

Valorização de resíduos de madeiras tropicais amazônicas oriundos de manejo florestal sustentável visando à produção de carvão vegetal

Douglas Lamounier Faria¹, Elvis Vieira dos Santos¹, Michael Douglas Roque Lima¹, Julio Soriano², Paulo Fernando Trugilho¹, Thiago de Paula Protásio¹

¹ Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil; ² Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas (UNICAMP), Campinas/SP, Brasil – douglas.lamounier@yahoo.com

Resumo: A necessidade de utilização de combustíveis renováveis em substituição aos combustíveis fósseis vem ganhando cada vez mais notoriedade. Os resíduos do manejo florestal sustentável, praticado na região Amazônica, configuram uma promissora fonte alternativa de matéria-prima para geração de energia renovável. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento à pirólise 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 calorimetria exploratória diferencial (DSC). O ensaio de TGA mostrou que a madeira residual de *D. excelsa* apresentou a menor perda de massa na faixa de 300 a 400 °C, além disso, a espécie apresentou a maior massa residual ao fim do ensaio, de 22,81%. Baseado nestes resultados, espera-se encontrar melhor balanço energético para a carbonização dos resíduos de *D. excelsa* comparativamente às demais biomassas analisadas.

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

Valorization of Amazonian tropical wood wastes from sustainable forest management with the aim of charcoal production

Abstract: The need to use renewable fuels to replace fossil fuels is gaining more and more notoriety. Waste from sustainable forest management practiced in the Amazonian region constitutes a promising alternative source of raw material for the production of renewable energy. The aim of this work was to evaluate the pyrolysis behavior of four wood wastes from sustainable forest management plan, namely *Dinizia excelsa*, *Manilkara elata*, *Parinari rodolphii*, and *Couratari oblongifolia*. The wastes were evaluated using thermogravimetry (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC) techniques. The TGA test showed that the residual wood of *D. excelsa* presented the lowest mass loss in the range of 300 to 400 °C, in addition, the species presented the highest residual mass content at the end of the test, 22.81%. Based on these results, it is expected to find a better energy balance for the carbonization of *D. excelsa* wastes compared to the other biomasses analyzed.

Keywords: Residual biomass, Bioenergy, Amazon, Thermogravimetry.

1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é uma fonte de energia de grande importância no Brasil, não somente por ser uma fonte renovável, mas pela importância histórica e econômica

para o país (Pereira *et al.*, 2016). Atualmente, o Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal para fins energéticos (FAO, 2023). Em 2022, o país produziu 7,0 milhões de toneladas de carvão vegetal, com quase totalidade da produção voltada para o mercado interno (IBÁ, 2023). Nesse mesmo ano, as indústrias de ferro-gusa e aço se destacaram com um significativo consumo de carvão vegetal, totalizando 24,1% da sua produção total (SINDIFER, 2023).

As características do carvão são primordialmente influenciadas pelas características da madeira de origem, bem como pelas condições de operação da pirólise (sistemas de produção, mão-de-obra, temperatura e tempo de pirólise) (Dufourny *et al.*, 2019). No Brasil, a demanda por carvão vegetal tem sido suprida principalmente pelos reflorestamentos e pelos resíduos do manejo florestal sustentável da floresta Amazônica (Vital; Pinto, 2009). Em planos de manejo florestal são gerados quantitativos substanciais de resíduos, em que para cada tonelada de madeira comercial, extraída de forma sustentável da floresta Amazônica, pode-se gerar até 2,13 toneladas de resíduos (Numazawa *et al.*, 2017).

O aproveitamento dos resíduos do manejo florestal para a produção de lenha e energia na Amazônia é uma alternativa sustentável na região amazônica, em que se deixados na floresta após a atividade de exploração madeireira emitem fluxos consideráveis de CO₂ para a atmosfera durante o processo natural de decomposição (Numazawa *et al.*, 2017). Atrelado a isso, as recentes restrições ecológicas ao uso de combustíveis fósseis no setor industrial, a crescente demanda energética, emissão de CO₂ neutro e a ampla disponibilidade, credencia o resíduo do manejo para o suprimento energético (Souza *et al.*, 2016).

Entretanto, são escassos estudos de caracterização desses resíduos para fins energéticos, tornando-se necessário sua qualificação por meio dos principais índices de qualidade da biomassa para finalidade energética (Dias Júnior *et al.*, 2015), ou seja, densidade básica, poder calorífico, constituição química, umidade e propriedades térmicas. Com isso, torna-se necessário a investigação de biomassas residuais provenientes do manejo florestal da Amazônia a fim de sua utilização para geração de energia e produção de carvão vegetal para usos industriais e domésticos.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os parâmetros de pirólise 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 (tauari ou tauari-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 madeiros provenientes da exploração sustentável

As análises termogravimétricas 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 nitrogênio e fluxo de 50 mL min⁻¹ a um gradiente de temperatura variando da temperatura ambiente até 600 °C, com taxa de aquecimento de 10 °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 pirólise, bem como relacioná-los com a composição química molecular da madeira a partir de dados reportados pela literatura (Lima *et al.*, 2020a).

Para o ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi utilizado o equipamento DSC 60 SHIMADZU (Quioto, Japão). Amostras de 2 mg foram acondicionadas em recipientes de alumínio sob um fluxo de nitrogênio de 50 mL min⁻¹. Como amostra padrão foi considerado o recipiente vazio. Os termogramas foram obtidos a partir da temperatura ambiente até 550 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹.

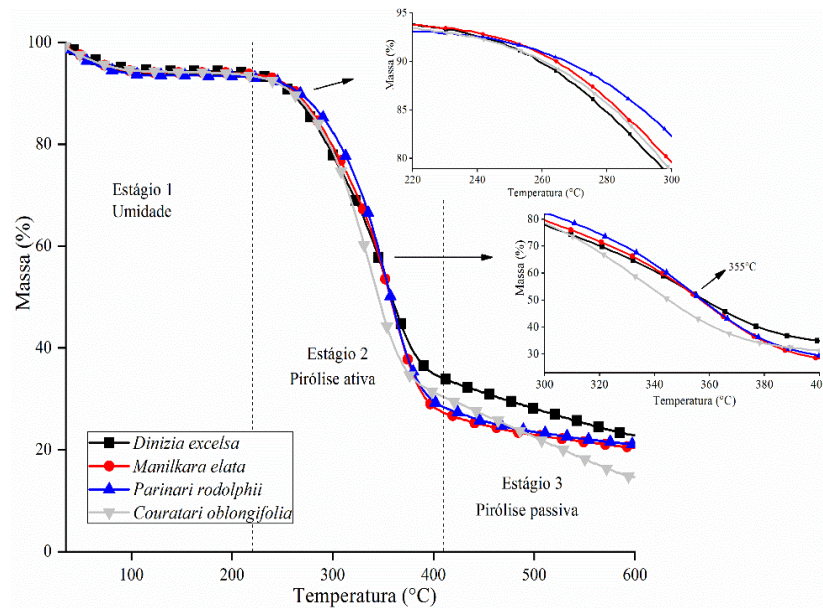
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização térmica das madeiras residuais provenientes de planos de manejo florestal sustentável amazônico

As Figuras 1 e 2 apresentam as curvas de TGA e DTG, respectivamente, da pirólise das madeiras residuais provenientes de planos de manejo florestal sustentável amazônico. Observa-se três principais estágios que são típicos para pirólise de

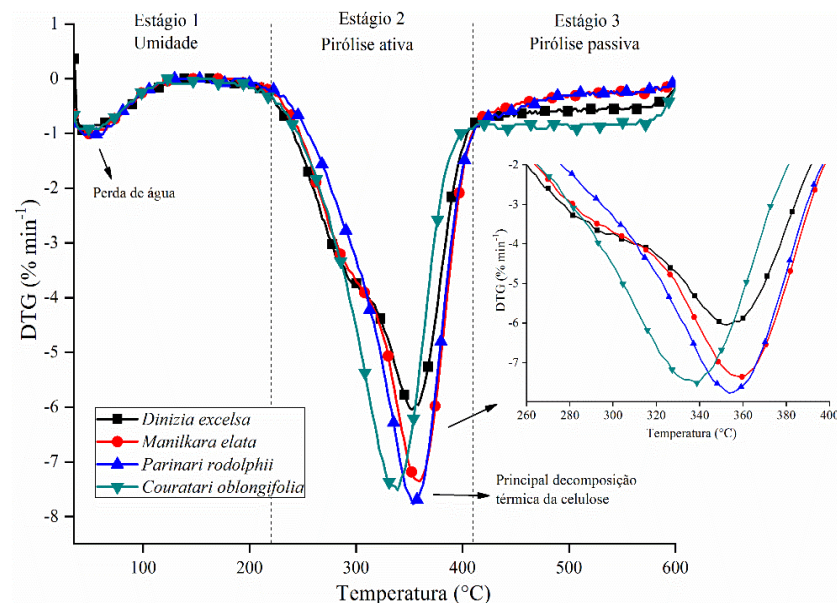
biomassas. O primeiro estágio é atribuído à perda de água (secagem), ocorrendo entre as temperaturas de 25 e 220 °C. Já os outros dois estágios referem-se à degradação térmica dos componentes químicos presentes na parede celular das madeiras, divididos entre o estágio de pirólise ativa (entre 220 e 410 °C) e passiva (entre 410 e 600 °C).

Figura 1. Análise termogravimétrica (TGA) da pirólise das madeiras em estudo.



Fonte: (Autor)

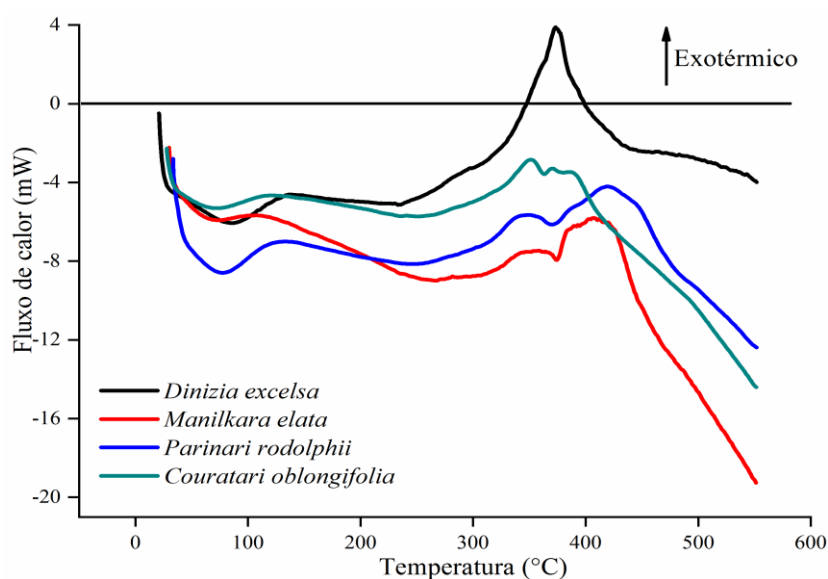
Figura 2. Derivada primeira (DTG) da curva termogravimétrica da pirólise das madeiras em estudo.



Fonte: (Autor)

O primeiro estágio de perda de massa, conhecido como estágio pré-pirólise, corresponde à perda de água na fase inicial do processo, que foi em média 5,65% para todas espécies avaliadas. Nesta fase, ocorre perda da água de adesão presente na parede celular e que necessita de energia para ser retirada da madeira e, portanto, trata-se de uma fase endotérmica, conforme observado no pico inverso da curva DSC (Figura 3). Jankovic *et al.* (2019) verificaram comportamento semelhante com biomassas residuais (palha de milho, palha de trigo e casca de avelã), com perda de água média de 7,5% para os materiais lignocelulósicos avaliados. Observa-se na Figura 3 que apenas a madeira de *D. excelsa* apresentou comportamento exotérmico da pirólise na faixa de temperatura entre 330 e 440 °C, fato atribuído ao maior teor de hemiceluloses presentes na biomassa residual em estudo (Comesaña *et al.*, 2013).

Figura 3. Calorimetria exploratória diferencial (DSC) da pirólise das madeiras em estudo.



Fonte: (Autor)

Na faixa de temperatura compreendida entre 100 e 200 °C, a perda de massa foi mínima (0,53% em média). Essa faixa de temperatura é chamada de zona de estabilidade térmica da madeira, que é limitada pela temperatura inicial de degradação térmica dos principais componentes do lenho (Pereira *et al.*, 2013). No segundo estágio, que se trata da pirólise ativa, ocorre acentuada perda de massa com o aumento da temperatura, em que há liberação de gases e vapores relativos à degradação das hemiceluloses e celulose que ocorrem neste estágio, com degradação das hemiceluloses ocorrendo entre 175 e 380 °C e da celulose entre 250 e 380 °C (Manic *et al.*, 2019). A decomposição térmica das hemiceluloses foi mais

evidente para as madeiras residuais de *M. elata* e *D. excelsa*, com pico em aproximadamente 290 °C (Figura 2). Os resultados demonstram que em baixas temperaturas (até 300 °C), a madeira de *P. rodolphii* apresentou menor perda de massa e, conseqüentemente, maior resistência à degradação térmica.

A segunda fase de decomposição é caracterizada principalmente pela degradação da molécula de celulose. Nesta etapa, na maioria das madeiras analisadas, a maior perda de massa ocorreu na faixa de temperatura de 300 a 400 °C (Figuras 1 e 2). Embora sem apresentar picos característicos, a degradação da lignina ocorre em ambos estágios, iniciando no estágio de pirólise ativa (em 280 °C) e terminando na pirólise passiva (em 500 °C).

Apesar da menor perda de massa em baixas temperaturas (até 300 °C), a madeira residual de *P. rodolphii* apresentou a maior taxa de degradação térmica (7,7508 % min⁻¹) na temperatura de 355 °C. Dessa forma, a madeira dessa espécie é mais indicada para a torrefação e não para carbonização, haja visto o seu melhor desempenho térmico em temperaturas inferiores a 300 °C.

Por outro lado, a madeira residual de *D. excelsa* apresentou a menor taxa de perda de massa (6,0443 % min⁻¹) na temperatura de 353 °C e, conseqüentemente, a menor perda de massa na faixa de 300 a 400 °C (42,72%). Além disso, nota-se que as massas residuais obtidas no ensaio termogravimétrico para as diferentes madeiras variaram de 14,62 a 22,81% para as espécies *C. oblongifolia* e *D. excelsa*, respectivamente. A maior resistência à degradação térmica da madeira de *D. excelsa* pode estar associada aos elevados teores de lignina insolúvel (34,6%) e extrativos totais (17,9%) reportados para essa espécie, conforme verificado por Lima *et al.* (2020a).

É importante ressaltar que quanto mais estável termicamente a madeira e, conseqüentemente, menores perdas de massa na faixa de 300 e 400 °C e maior massa residual no ensaio termogravimétrico, maior será o rendimento em carvão vegetal. Portanto, espera-se que a carbonização da madeira residual de *C. oblongifolia* resulte em menor rendimento gravimétrico e de *D. excelsa* resulte em maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal, como reportado por Lima *et al.* (2020b). Isso demonstra a importância de segregação dos resíduos do manejo florestal visando à maximização da produtividade das unidades de produção de carvão vegetal e, conseqüentemente, redução de custos com gerenciamento e minimização das emissões de gases oriundos da degradação térmica das madeiras.

Além disso, podem-se obter ganhos consideráveis no rendimento em carvão vegetal com o controle efetivo da temperatura dos fornos, conforme pode ser constatado analisando-se as perdas de massa por faixa de temperatura no ensaio de pirólise.

4. CONCLUSÃO

A caracterização térmica realizada por termogravimetria mostrou que a espécie *D. excelsa* apresentou a menor perda de massa, justificado pelo elevador teor de extrativos totais presente na biomassa. Ademais, as curvas de DSC mostraram um padrão endotérmico para as madeiras avaliadas durante a pirólise, com exceção de um único pico exotérmico apenas para a madeira de *D. excelsa*, relativo a maior capacidade de transferência de calor nesta faixa de temperatura. Diante do exposto, dentre as madeiras estudadas no presente trabalho, a espécie *D. excelsa* resultará no maior rendimento em carvão vegetal.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos 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

COMESAÑA, J. A.; NIESTRÖJ, M.; GRANADA, E.; SZLEK, A. TG-DSC analysis of biomass heat capacity during pyrolysis process. **Journal of the Energy Institute**, v. 86, n. 3, p. 153–159, 2013.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; SOARES, V. W.; COSTA JÚNIOR, D. S.; FERREIRA, D. H. A. A.; LELES, P. S. S. Potencial energético de sete materiais genéticos de *Eucalyptus* cultivados no Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 833-843, 2015.

DUFOURNY, A.; DE STEENE, L. V.; HUMBERT, G.; GUIBAL, D.; MARTIN, L.; BLIN, J. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 137, p. 1-13, 2019.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Forestry production and trade**. 2023. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acesso em: 19 Jul 2024.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. (2023). **Relatório Anual IBÁ 2023**. São Paulo: IBÁ. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>>. Acesso em: 19 Jul 2024.

JANKOVIĆ, B.; MANIĆ, N.; STOJILJKOVIĆ, D. The gaseous products characterization of the pyrolysis process of various agricultural residues using TGA–DSC–MS techniques. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 139, p. 3091–3106, 2020.

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**, v. 140, 105660, 2020a.

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

MANIC, N.; JANKOVIC, B.; STOJILJKOVIC, D.; JOVANOVIC, V.; RADO- JEVIC, M. TGA-DSC-MS analysis of pyrolysis process of various agricultural residues. **Thermal Science**, v. 23, n. 5, p. 1457–1472, 2019.

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

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013.

PEREIRA, E. G.; MARTINS, M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O. Pyrolysis gases burners: sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 592-600, 2016.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS - SINDIFER. **Produção de ferro gusa em Minas Gerais e no Brasil: Anuário estatístico - Ano base 2023**. Disponível em: <<http://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>>. Acesso em: 19 Jul 2024.

SOUZA, N. D.; AMODEI, J. B.; XAVIER, C. N.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CARVALHO, A. M. Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 270-277, 2016.

VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. **BNDS Setorial**, v. 30, p. 237-297, 2009.