

Combustibilidade de madeiras tropicais residuais oriundas de plano de manejo florestal sustentável

Douglas Lamounier Faria¹, Eliana Martins de Sousa¹, Michael Douglas Roque Lima¹, Elvis Vieira dos Santos¹, Paulo Fernando Trugilho¹, Thiago de Paula Protásio¹

¹ Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/ MG, Brasil – douglas.lamounier@yahoo.com

Resumo: Fontes alternativas de energia como aquelas oriundas da biomassa vegetal têm ganhado destaque nos últimos anos. Além das tradicionais florestas plantadas, os resíduos do manejo florestal sustentável, praticado na região Amazônica, configuraram uma promissora fonte alternativa de matéria-prima para geração de energia renovável. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento à combustão de resíduos de quatro madeiras provenientes de plano de manejo florestal sustentável, sendo *Dinizia excelsa*, *Manilkara elata*, *Parinari rodolphii* e *Couratari oblongifolia*. Os resíduos foram avaliados por técnicas de termogravimetria (TGA e DTA) em atmosfera de oxigênio a fim de se determinar seus comportamentos à combustão. O ensaio de TGA mostrou que a madeira residual de *C. oblongifolia* apresentou um quarto estágio de perda de massa, relativo à combustão residual da lignina. Além disso, os resultados de DTA mostraram que esta espécie resultou na maior liberação de energia por volta de 300 °C.

Palavras-chave: Biomassa residual, Bioenergia, Amazônia, Termogravimetria.

Combustibility of residual tropical wood from a sustainable forest management plan

Abstract: Alternative energy sources such as those derived from plant biomass have gained prominence in recent years. In addition to traditional planted forests, wastes from sustainable forest management, practiced in the Amazon region, represent a promising alternative source of raw material for generating renewable energy. The objective of this study was to evaluate the combustion behavior of wastes from four types of wood from a sustainable forest management plan, namely *Dinizia excelsa*, *Manilkara elata*, *Parinari rodolphii* and *Couratari oblongifolia*. The wastes were evaluated by thermogravimetric techniques (TGA and DTA) in an oxygen atmosphere in order to determine their combustion behavior. The TGA test showed that the residual wood of *C. oblongifolia* presented a fourth stage of mass loss, related to the residual combustion of lignin. In addition, the DTA results showed that this species resulted in the greatest energy release around 300 °C.

Keywords: Residual biomass, Bioenergy, Amazon, Thermogravimetry.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de utilização de combustíveis renováveis em substituição aos combustíveis fósseis vem ganhando cada vez mais notoriedade. Exemplo disso, é o



debate dessa temática durante as Conferências das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas ou Conferências das Partes (COP's).

A madeira já foi considerada a mais importante fonte de energia para a humanidade. Entretanto, após o petróleo ter se tornado amplamente disponível, seu uso reduziu de forma drástica, estando relacionado negativamente com o grau de desenvolvimento do país. Porém, as incertezas políticas dos principais exportadores do petróleo, a elevação nos seus preços e o aumento das emissões dos gases do efeito estufa promoveram destaque às biomassas, inclusive a lenhosa, como importante fonte de energia (Vidal; Hora, 2011).

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2024), as fontes renováveis de energia representaram 49,1% da oferta interna de energia brasileira no ano de 2023. Desse percentual, 8,6% correspondem a lenha e carvão vegetal. Os resíduos do manejo florestal sustentável representam uma matéria-prima potencialmente viável para o abastecimento de sistemas termoquímicos na Amazônia, considerando sua abundância na região e características satisfatórias para a combustão (Lima *et al.*, 2020a). Estima-se a geração de 2,13 toneladas de resíduos (sapopemas, restos de troncos e galhos) para cada 1 tonelada de madeira extraída com a Exploração de Impacto Reduzido (Numazawa *et al.*, 2017).

Entretanto, a utilização dos resíduos do manejo possui alguns fatores limitantes, dentre eles, a alta variabilidade do material residual, que detém de características físicas e químicas muito distintas (Lima *et al.*, 2020a). Variações importantes para densidade (0,22 a 1,15 g cm⁻³), umidade (15,0 a 22,1%), lignina (29,50 a 34,68%) e extractivos de (7,36 a 10,50%) foram reportadas na literatura (Carneiro *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2021). A variabilidade da constituição química da biomassa (teores de celulose, hemiceluloses, lignina, extractivos, cinzas e carbono fixo) afeta diretamente sua combustibilidade, ou seja, seu comportamento durante a combustão, bem como, seu uso nas diferentes áreas da indústria (Lima *et al.*, 2020a).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os parâmetros de combustibilidade de quatro espécies Amazônicas oriundas de planos de manejo sustentável para produção de carvão vegetal.



2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Seleção e coleta dos resíduos florestais

Foram avaliadas quatro espécies nativas amazônicas, sendo *Dinizia excelsa* Ducke (angelim vermelho), *Manilkara elata* (Allemão ex. Miq.) Monach. (maçaranduba), *Parinari rodolphii* Huber (coco pau) e *Couratari oblongifolia* Ducke & Kunth (tauarí ou tauarí-branco). Para cada espécie, foram amostradas três árvores. Os resíduos lenhosos utilizados neste estudo foram provenientes da exploração florestal sustentável na Unidade de Manejo Florestal Fazenda Rio Capim em Paragominas, Pará. A Fazenda Rio Capim, propriedade da empresa CKBV Florestal Ltda. (Grupo Cikel), encontra-se entre as coordenadas geográficas 3°30' e 3°45' de latitude sul e 48°30' e 48°45' de longitude a oeste do meridiano de Greenwich.

2.2 Caracterização dos resíduos madeireiros provenientes da exploração sustentável

As análises termogravimétricas de termogravimetria (TGA) e análise térmica diferencial (DTA) foram realizadas com auxílio de um analisador termogravimétrico DTG-60H SHIMADZU (Quioto, Japão). Para isso, aproximadamente 4 mg de amostra foi analisada em atmosfera de oxigênio e fluxo de 50 mL min⁻¹ a um gradiente de temperatura variando da temperatura ambiente até 600 °C, com taxa de aquecimento de 5 °C min⁻¹. Utilizando-se a primeira derivada da curva TGA, que estabelece a perda de massa em função da temperatura, foi possível identificar a taxa de perda de massa por minuto e os estágios característicos da combustão, bem como relacioná-los com a composição química molecular da madeira a partir de dados reportados pela literatura (Lima *et al.*, 2020a).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

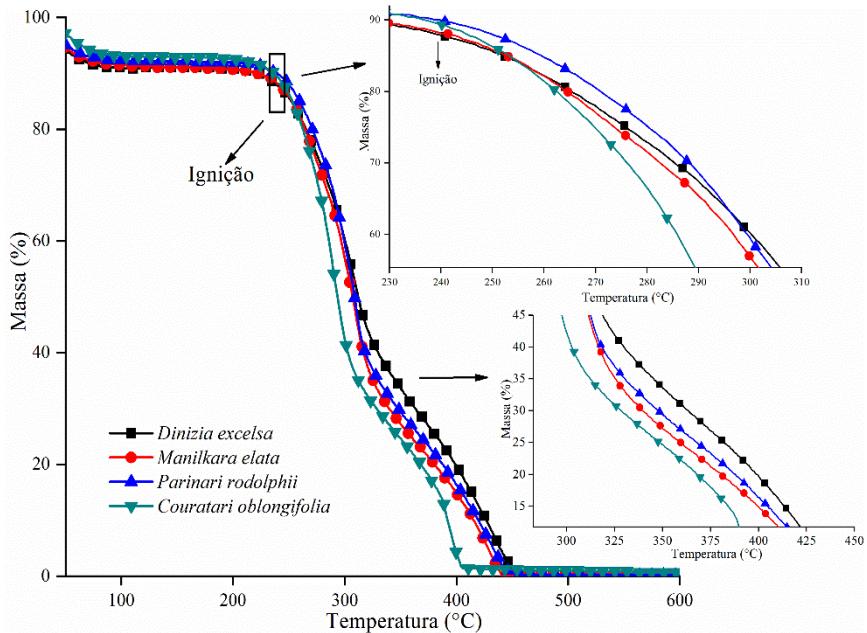
3.1 Parâmetros de combustão das biomassas residuais provenientes de planos de manejo florestal sustentável amazônico

As Figuras 1 e 2 apresentam as curvas de TGA e DTG, respectivamente, da combustão das madeiras residuais provenientes de planos de manejo florestal sustentável amazônico. Observa-se três principais estágios que são típicos para combustão de biomassas lignocelulósicas. O primeiro estágio é atribuído à perda de água (secagem), ocorrendo entre as temperaturas de 25 e 200 °C. Já os outros dois estágios referem-se à degradação térmica dos componentes químicos presentes na



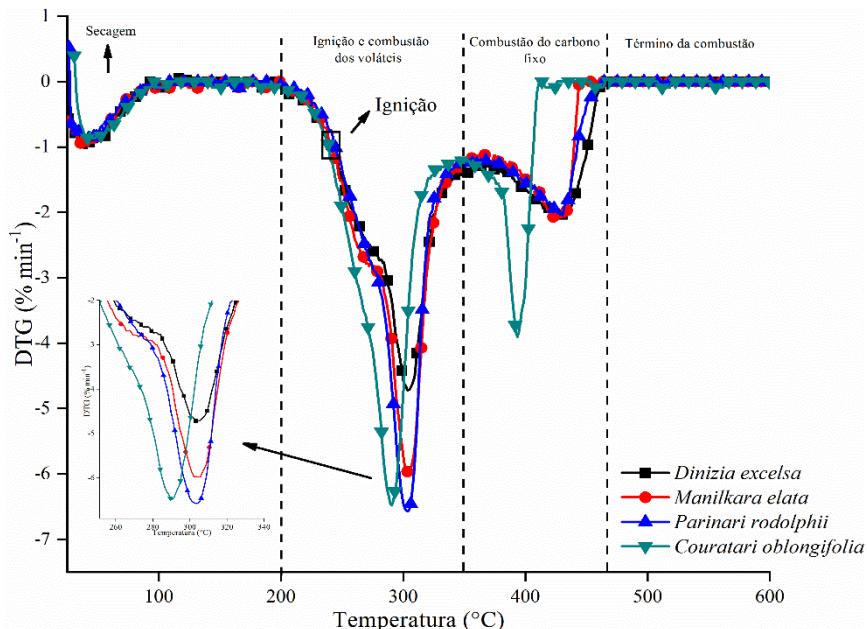
parede celular das biomassas, divididos entre o estágio de ignição e combustão dos compostos voláteis (entre 200 e 350 °C) e combustão do carbono fixo (entre 350 e 460 °C), sendo posteriormente verificado término da combustão.

Figura 1. Análise termogravimétrica (TGA) da combustão das madeiras residuais do manejo florestal sustentável.



Fonte: (Autor)

Figura 2. Derivada primeira (DTG) da curva termogravimétrica da combustão das madeiras residuais do manejo florestal sustentável amazônico.



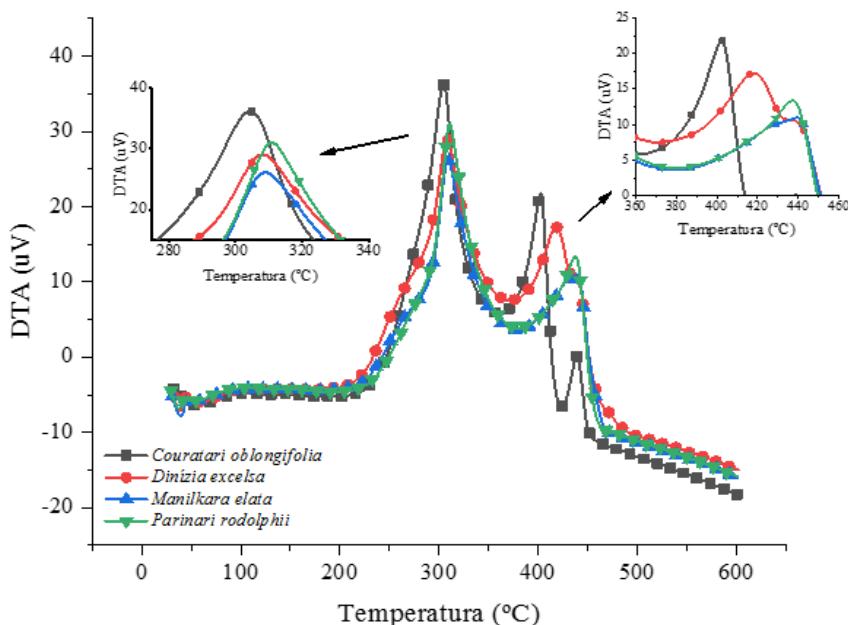
Fonte: (Autor)



Conforme apresentado nas Figuras 1 e 2, nota-se que o primeiro estágio de perda de massa para as biomassas lignocelulósicas submetidas à combustão por meio de termogravimetria se trata da perda de água (secagem), sendo verificado leve variação nos valores de perda de massa e de temperaturas máximas entre as espécies. Nesta fase, a madeira ganha a energia necessária para iniciar a ignição (Grioui *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2015).

A Figura 3 mostra o comportamento da combustão através da análise térmica diferencial (DTA) da madeira residual de quatro espécies tropicais. As curvas de DTA fornecem a quantidade de energia liberada ao longo do processo de combustão.

Figura 3. Análise térmica diferencial (DTA) das madeiras residuais do manejo florestal sustentável amazônico.



Fonte: (Autor)

A desvolatilização, ignição e queima dos materiais voláteis provoca essa liberação de energia que se torna mais acentuada, formando o primeiro pico de liberação (Massuque *et al.*, 2021). Antes disso, houve o fornecimento de energia para a secagem da biomassa (fase endotérmica) e posterior início da ignição (Griou *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2015). A espécie *C. oblongifolia* se destacou entre as demais espécies e apresentou o maior valor de liberação de energia por volta de 300 °C.

Com relação às curvas de TGA/DTG, observa-se que as biomassas provenientes de planos de manejo florestal sustentável apresentaram três estágios típicos de combustão de biomassas, comumente verificados na literatura (Fang *et al.*, 2013). Entretanto, a espécie *C. oblongifolia* apresentou um suposto quarto estágio em



temperatura de aproximadamente 450 °C. É possível que a ocorrência deste estágio esteja relacionada à combustão residual da lignina. Uma vez que a lignina é o constituinte da biomassa lignocelulósica mais estável termicamente, possuindo uma ampla faixa de degradação térmica, variando entre 152 a 700 °C (López-González *et al.*, 2013). Além deste componente químico, o teor de extractivos solúveis em água quente (2,93%) e o teor de cinzas (1,0%) podem ter atuados significativamente aumentando a perda de massa e a máxima temperatura do quarto estágio.

O segundo estágio de combustão é caracterizado pela queima de carbono sólido, e, por isso, proporções menores resultam em maior perda de massa durante este estágio (Protásio *et al.*, 2019). Foi verificado que a madeira residual de *D. excelsa* apresentou a menor taxa de perda de massa ($4,7\% \text{ min}^{-1}$) na temperatura de 303 °C, consequentemente foi notado a menor perda de massa na faixa de 300 a 400 °C. Verifica-se ainda no segundo estágio que as espécies *C. oblongifolia* e *P. rodolphii* apresentaram taxas de perda de massa próximas, de $6,49$ e $6,53\% \text{ min}^{-1}$, respectivamente. Como a espécie *D. excelsa* possui o maior teor de extractivos totais em comparação com as demais espécies, conforme relatado por Lima *et al.* (2020b), menor é a taxa de perda de massa no principal estágio de decomposição térmica dessa biomassa.

Em relação ao terceiro estágio, é verificado que as espécies apresentaram comportamento similar, à exceção de *C. oblongifolia*. Para esta espécie, foi verificado um pico com taxa de perda de massa de $3,77\% \text{ min}^{-1}$ na temperatura de 392 °C, com posterior presença de um quarto estágio, atribuído provavelmente a uma combustão residual do material/substância restante. A lignina residual está sendo degradada e por constituir mais carbono que nitrogênio propicia a queima desse elemento e, em consequência, o aumento da perda de massa.

Este quarto estágio verificado somente para a madeira residual de *C. oblongifolia* pode ser atribuído também à presença do baixo teor de extractivos totais (3,8%) como relatado por Lima *et al.* (2020b). Esse baixo teor de extractivos promoveu a antecipação da temperatura máxima do quarto estágio e, consequentemente, o término da combustão. Compostos voláteis provocam a antecipação do processo de combustão. Os extractivos são compostos de baixa massa molecular em comparação à celulose e altamente voláteis, têm a capacidade de facilitar a inflamabilidade do material combustível em temperaturas menores e reduzir a temperatura de ignição,



acelerando o processo de degradação e provocando maior liberação de energia durante a combustão (Protásio *et al.*, 2017; Protásio *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2023).

4. CONCLUSÃO

A caracterização térmica realizada por termogravimetria mostrou que a espécie *C. oblongifolia* apresentou um quarto estágio de perda de massa, associado à combustão residual da lignina e à formação de composto a partir dos extractivos. Ademais, as curvas de DTA mostraram que a madeira residual de *C. oblongifolia* apresentou a maior liberação de energia em 295 °C. Diante do exposto, a composição química da madeira exerce influência sobre seu comportamento durante o processo de combustão, variando de acordo com a espécie e suas características. Desta forma, para fins de bioenergia, a espécie *D. excelsa* resultará no maior rendimento em carvão vegetal.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela disponibilização de material e infraestrutura. Os autores agradecem, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de pós-doutorado (Processo 152102/2024-8) e financiamento do projeto (Processo 406053/2022-7), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

6. REFERÊNCIAS

Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf>. Acesso em: 19 Ago 2024.

CARNEIRO, F. S.; RUSCHEL, A. R.; FREITAS, L. J. M. *et al.* **Densidade da madeira de espécies florestais de quatro áreas experimentais da Amazônia oriental brasileira.** Atena Editora, 2020.

COSTA, J. S.; SILVA, M. G.; SCATOLINO, M. V. *et al.* Relating features and combustion behavior of biomasses from the Amazonian agroforestry chain. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 1, p. 321-341, 2023.



FANG, X.; JIA, L.; YIN, L. A weighted average global process model based on two-stage kinetic scheme for biomass combustion. **Biomass and Bioenergy**, v. 48, p. 43-50, 2013.

GRIQUI, N.; HALOUANI, K.; ZOULALIAN, A. et al. Thermogravimetric analysis and kinetics modeling of isothermal carbonization of olive wood in inert atmosphere. **Thermochimica Acta**, v. 440, n. 1, p. 23-30, 2006.

JONES, J. M.; SADDAWI, A.; DOOLEY, B. et al. Low temperature ignition of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 134, p. 372-377, 2015.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JUNIOR, U. O. et al. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, 105660, 2020a.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JUNIOR, U. O. et al. Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. **Renewable Energy**, v. 163, p. 792-806, 2021.

LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R. DE et al. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, 105804, 2020b.

LÓPEZ-GONZÁLEZ D.; FERNANDEZ-LOPEZ M.; VALVERDE J.L. et al. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 143, p. 562-574, 2013.

MASSUQUE, J.; MATAVEL, C. E.; PROTÁSIO, T. P. et al. Combustion performance of charcoal: a comparative study on Miombo woodland native species and *Eucalyptus grandis*. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, p. 15789-15798, 2021.

NUMAZAWA, C. T. D.; NUMAZAWA, S.; PACCA, S. et al. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280-285, 2017.

PROTÁSIO, T. P.; SCATOLINO, M. V.; ARAÚJO, A. C. C. et al. Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior Eucalyptus firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 3, p. 626-641, 2019.

PROTÁSIO, T. P.; GUIMARÃES JUNIOR, M.; MIRMEHDI, S. et al. Combustão de biomassa e carvão vegetal da casca de babaçu. **Cerne**, v. 23, p. 1-10, 2017.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial**, p. 261-314, 2011.