora Científica Digital, 2022. p. 154-172.

PROTÁSIO, T. P., BUFALINO, L., TONOLI, G. H. D., COUTO, A. M., TRUGILHO, P. F., & JÚNIOR, M. G. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113-113, 2011.

PARIKH, J., CHANNIWALA S.A., GHOSAL G.K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, 86, 1710-1719. 2007.

SAA-SP. Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo. **Resolução nº10 SAA, de 11 de julho de 2003**. São Paulo: 2003.

SILVA, M. E., NUNES, L. M. C., PASSOS, I., CORDEIRO, D. R., CALDAS, Á. M., OGORODNIK, M. E. A., SILVA, E. M. Reaproveitamento de resíduos sólidos em substituição parcial ao aglomerante na indústria da construção civil: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, 50690-50709, 2022.