

Proporções de madeira e casca oriundas de pastagens na Amazônia: impacto nas características energéticas da biomassa

Beatriz Aparecida Nunes Simão¹; Erleide Paula Santos Veríssimo¹; Amanda dos Santos Ferreira¹; Maria Jhulia Cordeiro Santos¹; Rafael R. de Melo²; Adriano R. P. Mascarenhas¹
¹Universidade Federal de Rondônia (UNIR); ²Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) - arpmascarenhas@gmail.com

Resumo: Características da biomassa afetam seu rendimento energético. Caracterizou-se, com a densidade básica (pb); umidade em base seca e úmida (UBS e UBU); poder calorífico superior, inferior e líquido (PCS, PCI e PCL); materiais voláteis (MV); carbono fixo (CF); cinzas (CZ); oxigênio (O); hidrogênio (H); carbono (C); densidade energética (DE); e energia para evaporação da água (Eea), proporções de madeira e casca (%M /%C): 30M/70C; 60M/40C; 90M/10C; 100M; e 100C. pb variou de 403 até 682 kg/m³. UBS e UBU variaram entre 17,31% e 23,72% e 21,06% a 32,34%, respectivamente. MV variou entre 73% e 79,5%, CF entre 20,2% e 24,5% e CZ entre 0,4% e 2,4%. C variou entre 48,86% e 49,23%, H entre 5,80% e 5,97% e O entre 42,23% e 43,92%. PCS, PCI e PCL variaram entre 13,3 e 20,1 MJ/kg. A DE foi de 7534,60 até 13313,35 MJ/m³ e Eea de 0,44 até 16,08 GJ/m³.

Palavras-chave: Resíduos florestais, Poder calorífico, Energia renovável.

Proportions of wood and bark from pastures in the Amazon: impact on the energy characteristics of biomass

Abstract: Biomass characteristics affect its energy yield. The basic density (pb); moisture on a dry and wet basis (UBS and UBU); upper, lower and net calorific value (PCS, PCI, and PCL); volatile materials (MV); fixed carbon (CF); ash (CZ); oxygen (O); hydrogen (H); carbon (C); energy density (DE); and energy for evaporation of water (Eea) were characterized, with proportions of wood and bark (%M /%C): 30M/70C; 60M/40C; 90M/10C; 100M; and 100C. pb varied from 403 to 682 kg/m³. UBS and UBU ranged from 17.31% to 23.72% and 21.06% to 32.34%, respectively. MV ranged from 73% to 79.5%, CF from 20.2% to 24.5%, and CZ from 0.4% to 2.4%. C varied between 48.86% and 49.23%, H between 5.80% and 5.97%, and O between 42.23% and 43.92%. PCS, PCI, and PCL ranged from 13.3 to 20.1 MJ/kg. DE ranged from 7534.60 to 13313.35 MJ/m³ and Eea from 0.44 to 16.08 GJ/m³.

Keywords: Forest wastes, Calorific value, Renewable energy.

1. INTRODUÇÃO

A biomassa florestal destaca-se como fonte de energia alternativa e renovável (Simioni et al., 2017). No entanto, a demanda por biomassa florestal no Brasil é crescente devido ao avanço das atividades agropecuárias, agroindústrias e siderúrgicas (Lima et al., 2020a). Assim, meios para otimização do uso da biomassa

visando reduzir a pressão sobre espécies nativas e aumento do rendimento energético tornam-se necessários, sobretudo na Amazônia (Arruda *et al.*, 2023). Na Amazônia, a biomassa para energia caracteriza-se principalmente por resíduos de indústrias madeireiras e resíduos florestais oriundos da formação de pastagens.

O aproveitamento de resíduos lenhosos oferece uma solução viável para a gestão de resíduos, contribuindo para a geração de energia e conservação dos recursos naturais. Assim, ao promover o uso eficiente desses materiais, é possível avançar para uma economia mais ecologicamente equilibrada e sustentável. No entanto, estes materiais são heterogêneos em termos de espécie, densidade, umidade, composição química e tipo (cascas, galhos, serragem, troncos) (Soteli *et al.*, 2023). Essas variações afetam significativamente as propriedades energéticas da biomassa e podem prejudicar o rendimento energético (Parikh *et al.*, 2007). Diante dos aspectos apresentados, objetivou-se caracterizar diferentes proporções de madeira e casca oriundas de biomassa lignocelulósica da limpeza de pastagem.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 *Obtenção e preparo do material*

O material de estudo foi coletado em uma granja avícola localizada em Rolim Moura, Rondônia. As amostras caracterizavam-se como lenha de dimensões variadas oriundas de biomassa coletada em limpeza de pastagens na forma de troncos, discos, galhos com e sem casca. Amostras foram coletadas aleatoriamente e seccionadas em dimensões de aproximadamente 2,5 x 2,0 x 3,0 cm.

Foram produzidas 20 amostras de madeira e 20 amostras de casca. Dentre elas, 10 amostras de cada material foram destinadas à determinação da densidade básica, enquanto as outras 10 foram utilizadas para a caracterização energética. Para caracterização energética, as amostras remanescentes de madeira e casca foram processadas em moinho de facas tipo Willey e segregados em peneiras de 40 e 60 mesh, respectivamente. Para avaliar o efeito da quantidade de casca em relação a madeira, o material retido na peneira de 60 mesh foi misturado em diferentes proporções (m/m) com base na massa seca, a saber: 30% de madeira + 70% de casca (30M/70C); 60% de madeira + 40% de casca (60M/40C); 90% de madeira + 10% de casca (90M/10C); 100% de madeira (100M); e 100% de casca (100C).

2.2 Densidade básica e umidade

Para obtenção da densidade básica da madeira e da casca empregou-se os procedimentos apresentados na norma ASTM D2395–17 (ASTM, 2017). As densidades das amostras compostas por proporções entre madeira e casca foram obtidas por meio de ponderação, conforme Souza *et al.* (2021). A umidade em base seca (UBS) e umidade em base úmida (UBU) das amostras foram obtidas conforme ASMT E871-82 (ASTM, 2019).

2.3 Caracterização química imediata e elementar

O material moído e peneirado foi submetido à secagem em estufa de circulação forçada de ar e temperatura controlada (103 ± 5 °C) até atingir a massa constante. Posteriormente, o material foi utilizado para determinação do teor de materiais voláteis (MV) seguindo a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021) e o teor de cinzas (CZ), conforme a NBR 13999 (ABNT, 2017). A partir dos resultados obtidos, o teor de carbono fixo (CF) foi calculado pela expressão: $100\% - (MV + CZ)$. Os teores de Carbono (C), Hidrogênio (H) e Oxigênio (O) foram estimados com base nos valores de MV e CF obtidos na caracterização química imediata, conforme Parikh *et al.* (2007).

2.4 Poder calorífico superior, inferior e líquido, densidade energética e energia necessária para evaporação da água

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi estimado com o modelo ajustado por Parikh *et al.* (2005). O Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Líquido (PCL) foram estimados conforme sugerido por Brand (2010). A densidade energética (DE) foi calculada pelo produto entre PCS e pb e entre PCI e pb (Lima *et al.*, 2020). Para estimar a energia necessária para a evaporação da água (Eea), foi utilizada a metodologia proposta por Soteli *et al.* (2023).

2.5 Análises estatísticas

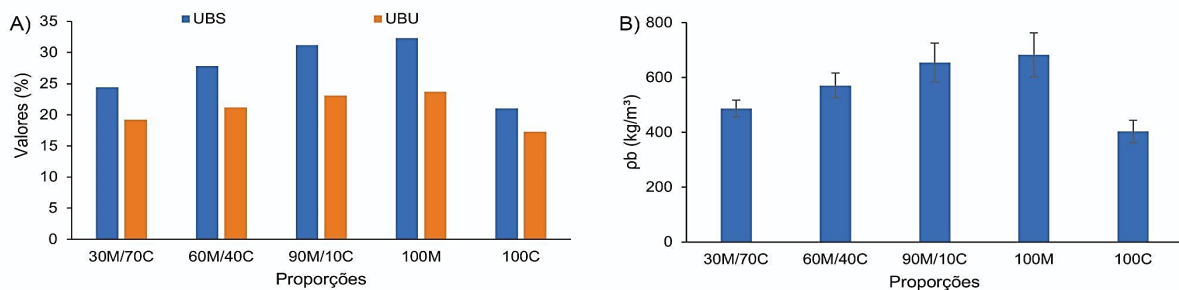
O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado. Os resultados foram submetidos ao teste de f e análise de regressão linear. Quando não foram observados efeitos significativos, os dados foram analisados por meio de estatística descritiva, indicando a média e o desvio-padrão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Densidade básica e Umidade

As amostras com maiores proporções de madeira apresentaram maiores UBU e UBS (Figura 1A).

Figura 1: A) Umidade em Base Seca (UBS) e Umidade em Base Úmida (UBU); B) Densidade básica (pb) das amostras com diferentes proporções de madeira e casca.

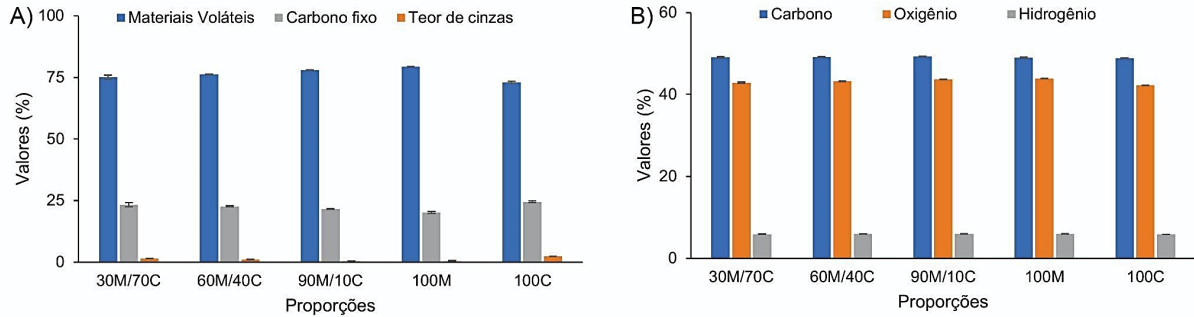


Os maiores valores de umidade para a madeira podem ser explicados por sua maior higroscopicidade decorrente da maior quantidade de fibras em relação à casca que, em contrapartida, possui maiores quantidades de substâncias hidrofóbicas (p. ex. resinas e óleos) (Dias e Simonelli, 2013). Além disso, a madeira possui superfície de contato menor em relação à casca e esta característica dificultou a secagem do material. De acordo com Vale et al. (2000), a umidade em valores elevados, acima de ~25%, é prejudicial ao rendimento energético da biomassa. Lima *et al.* (2020b) reportaram que parte da energia gerada é consumida para remover água do material combustível, devido ao seu alto calor específico. Em relação à pb, os maiores valores foram encontrados nas amostras com maiores proporções de madeira e menores proporções de cascas (Figura 1B). Biomassas com maiores densidades são mais desejáveis para a produção de calor, visto que apresentam maior eficiência energética durante o processo de queima (Lima *et al.*, 2020a).

3.2 Caracterização química imediata e elementar

Os valores de MV, CF e CZ foram semelhantes entre as diferentes proporções de madeira e casca (Figura 2A).

Figura 2: A) Teor de Materiais Voláteis (MV), Cinzas (CZ) e Carbono Fixo (CF); e B) Teores de Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O) das amostras com diferentes proporções de madeira e casca.



Para a produção de energia o material combustível deve conter no mínimo 75% de MV, 15 a 25% de CF e até 3% de CZ (Brand, 2010). Assim, é desejável que a biomassa apresente elevados teores de CF e baixos teores de MV e CZ. O CF impacta no tempo de queima do combustível, ou seja, quanto maior o teor de CF e menor MV, mais lento será o processo de queima, consequentemente, maior será a eficiência energética do combustível (Soteli *et al.* 2023). No caso da proporção 100C, embora tenha apresentado o maior teor de CF, o teor de MV está abaixo da faixa ideal e o teor CZ é superior ao das demais proporções. Esse aumento do teor de CZ pode indicar uma possível contaminação por minerais decorrente de condições de armazenamento inadequadas.

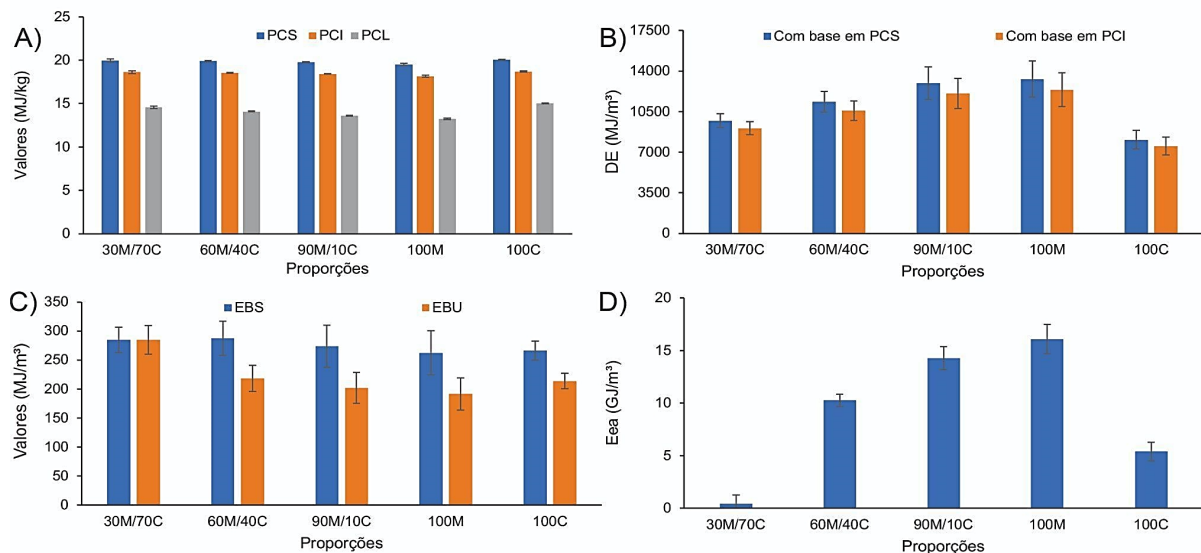
Como esperado, as diferentes proporções tiveram comportamento semelhante, com teores de C, H e O dentro da faixa ideal apresentada por Brand (2010) (Figura 2A), que indicou teores de C, H e O na ordem de 49%, 5,87%, 43,97%, respectivamente. Assim, independentemente da proporção utilizada, a composição elementar das amostras é favorável para a produção de energia térmica. O teor de C é o principal responsável pela produção de calor durante a queima, por isso é necessário que a biomassa tenha proporções altas desse elemento, enquanto o teor de O deve ser baixo, pois ao interagir com o C e H, tem a capacidade de formar compostos não combustíveis, reduzindo assim o poder calorífico (CO₂ e H₂O) (Yang *et al.*, 2022).

3.3 Poder calorífico superior, inferior e líquido, densidade energética e energia necessária para evaporação da água

Com base nos resultados obtidos de PCS, PCI e PCL, observou-se que as

diferentes proporções possuem potencial energético semelhante, com destaque para a proporção 100C (Figura 3A).

Figura 3: A) Poder Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Líquido (PCL); B) Densidade Energética (DE); C) Energia produzida em Base Seca (EBS) e Energia produzida em Base Úmida (EBU); e D) Energia necessária para a evaporação da água (Eea) das amostras com diferentes proporções de madeira e casca.



As cascas possuem maiores teores de componentes com maior poder calorífico (p. ex. lipídeos e compostos fenólicos), como extrativos e lignina (Brand, 2010). Além disso, a menor umidade das amostras também influencia de forma favorável o processo de queima, indicando maior eficiência energética do material. Já em relação a DE, as amostras com maiores proporções de madeira têm potencial para maior desempenho energético, com destaque para 100M (Figura 2B). Isso pode ser explicado pelo fato da madeira apresentar maiores valores de ρ_b quando comparado às cascas.

Considerando apenas os valores de PCL, a amostra 100C apresentou maior quantidade de energia efetivamente aproveitada durante a combustão. Isso se dá devido a menor umidade do material e aos elevados teores de extrativos e lignina, proporcionando uma maior eficiência energética durante o processo de queima. No entanto, considerando que os valores de PCS, PCI e PCL de 100M são semelhantes ao de 100C, e levando em conta o maior valor de DE, é possível afirmar que as amostras 100M possuem características mais favoráveis à produção de energia. Essa afirmação pode ser reforçada com base em estudos encontrados

na literatura, que relatam valores semelhantes ou até mesmo inferiores aos observados (Soteli *et al.* 2023; Lima *et al.* 2020a; Lima *et al.* 2020b). Como exemplo disso, em estudos realizados por Klingenberg *et al.* (2020), o poder calorífico de resíduos madeireiros da espécie *Cenostigma pluviosum* encontrados foram superiores a 19 MJ/kg, com a DE variando entre 4450 e 10800 MJ/m³, resultados considerados promissores para a produção de energia.

Observando os valores de EBS e EBU, os maiores valores encontrados foram para a proporção 30M/70C (Figura 3C). Quanto aos resultados de Eea, os maiores valores foram registrados para 100M (Figura 3D). No entanto, todas as proporções apresentaram valores positivos, indicando que os materiais além de consumir menos energia para gerar vapor, ainda apresentam excedentes para gerar calor. Esses resultados destacam a importância de proporcionar melhor aproveitamento dos resíduos florestais, incluindo além do uso da madeira, o emprego das cascas (Garcia *et al.*, 2022). O uso de diferentes proporções pode aumentar a eficiência energética dos materiais combustíveis, promovendo a sustentabilidade e o aproveitamento adequado da biomassa. Porém, recomenda-se realizar a secagem do material para aumentar ainda mais a eficiência energética durante o processo de combustão.

4. CONCLUSÃO

A condição 100M apresentou características mais favoráveis à produção de energia, devido aos maiores valores de pb, PCS, PCI e DE. No entanto, é recomendado realizar a secagem do material visando elevar a eficiência energética do material como combustível. Também é importante que o armazenamento seja feito de modo que ocorra menor contaminação por solo, o que aumenta o teor de cinzas e reduz o potencial energético, principalmente das cascas.

5. REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 11941: Madeira - Determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ARRUDA, N.L.F.V.; OLIVEIRA, P.B.; CUNHA MALDONADO, L.; SPADIM, E.R.; JUNIOR, H.D. J.E.; GUERRA, S.P.S. Análises físicas, químicas e energéticas de cavacos da biomassa residual de *Tectona grandis* e *Calophyllum brasiliense* Cambess. **Série Técnica IPEF**, 26(48), 2023
- ASTM (American Standard Test Methods). **D7582: Standard test methods for**

centesimal analysis of coal and coke by macrothermogravimetric analysis.

West Conshohocken: ASTM, 2010.

ASTM (American Standard Test Methods). **ASTM D1762-84: Standard test method for chemical analysis of charcoal.** West Conshohocken: ASTM, 2013.

ASTM (American Standard Test Methods). **ASTM D2395-17: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials.** West Conshohocken: ASTM, 2019.

ASTM (American Standard Test Methods). **ASTM E871-82: Standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels.** West Conshohocken: ASTM, 2019.

BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.

DIAS, O. A.; SIMONELLI, G. Qualidade da madeira para a produção de celulose e papel. **Enciclopédia Biosfera**, 9(17): 3632, 2013

KLINGENBERG, D., NOLASCO, A. M., JÚNIOR, A. F. D., CANDATEN, L., CAVALCANTE, A. K. L. DE SOUZA, E. C. Potencial energético de resíduos madeireiros de uma floresta tropical urbana. **Research, Society and Development**, 9(9): 451997478, 2020.

LIMA, M. D. R.; BARROS JUNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, 48(128): e3302, 2020a.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JUNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, 140: 105660, 2020b.

PARIKH, J.; CHANNIWALA S.A.; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, 84(5): 487-494, 2005.

PARIKH, J.; CHANNIWALA S.A.; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, 86(12-13): 1710-1719, 2007.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; GUIMARÃES JUNIOR, M.; TONOLI, G. H. D.; TRUGILHO, P. F. Técnicas multivariadas aplicadas à avaliação de resíduos lignocelulósicos para a produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, 23(4): 771–781, 2013.

SIMIONI, F.J.; MOREIRA, J.M.M.Á.P.; FACHINELLO, A.L.; ALMEIDA BUSCHINELLI, C.C.; MATSUURA, M.I.D.S.F. Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. **Ciência Florestal**, 27(2): 731-741, 2017.

SOUZA, M.J.C.; MELO, R.R.; GUIMARÃES JUNIOR, J.B.; CARNAVAL, T.K.B.A.; PIMENTA, A.S.; MASCARENHAS, A.R.P. Wood-cement boards with addition of coconut husk. **Wood Material Science & Engineering**, 17(6): 617-626, 2021.

TEIXEIRA, L.P.; ANDRADE, E.T.; ESPÍNDOLA, J.Z.; PEREIRA, R.G. Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico do bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, 35(3): 555–566, 2015.

TOM, A.P.; PAWELS, P.; HARIDAS, A. J. T. Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content. **Waste Management**, 49: 64-72, 2016.

VALE, A. T.; MOURÃO BRASIL, M. A.; MARCHESI, C. C.; ARRUDA VEIGA, R. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia*

mangium Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, 6: 83-88, 2000.
YANG, Y.; FU, T.; SONG, F.; SONG, X.; WANG, X. L.; WANG, Y. Z. Wood burning processes in variable oxygen atmospheres: thermolysis behavior, fire and smoke release. **Polymer Degradation and Stability**, 205: 110158, 2022.